

Редакционный совет:

CHYI-YEU LIN, PhD, prof.
GROUMPOS P. P., prof.
JEN-HWA GUO, PhD, prof.
KATALINIC B., PhD, prof.
SUBUDHI B., PhD, prof.
АЛИЕВ Т. А., акад. НАНА, проф.
АНШАКОВ Г. П., чл.-корр. РАН, проф.
БОЛОТНИК Н. Н., чл.-корр. РАН, проф.
ВАСИЛЬЕВ С. Н., акад. РАН, проф.
КАЛЯЕВ И. А., чл.-корр. РАН, проф.
КРАСНЕВСКИЙ Л. Г., чл.-корр. НАНБ, проф.
КУЗНЕЦОВ Н. А., акад. РАН, проф.
ЛЕОНОВ Г. А., чл.-корр. РАН, проф.
МАТВЕЕНКО А. М., акад. РАН, проф.
МИКРИН Е. А., акад. РАН, проф.
ПЕШЕХОНОВ В. Г., акад. РАН, проф.
РЕЗЧИКОВ А. Ф., чл.-корр. РАН, проф.
СЕБРЯКОВ Г. Г., чл.-корр. РАН, проф.
СИГОВ А. С., акад. РАН, проф.
СОЙФЕР В. А., чл.-корр. РАН, проф.
СОЛОВЬЕВ В. А., чл.-корр. РАН, проф.
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М., чл.-корр. РАН, проф.
ФЕДОРОВ И. Б., акад. РАН, проф.
ЧЕНЦОВ А. Г., чл.-корр. РАН, проф.
ЧЕРНОУСЬКО Ф. Л., акад. РАН, проф.
ЩЕРБАТЮК А. Ф., чл.-корр. РАН, проф.
ЮСУПОВ Р. М., чл.-корр. РАН, проф.

Главный редактор:

ФИЛИМОНОВ Н. Б., д. т. н., с. н. с.

Заместители гл. редактора:

ПОДУРАЕВ Ю. В., д. т. н., проф.
ПУТОВ В. В., д. т. н., проф.
ЮЩЕНКО А. С., д. т. н., проф.

Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСАНДРОВ В. В., д. ф.-м. н., проф.
АНТОНОВ Б. И.
АРШАНСКИЙ М. М., д. т. н., проф.
БУКОВ В. Н., д. т. н., проф.
ВИТТИХ В. А., д. т. н., проф.
ГРАДЕЦКИЙ В. Г., д. т. н., проф.
ЕРМОЛОВ И. Л., д. т. н., доц.
ИВЧЕНКО В. Д., д. т. н., проф.
ИЛЬЯСОВ Б. Г., д. т. н., проф.
КОЛОСОВ О. С., д. т. н., проф.
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф., д. т. н., проф.
ЛЕБЕДЕВ Г. Н., д. т. н., проф.
ЛОХИН В. М., д. т. н., проф.
ПАВЛОВСКИЙ В. Е., д. ф.-м. н., проф.
ПРОХОРОВ Н. Л., д. т. н., проф.
ПШИХОПОВ В. Х., д. т. н., проф.
РАПОПОРТ Э. Я., д. т. н., проф.
СЕРГЕЕВ С. Ф., д. пс. н., с. н. с.
ФИЛАРЕТОВ В. Ф., д. т. н., проф.
ФРАДКОВ А. Л., д. т. н., проф.
ФУРСОВ В. А., д. т. н., проф.
ЮРЕВИЧ Е. И., д. т. н., проф.

Редакция:

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

СОДЕРЖАНИЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ, УПРАВЛЕНИЕ И ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

- Потапов В. И.** Новая математическая модель аппаратно-избыточной технической системы, участвующей в конфликтной ситуации 363
- Щербаков В. С., Коротков М. С., Шершнева Е. О.** Активный способ гашения колебаний груза после остановки мостового крана 368
- Колосов О. С., Анисимов Д. Н., Хрипков Д. В.** Формирование структуры и состава многоуровневых нечетких диагностических систем с использованием стохастической модели. 375

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Павловский В. Е., Павловский В. В.** Технологии SLAM для подвижных роботов: состояние и перспективы 384
- Смирнов А. В., Беззубцев А. Ю.** Автоматическое передвижение роботизированного подвижного технического средства с построением схемы исследуемого помещения 395
- Нгуен Туан Зунг, Щербатов И. А., Проталинский О. М.** Система управления мобильным роботом на основе модифицированного алгоритма 3D-pointcloud 400
- Притыкин Ф. Н., Нефедов Д. И.** Исследование поверхностей, задающих границы области разрешенных конфигураций механизма мобильного манипулятора при наличии запретных зон 407

НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

- Воротников В. И., Мартышенко Ю. Г.** К задаче переориентации трехроторного гироската при неконтролируемых внешних помехах 414
- Нестеров В. А., Кадыров Я. Р.** Управление группой беспилотных летательных аппаратов в режиме радиомолчания 419
- Свердлов С. З.** Скороподъемность электрического мультикоптера 425

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук; журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу:
<http://novtex.ru/mech>, e-mail: mech@novtex.ru

MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL



MEKHATRONIKA, AVTOMATIZATSIIYA, UPRAVLENIE

Published since 2000

ISSN 1684-6427

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Editorial Council:

ALIEV T. A., prof., Azerbaijan, Baku
 ANSHAKOV G. P., Russia, Samara
 BOLOTNIK N. N., Russia, Moscow
 CHENTSOV A. G., Russia, Ekaterinburg
 CHERNOUSKO F. L., Russia, Moscow
 CHYI-YEU LIN, PhD, Prof., Taiwan, Taipei
 FEDOROV I. B., Russia, Moscow
 GROUMPOS P. P., prof., Greece, Patras
 JEN-HWA GUO, PhD, Prof., Taiwan, Taipei
 KALYAEV I. A., Russia, Taganrog
 KATALINIC B., PhD, Prof., Austria, Vienna
 KRASNEVSKIY L. G., Belarus, Minsk
 KUZNETSOV N. A., Russia, Moscow
 LEONOV G. A., Russia, S.-Peterburg
 MATVEENKO A. M., Russia, Moscow
 MIKRIN E. A., Russia, Moscow
 PESHEKHONOV V. G., Russia, S.-Peterburg
 REZCHIKOV A. F., Russia, Saratov
 SCHERBATYUK A. F., Russia, Vladivostok
 SEBRYAKOV G. G., Russia, Moscow
 SIGOV A. S., Russia, Moscow
 SOJFER V. A., Russia, Samara
 SOLOMENTSEV Yu. M., Russia, Moscow
 SOLOVJEV V. A., Russia, Moscow
 SUBUDHI B., PhD, Prof., India, Sundargarh
 VASILYEV S.N., Russia, Moscow
 YUSUPOV R. M., Russia, S.-Peterburg

Editor-in-Chief:

FILIMONOV N. B., Russia, Moscow

Deputy Editor-in-Chief:

PODURAEV Yu. V., Russia, Moscow
 PUTOV V. V., Russia, S.-Peterburg
 YUSCHENKO A. S., Russia, Moscow

Responsible Secretary:

BEZMEENOVA M. Yu., Russia, Moscow

Editorial Board:

ALEXANDROV V. V., Russia, Moscow
 ANTONOV B. I., Russia, Moscow
 ARSHANSKY M. M., Russia, Tver
 BUKOV V. N., Russia, Zhukovsky
 ERMOLOV I. L., Russia, Moscow
 FILARETOV V. F., Russia, Vladivostok
 FRADKOV A. L., Russia, S.-Peterburg
 FURSOV V. A., Russia, Samara
 GRADETSKY V. G., Russia, Moscow
 ILYASOV B. G., Russia, Ufa
 IVCHENKO V. D., Russia, Moscow
 KOLOSOV O. S., Russia, Moscow
 KOROSTELEV V. F., Russia, Vladimir
 LEBEDEV G. N., Russia, Moscow
 LOKHIN V. M., Russia, Moscow
 PAVLOVSKY V. E., Russia, Moscow
 PROKHOROV N. L., Russia, Moscow
 PSHIKHOPOV V. Kh., Russia, S.-Peterburg
 RAPOPORT E. Ya., Russia, Samara
 SERGEEV S. F., Russia, S.-Peterburg
 VITTIKH V. A., Russia, Samara
 YUREVICH E. I., Russia, S.-Peterburg

Editorial Staff:

GRIGORIN-RYABOVA E.V., Russia, Moscow

The mission of the Journal is to cover the current state, trends and prospective development of *mechatronics*, that is the priority field in the technosphere as it combines mechanics, electronics, automatics and informatics in order to improve manufacturing processes and to develop new generations of equipment. Covers topical issues of development, creation, implementation and operation of mechatronic systems and technologies in the production sector, power economy and in transport.

CONTENTS

MODELING, CONTROL AND DIAGNOSTICS OF TECHNICAL SYSTEMS

- Potapov V. I.** A New Mathematical Model of a Hardware-Redundant Technical System Involved in a Conflict Situation 363
- Scherbakov V. S., Korytov M. S., Shershneva E. O.** Active Way of Clearing of Fluctuations of Freight after a Stop of the Bridge Crane 368
- Kolosov O. S., Anisimov D. N., Khripkov D. V.** The Formation of Multi-Level Fuzzy Diagnosing Systems Structure Using Stochastic Models 375

ROBOTIC SYSTEMS

- Pavlovsky V. E., Pavlovsky V. V.** SLAM Technologies for Mobile Robots: State and Prospects 384
- Smirnov A. V., Bezzubtcev A. Yu.** Automatic Moving of a Robotic Mobile Device Making a Map of a Building 395
- Nguyen Tuan Dung, Shcherbatov I. A., Protalinskii O. M.** Mobile Robot Control System Based on a Modified 3D-Pointcloud Algorithm 400
- Pritykin F. N., Nefedov D. E.** Study of the Surfaces Defining the Area Boundaries of the Allowable Configurations of the Mobile Manipulator Mechanism with the Available Forbidden Zones 407

NAVIGATION AND CONTROL OF MOBILE OBJECTS

- Vorotnikov V. I., Martysenko Yu. G.** To Problem of Three-Rotor Gyrostat Reorientation under Uncontrolled External Disturbances 414
- Nesterov V. A., Kadyrov J. R.** The Group Management of Unmanned Aerial Vehicles in the Radio Silence Mode 419
- Sverdlov S. Z.** Rate of Climb of Electric Multicopter 425

Information about the journal is available online at:
<http://novtex.ru/mech.html>, e-mail: mech@novtex.ru

В. И. Потапов, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, ivt@omgtu.ru,
Омский государственный технический университет

Новая математическая модель аппаратно-избыточной технической системы, участвующей в конфликтной ситуации

Разработана математическая модель аппаратно-избыточной технической системы, участвующей в конфликтной ситуации, в которую введены дополнительные ограничения, отражающие реальные условия работы технической системы, связанные с особенностью подключения резервных блоков для замены отказавших в процессе конфликта основных функциональных блоков. Модель также учитывает конечную надежность системы контроля работы технической системы и подключения резервных блоков вместо отказавших в процессе конфликта. Предложен метод приближенного вычисления среднего времени "жизни" технической системы, участвующей в конфликте, позволяющий находить оптимальные параметры структуры технической системы, обеспечивающие максимизацию ее среднего времени "жизни" в процессе конфликта.

Ключевые слова: математическая модель, конфликтная ситуация, техническая система, среднее время "жизни", приближенное вычисление

Введение

Вопросам поведения технических систем в конфликтных ситуациях и проблемам оптимизации их надежности в процессе конфликта за счет целенаправленного использования для защиты от атак противника аппаратной избыточности посвящено большое число научных работ отечественных и зарубежных авторов. Наиболее близкими из них по содержанию к проблемам, рассматриваемым в данной статье, являются работы [1–10]. По-видимому, монография [1] является одной из первых работ, где для защиты участвующей в конфликтной ситуации технической системы от атак противника, в качестве которого может выступать другая техническая система, используется оптимальным образом аппаратная избыточность, обеспечивающая максимизацию вероятности безотказной работы либо среднего времени "жизни" (среднего времени до полного отказа) атакуемой системы в течение времени конфликта. Ряд ранних работ [2–4] посвящен аналитическим исследованиям решения задач теории конфликта сложных систем без детализации их структуры, что затрудняет их использование на практике. В этих работах рассматриваются вопросы, относящиеся к проблемам оптимального управления подвижными объектами в конфликтных ситуациях, предложен метод направленной оптимизации вектора начальных координат в одной модели конфликта подвижных объектов, технические характеристики которых ухудшались в результате конфликтного взаимодействия с объектами противника и приводили к старению системы, что естественно, увеличивало вероятность отказа этой системы. Также в этих работах изучаются вопросы оптималь-

ного управления конфликтующими подвижными объектами для достаточно сложных моделей конфликта, в которых на надежность участвующего в конфликте объекта влияет не только взаимодействие с противостоящим подвижным объектом, но и взаимодействие с изменяющимися пространственными факторами, такими как физико-географические особенности пространства, радиационная обстановка и др. В этих работах основное внимание уделено постановке задач и разработке математических методов и моделей оптимизации управления подвижными конфликтующими объектами, при этом, к сожалению, структура самих объектов и структура системы управления, а также алгоритмы для численного решения сформулированных задач в этих работах не рассматриваются, что влияет на адекватность моделей реальным конфликтующим объектам и существенно затрудняет использование полученных алгоритмов на практике. В определенной степени указанные выше недостатки, касающиеся структуры моделей, участвующих в конфликтной ситуации технических систем, и численных алгоритмов решения задач оптимизации их надежности в процессе конфликта устранены в работах [6–10]. Однако и в этих работах для упрощения моделей конфликтующих технических систем считалось, что система контроля работы технической системы и подключения резервных блоков вместо отказавших функциональных у атакуемой в процессе конфликта системы пренебрежимо мала, и ее реальная надежность не учитывалась. Также полагалось, что любой резервный блок, относящийся к соответствующей группе основных и резервных блоков, может подключаться для замены любого подряд стоящего отказавшего основного функцио-

нального блока из этой группы. На самом деле это не всегда возможно в силу технических или технологических причин, а также в силу ряда причин, вызванных особенностями взаимодействия основных и резервных блоков друг с другом. Поэтому при разработке математической модели, участвующей в конфликтной ситуации аппаратно-избыточной технической системы, следует учитывать этот фактор и вводить новый дополнительный параметр, характеризующий особенности подключения резервных блоков для замены отказавших основных блоков в соответствующей группе. Это наряду с учетом конечной надежности системы контроля работы участвующей в конфликте технической системы и подключения резервных блоков вместо отказавших функциональных блоков повысит адекватность модели реальным условиям работы аппаратно-избыточной технической системы в конфликтной ситуации и позволит вычислять характеристики надежности системы в процессе конфликта с большей точностью.

В данной статье делается попытка устранить отмеченные выше пробелы в указанных работах и разработать новую математическую модель аппаратно-избыточной технической системы и метод приближенного вычисления среднего времени "жизни" технической системы, участвующей в конфликте, позволяющие находить оптимальные параметры структуры технической системы, обеспечивающие максимизацию ее среднего времени "жизни" в течение конфликта.

Особенности математической модели аппаратно-избыточной технической системы, участвующей в конфликтной ситуации

По аналогии с работами [6–10] будем считать, что в конфликтной ситуации участвует техническая система, состоящая из n ($n = n_1 + n_2 + \dots + n_q$) основных функциональных m ($m = s_1 + s_2 + \dots + s_q$) резервных блоков, разбитых на q групп, в каждой из которых находятся n_i ($1 \leq i \leq q$) основных и s_i ($1 \leq i \leq q$) резервных блоков, представляющих целочисленный вектор резервирования $\mathbf{s} = (s_1, s_2, \dots, s_q)$, используемых для замены отказавших основных блоков только в соответствующей группе. При этом в указанных работах в целях упрощения математической модели аппаратно-избыточной технической системы, участвующей в конфликтной ситуации и использующей для защиты от атак противника резервные блоки, никакие другие ограничения, кроме отмеченных выше, не накладывались. На самом деле, в силу специфики организационно-структурных принципов построения и конструктивных особенностей реальных технических систем, программно-алгоритмических и технологических процессов их работы появляется дополнительное ограничение на замену отказавших основных блоков резервными, сводящееся к тому, что в силу указанных причин обеспечивается возможность подключения резервных блоков в i -й группе вместо не более чем r_i ($1 \leq r_i \leq n_i$) расположенных подряд отка-

завших основных блоков в этой группе. Очевидно, что при $q = 1$ $r_i = r$ ($1 \leq r \leq m$), а n основных и m резервных функциональных блоков технической системы объединены в одну группу. Учет этого ограничения в рассматриваемой математической модели аппаратно-избыточной технической системы делает модель более адекватной реальным техническим системам и позволяет получать более точные характеристики надежности системы при моделировании ее поведения в процессе конфликта.

При разработке математических моделей технических аппаратно-избыточных систем, участвующих в конфликтных ситуациях, в работах [6–10] считалось, что вероятность отказа системы C_{kn} контроля работы аппаратно-избыточной системы и подключения резервных блоков вместо отказавших основных функциональных блоков пренебрежимо мала, и ее, вообще говоря, конечная надежность, влияющая на надежность всей участвующей в конфликте системы, не учитывалась. Это также приводило к занижению точности результатов моделирования поведения системы в конкретной конфликтной ситуации, так как не учитывалось влияние атак противника на надежность и возможный отказ системы C_{kn} контроля работы и подключения резервных блоков и в конечном итоге влияло на стратегию поведения технической системы в течение времени конфликта и оптимизацию ее надежности.

В предлагаемой математической модели аппаратно-избыточной технической системы, которую обозначим $S(n, m, \mathbf{s}, C_{kn})$ учитывается конечная надежность данной системы контроля с учетом дестабилизации ее работы со стороны атак противника, стремящегося увеличить интенсивность отказов системы C_{kn} и вывести ее в состояние отказа. При этом будем полагать, что C_{kn} -система в работоспособном состоянии обнаруживает отказы работающих функциональных блоков участвующей в конфликте технической системы сразу же после их возникновения под действием атак противника, а время подключения резервного блока вместо отказавшего равно нулю.

Отказы в резервных блоках, не включенных еще в состав рабочей группы технической системы вместо основных блоков, не обнаруживаются C_{kn} -системой и не приводят к их переключению, однако они уменьшают ресурс надежности технической системы $S(n, m, \mathbf{s}, C_{kn})$. Отказ устройства C_{kn} контроля и подключения резервных блоков вместо отказавших не вызывает немедленного отказа $S(n, m, \mathbf{s}, C_{kn})$ -системы, но после его появления последующий отказ любого рабочего блока приводит к отказу всей технической системы, участвующей в конфликте.

Постановка и решение задачи

Будем считать, что аппаратно-избыточная техническая система $S(n, m, \mathbf{s}, C_{kn})$ оказалась в конфликтной ситуации, когда противник преследует цель дестабилизировать ее работу, т. е. уменьшить ресурс работоспособности системы, что с точки зре-

ния теории надежности означает увеличить в течение времени конфликта вероятность отказа системы, либо уменьшить среднее время ее "жизни" до полного отказа, т. е. "гибели" системы. В качестве средства атаки противник имеет возможность влиять на увеличение в процессе конфликта интенсивности отказов $\lambda_i(t)$ ($1 \leq i \leq n$) основных функциональных блоков и интенсивности отказов не включенных в работу резервных блоков $\lambda_0(t)$ технической системы, а также на увеличение интенсивности отказов $\lambda_c(t)$ системы C_{kn} контроля работы и подключения резервных блоков вместо отказавших. При этом в зависимости от стратегии атакующего противника закон возрастания интенсивности отказов может изменяться, например от линейного до экспоненциального.

Учитывая вероятностный характер поведения участвующей в конфликтной ситуации $S(n, m, s, C_{kn})$ -системы обозначим $p_i(t)$ — вероятность нахождения системы в состоянии с i ($0 \leq i \leq m$) отказами в работающих функциональных блоках; $p_{kn}(t)$ — вероятность нахождения рассматриваемой системы в состоянии отказа системы C_{kn} контроля ее работы и подключения резервных блоков вместо отказавших основных функциональных блоков.

Обозначим A_k ($1 \leq k \leq m$) — интенсивность перехода $S(n, m, s, C_{kn})$ -системы из состояния с $(k-1)$ отказами в основных работающих функциональных блоках в состояние с k подобными отказами; B_k ($1 \leq k \leq m+1$) — интенсивность перехода $S(n, m, s, C_{kn})$ -системы из состояния с $(k-1)$ отказами в состояние "гибели", т. е. полного отказа системы; B_{kn} — интенсивность перехода $S(n, m, s, C_{kn})$ -системы из состояния отказа системы C_{kn} контроля ее работы и подключения резервных блоков вместо отказавших в состояние "гибели" системы.

Аппроксимируя поведение участвующей в конфликте технической системы $S(n, m, s, C_{kn})$ марковским процессом в предположении простейшего потока отказов, нетрудно получить по известной методике [11, 12] систему дифференциальных уравнений Колмогорова, описывающих функционирование рассматриваемой технической системы в условиях конфликта:

$$\begin{aligned} p'_0(t) &= -D_1 p_0(t); \\ p'_k(t) &= A_k p_{k-1} - D_{k+1} p_k(t), \\ k &= 1, 2, \dots, m; \\ p'_{kn}(t) &= \lambda_c(t)[p_0(t) + p_1(t) + \dots + p_m(t)] - B_{kn} p_{kn}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

с начальными условиями

$$p_0(0) = 1, p_1(0) = p_2(0) = \dots = p_m(0) = p_{kn}(0) = 0,$$

где

$$\begin{aligned} D_k &= A_k + B_k, \quad 1 \leq k \leq m; \\ D_{m+1} &= B_{m+1}; \\ B_{kn} &= n\lambda_i(t). \end{aligned}$$

Теперь необходимо определить коэффициенты A_k и B_k из системы уравнений (1).

С учетом разработанной математической модели аппаратно-избыточной технической системы $S(n, m, s, C_{kn})$, участвующей в конфликтной ситуации, коэффициенты A_k и B_k для каждой i -й ($1 \leq i \leq q$) группы основных и резервных блоков рассматриваемой системы имеют следующий вид:

$$A_k = z_k(\alpha_i - k + 1)\lambda_i(t), \quad 1 \leq k \leq m;$$

$$B_k = (1 - z_k)(\alpha_i - k + 1)\lambda_i(t); \quad 1 \leq k \leq m,$$

где $\alpha_i = n_i + m_i$ — общее число блоков в i -й группе;

$$z_k = \begin{cases} 1, & \text{если } 1 \leq k \leq r, \\ \binom{\alpha_i}{k}^{-1} d(\alpha_i, r_i, k), & \text{если } r_i + 1 \leq k \leq m_i, \end{cases}$$

а $d(\alpha_i, r_i, k)$ — число расстановок k единиц на α_i местах таких, что ни в одной расстановке нет более, чем r_i подряд стоящих единиц. При этом отказавшему блоку (элементу) системы ставится в соответствие число 1, а не отказавшему — число 0. Легко понять, что $d(\alpha_i, r_i, k)$ есть число решений диофантова уравнения

$$x_1 + x_2 + \dots + x_{\alpha_i - k + 1} = k \quad (2)$$

с ограничениями

$$0 \leq x_1 \leq r_i, \quad 0 \leq x_2 \leq r_i, \quad \dots, \quad 0 \leq x_{\alpha_i - k + 1} \leq r_i.$$

Физическая интерпретация диофантова уравнения (2) следующая: x_1 — число отказов в строке до первого неотказавшего блока; x_2 — число отказов между первым и вторым неотказавшими блоками и т. д.

Рекуррентная формула для числа решений уравнения (2) может быть получена методом производящей функции [13, 14]. Однако, как показал опыт, этот метод достаточно громоздкий и не удобен для программирования. Поэтому воспользуемся более удобным для программирования методом, приведенным в работе [15], который в применении к уравнению (2) дает следующий результат:

$$d(\alpha_i, r_i, k) = \sum_{i=0}^{\alpha_i - k + 1} (-1)^i \binom{\alpha_i - k + 1}{i} \binom{\alpha_i(r_i + 1)i}{k - (r_i + 1)i}.$$

Очевидно, что при $i = 1$ $\alpha_i = \alpha = (n + m)$, а $r_i = r$ ($1 \leq r \leq m$). Полученные выражения для коэффициентов системы уравнений (1) указывают на то, что для исследования поведения и оптимизации с точки зрения надежности участвующей в конфликтной ситуации технической системы $S(n, m, s, C_{kn})$ в соответствии с разработанной математической моделью необходимо решать систему дифференциальных уравнений с переменными во времени коэффициентами, сложность которых практически исключает использование напрямую аналитических методов. Поэтому в силу принятого предположения о простейшем потоке отказов в работе предлагается следующий метод приближенного вычисле-

ния среднего времени T "жизни" участвующей в конфликте технической $S(n, m, s, C_{kn})$ -системы:

$$T = \sum_{l=0}^{m-1} T_l,$$

где T_l — среднее время работы технической системы между l -м и $(l+1)$ -м отказами в процессе конфликта, а m — число резервных блоков в системе.

В силу принятых предположений поведение рассматриваемой $S(n, m, s, C_{kn})$ -системы после отказа l -го ($1 \leq l \leq m-1$) функционального рабочего блока и замены отказавших блоков резервными можно описать следующей системой дифференциальных уравнений, полученной из системы (1) путем смещения начала отсчета времени в точку $\tau = T_0 + T_1 + \dots + T_{l-1}$, считая при этом, что интенсивности отказов $\lambda_i(t)$, $\lambda_0(t)$ и $\lambda_c(t)$ являются постоянными и равными среднему значению интенсивности отказов на рассматриваемом временном интервале (в зависимости от целей исследования указанные интенсивности отказов могут быть приняты равными значениям на границах временного интервала):

$$\begin{aligned} p'_{l,l}(t) &= -D_l p_{l,l}(t); \\ p'_{i,l}(t) &= A_i p_{i-1,l}(t) - D_{i+1} p_{i,l}(t), \\ i &= l+1, l+2, \dots, m; \\ p'_{kn,l}(t) &= \lambda_{c,l} [p_{l,l}(t) + p_{l+1,l}(t) + \dots + \\ &+ p_{m,l}(t)] - B_{kn} p_{kn,l}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

с начальными условиями

$$p_{l,l}(0) = 1, p_{l+1,l}(0) = p_{l+2,l}(0) + \dots + p_{m,l}(0) + p_{kn,l}(0) = 0.$$

Решение системы уравнений (3) имеет вид

$$p_{l,l}(t) = \exp(-D_l t); \quad (4)$$

$$p_{i,l}(t) = F_{i,l} \sum_{v=l}^i \exp(-D_v t) \left[\prod_{\substack{g=l \\ g \neq v}}^i (D_g - D_v) \right]^{-1}; \quad (5)$$

$$(l+1 \leq i \leq m);$$

$$F_{i,l} = \prod_{j=l}^{i-1} A_j; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} p_{kn,l} &= \lambda_{c,l} \left\{ \exp(-D_l t) (B_{kn} - D_l)^{-1} - R_l \exp(-B_{kn} t) + \right. \\ &+ \sum_{i=l+1}^m F_{i,l} \sum_{v=l}^i \exp(-D_v t) \left[(B_{kn} - D_v) \prod_{\substack{g=l \\ g \neq v}}^i (D_g - D_v) \right]^{-1} \left. \right\}, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} R_l &= (B_{kn} - D_l)^{-1} + \\ &+ \sum_{i=l+1}^m F_{i,l} \sum_{v=l}^i \left[(B_{kn} - D_v) \prod_{\substack{g=l \\ g \neq v}}^i (D_g - D_v) \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (8)$$

Используя выражения (4)–(8), нетрудно вычислить среднее время работы $S(n, m, s, C_{kn})$ -системы между l -м и $(l+1)$ -м отказами по формуле

$$T_l = \int_0^{\infty} p_{kn,l}(t) dt + \sum_{i=l}^m \int_0^{\infty} p_{i,l}(t) dt. \quad (9)$$

После соответствующих преобразований имеем

$$\begin{aligned} T_l &= \left(\frac{\lambda_{c,l}}{B_{kn}} + 1 \right) \times \\ &\times \left\{ \frac{1}{D_l} + \sum_{i=l+1}^m F_{i,l} \sum_{v=l}^i \left[D_v \prod_{\substack{g=l \\ g \neq v}}^i (D_g - D_v) \right]^{-1} \right\}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$l = 0, 1, \dots, m-1.$$

Теперь не представляет особого труда численным методом вычислить приближенное значение среднего времени "жизни" рассматриваемой системы или, иными словами, среднее время T работы технической системы $S(n, m, s, C_{kn})$ до полного отказа в процессе конфликта.

Заключение

Используя разработанную в статье математическую модель аппаратно-избыточной технической системы $S(n, m, s, C_{kn})$, участвующей в конфликтной ситуации, зная (или предполагая) стратегию поведения атакующей стороны, которая заключается в соответствующем воздействии на техническую систему, приводящем к возрастанию во время конфликта интенсивностей отказов блоков системы $\lambda_i(t)$, $\lambda_0(t)$, $\lambda_c(t)$ по выбранному атакующей стороны закону, и применяя предложенный метод приближенного вычисления среднего времени работы атакуемой технической системы между отказами и среднего времени "жизни" системы в процессе конфликта с помощью компьютерного моделирования, можно найти оптимальные параметры структуры аппаратно-избыточной $S(n, m, s, C_{kn})$ -системы при заданных значениях n, m, r_j , обеспечивающие максимизацию времени "жизни" технической системы в процессе конфликта.

Список литературы

1. Потапов В. И., Братцев С. Г. Новые задачи оптимизации резервированных систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1986. 112 с.
2. Nartov B. K. Conflict of Moving Systems. AMSE Press, France, 1994. 87 p.
3. Нартгов Б. К., Братцев С. Г., Мурзин Ф. А., Пунтус А. А. Конфликт сложных систем. Модели и управление. М.: Изд-во МАИ, 1995. 120 с.
4. Нартгов Б. К. Управление подвижными объектами. Формализация и модели. Омск: Изд-во ОмГУ, 2002. 83 с.
5. Лефевр В. А. Конфликтующие структуры. М.: Сов. радио, 1973. 159 с.
6. Потапов В. И. Модель и алгоритм численного решения задачи противоборства двух избыточных, восстанавливаемых после отказов технических систем // Проблемы управления и информатики. 2015. № 4. С. 70–78.
7. Потапов В. И. Математическая модель и алгоритм оптимального управления подвижным объектом в конфликтной си-

туации // Мехатроника, автоматика, управление. 2014. № 7. С. 16–22.

8. **Потапов В. И.** Задачи и численные алгоритмы оптимизации надежности аппаратно-избыточной технической системы в конфликтной ситуации при различных стратегиях защиты от атак противника // Мехатроника, автоматизация, управление. Т. 16. 2015. № 9. С. 617–624.

9. **Potapov V. I.** Model and Numerical Solving Algorithm of Counteraction Problem for Two Restored after Failure Redundant Engineering Systems // Journal of Automation and Information Sciences. Vol. 47. P. 41–51.

10. **Потапов В. И.** Противоборство технических систем в конфликтных ситуациях: модели и алгоритмы. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. 168 с.

11. **Вентцель Е. С.** Исследование операций. М.: Сов. радио, 1972. 550 с.

12. **Козлов Б. А., Ушаков И. А.** Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. М.: Сов. радио, 1975. 472 с.

13. **Риордан Дж.** Введение в комбинаторный анализ. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 287 с.

14. **Холл М.** Комбинаторика. М.: Мир, 1970. 424 с.

15. **Сачков В. Н.** Комбинаторные методы дискретной математики. М.: Наука, 1978. 486 с.

A New Mathematical Model of a Hardware-Redundant Technical System Involved in a Conflict Situation

V. I. Potapov, ivt@omgtu.ru✉, Omsk State Technical University, Omsk, 644050, Russian Federation

Corresponding author: **Potapov Victor I.**, D. Sc., Professor, The Head of the Department of Informatics and computer engineering, Omsk State Technical University, Omsk, 644050, Russian Federation, e-mail: ivt@omgtu.ru

Received on February 26, 2016

Accepted on March 11, 2016

A new mathematical model of the hardware-redundant technical system has been developed, containing the main functional and redundant units, for their plug-in instead of the failed main ones, in a conflict situation. In the proposed model, besides the restrictions associated with the replacement of the failed units, the backup only in the group, to which they relate, has further restrictions, reflecting the real working conditions and organizational and structural principles of the technical systems associated with the external backup units intended to replace the failed the main functional units in the corresponding group of the units in the process of a conflict. The aim of these restrictions is to ensure that the reasons to connect the redundant power in the relevant group are not less than certain constructive and technical features of the system, the number of the main units arranged in a row, failed in the process of a conflict in this group. The model also takes into account the reliability of the system of the final control over the technical system and connection of the redundant power instead of the failed one during a conflict. Due to its behavior involved in a conflict situation, the technical system is described by a system of differential equations with the variable in time coefficients, while the study of this system by analytical methods is not possible. Therefore, in this paper the authors propose a method of approximate calculation of the average lifetime of a technical system involved in a conflict, allowing numerical methods to determine the optimal structure parameters of the technical system, which ensures maximization of its average lifetime in the process of a conflict.

Keywords: mathematical model, conflict situation; technical system; average lifetime, approximate calculation

For citation:

Potapov V. I. A New Mathematical Model of the Hardware-Redundant Technical Systems, Involved in the Conflict Situation, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 6, pp. 363–367.

DOI: 10.17587/mau.17.363-367

References

1. **Potapov V. I., Bratcev S. G.** *Novye zadachi optimizatsii rezervirovannykh sistem* (New optimization problem of the redundant systems), Irkutsk, Publishing house of Irkut. University, 1986, 112 p. (in Russian).

2. **Nartov B. K.** Conflict of Moving Systems, AMSE Press, France, 1994, 87 p.

3. **Nartov B. K., Bratcev S. G., Murzin F. A., Puntus A. A.** *Konflikt slozhnykh sistem. Modeli i upravlenie* (Conflict of complex systems. Models and management), Moscow, Publishing house of MAI, 1995, 120 p. (in Russian).

4. **Nartov B. K.** *Upravlenie podvizhnymi ob"ektami. Formalizatsiya i modeli* (Management of mobile objects. Formalization and models), Omsk, Publishing house of OmGU, 2002, 83 p. (in Russian).

5. **Lefevr V. A.** *Konfliktuyushchie struktury* (Conflicting structures), Moscow, Sov. radio, 1973, 159 p. (in Russian).

6. **Potapov V. I.** *Model' i algoritm chislennogo resheniya zadachi protivoborstva dvuh izbytochnykh, vosstanavlivaemykh posle otkazov tekhnicheskikh sistem* (Model and algorithm of numerical solution of the problem of confrontation between two redundant, recoverable after failure of technical systems), *Problemy Upravleniya i Informatiki*, 2015, no. 4, pp. 70–78 (in Russian).

7. **Potapov V. I.** *Matematicheskaya model' i algoritm optimal'nogo upravleniya podvizhnym ob"ektom v konfliktnoy situatsii* (Mathematical

model and algorithm of optimal control of a movable object in a conflict situation), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 7, pp. 16–22 (in Russian).

8. **Potapov V. I.** *Zadachi i chislennyye algoritmy optimizatsii nadezhnosti apparatno-izbytochnoy tekhnicheskoy sistemy v konfliktnoy situatsii pri razlichnykh strategiyyakh zashchity ot atak protivnika* (Tasks and numerical algorithms of optimization of reliability of a hardware-redundant technical systems in a conflict situation in different strategies of protection from the attacks of the enemy), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 9, pp. 617–624 (in Russian).

9. **Potapov V. I.** Model and Numerical Solving Algorithm of Counteraction Problem for Two Restored after Failure Redundant Engineering Systems, *Journal of Automation and Information Sciences*, 2015, vol. 47, p. 41–51.

10. **Potapov V. I.** *Protivoborstvo tekhnicheskikh sistem v konfliktnykh situatsiyah: modeli i algoritmy* (Confrontation of technical systems in conflict situations: models and algorithms), Omsk, Publishing house of OmGTU, 2015, 168 p. (in Russian).

11. **Venttsel' E. S.** *Issledovanie operatsiy* (Operations Research), Moscow, Sov. radio, 1972, 550 p. (in Russian).

12. **Kozlov B. A., Ushakov I. A.** *Spravochnik po raschetu nadezhnosti apparatury radioelektroniki i avtomatiki* (Handbook of reliability calculation apparatus of radio electronics and automatics), Moscow, Sov. radio, 1975, 472 p. (in Russian).

13. **Riordan Dzh.** *Vvedenie v kombinatornyy analiz* (Introduction to combinatorial analysis), Moscow, Izdatelstvo inostrannoi literatury, 1963, 287 p. (in Russian).

14. **Holl M.** *Kombinatorika* (Combinatorics), Moscow, Mir, 1970, 424 p. (in Russian).

15. **Sachkov V. N.** *Kombinatornye metody diskretnoy matematiki* (Combinatorial methods of discrete mathematics), Moscow, Nauka, 1978, 486 p. (in Russian).

В. С. Щербаков, д-р техн. наук, проф., зав. каф., sherbakov_vs@sibadi.org,

М. С. Корытов, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры, kms142@mail.ru,

Е. О. Шершнева, аспирант, wolf_eo@sibadi.org,

Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ), г. Омск

Активный способ гашения колебаний груза после остановки мостового крана

Разработан активный способ гашения остаточных маятниковых колебаний груза после остановки мостового крана путем перемещений точки подвеса груза с помощью гидроцилиндров. Разработанный способ позволяет обеспечить сокращение времени остаточных маятниковых колебаний груза. В результате повышается производительность крана.

Ключевые слова: мостовой кран, ПИД регулирование, скорость, перемещение, груз, гашение колебаний, привод

Введение

Необходимым условием повышения производительности кранов мостового типа (МК) является уменьшение остаточных маятниковых колебаний груза после его перемещения в целевую конечную позицию. Время завершения колебаний груза при отсутствии их гашения может составлять до 20 % от времени цикла МК [1–6].

Формулировка проблемы

Для приводов релейного типа, которыми оснащено большинство используемых в настоящее время МК, целесообразно при сохранении минимального числа включений и выключений обеспечить полное гашение остаточных колебаний груза, поскольку дополнительные пуски электродвигателей привода приводят к появлению больших пусковых токов, уменьшают срок службы электродвигателей [7].

Для этого может быть применена остановка МК с помощью уже имеющегося привода или его торможение в строго определенные периоды времени, однозначно согласованные с фазой колебаний груза в момент торможения [2, 3].

Однако подобный подход обеспечивает устранение колебаний груза с одновременной остановкой точки подвеса только в определенные моменты времени и, соответственно, только в определенных дискретных точках пространства, отстоящих друг от друга на значительные расстояния. В противном случае, т. е. при остановке точки подвеса груза во всех других точках пространства, будут возникать остаточные колебания груза.

Описание метода решения задачи исследования

Для гашения колебаний предлагается использовать гидравлический привод. Усовершенствование конструкции МК выполнено с помощью двух гидроцилиндров, расположенных перпендикулярно в горизонтальной плоскости (рис. 1, точка O_4) [8–10].

Согласно данным Ф. К. Иванченко и др. [11] для исследуемого в настоящей работе МК общего назначения номинальной грузоподъемностью 12,5 т с электроприводами, имеющими релейное управление, будут иметь место значения ускорений при разгоне и торможении моста и грузовой тележки, представленные в таблице.

Максимальные скорости установившегося движения моста и грузовой тележки исследуемого МК составляют: для моста $v_{\text{мост max}} = 1,5$ м/с; для грузовой тележки $v_{\text{тел max}} = 0,7$ м/с [11].

Была сформулирована задача гашения остаточных колебаний груза на гибком канатном подвесе

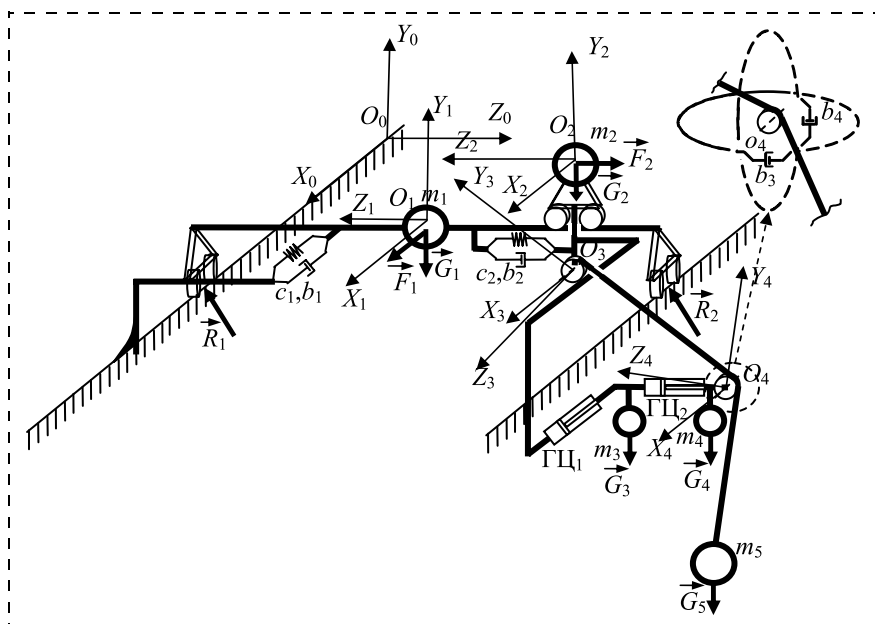


Рис. 1. Расчетная схема мостового крана с двумя гидроцилиндрами перемещения точки подвеса груза

Расчетные значения ускорений разгона и торможения моста и грузовой тележки исследуемого мостового крана

Параметры	Значения			
$m_{гр}$, кг	0	3125	6250	12 500
$a_{мост\ разг}$, м/с ²	0,4	0,36	0,32	0,25
$a_{мост\ торм}$, м/с ²	0,75	0,66	0,595	0,5
$a_{тел\ разг}$, м/с ²	0,54	0,34	0,23	0,1
$a_{тел\ торм}$, м/с ²	0,67	0,45	0,35	0,25

в одной из вертикальных плоскостей трехмерного пространства после полной остановки моста (либо, как вариант, основной грузовой тележки) МК. Пространственные колебания груза при малых углах отклонений грузового каната от гравитационной вертикали могут быть представлены как суперпозиция колебаний в двух взаимно перпендикулярных вертикальных плоскостях. Поэтому разработанный способ гашения может быть применен и для пространственных остаточных колебаний небольшой амплитуды.

Остаточные колебания в начальный момент времени являются одновременно колебаниями груза в конечный момент полной остановки моста (основной грузовой тележки) МК после окончания его движения к целевой точке.

Исходными численными данными для поставленной задачи выступают: масса перемещаемого груза $m_{гр}$, кг; длина грузового каната от точки подвеса каната (роликов, приводимых в движение гидроцилиндрами) до центра масс груза l , м; коэффициент демпфирования по угловой координате b_r , Н · м/(рад/с); начальное значение угла отклонения грузового каната от гравитационной вертикали q_0 , °; начальное значение скорости изменения угла отклонения грузового каната $\dot{q}_0$, °/с.

При проведении вычислительных экспериментов по гашению остаточных колебаний груза были приняты следующие дополнительные допущения: 1) распределение фазы остаточных колебаний относительно момента полной остановки точки подвеса имеет равномерный случайный характер; 2) направляющие ролики устройства гашения дополнительной тележки (точка подвеса груза) в момент остановки моста (основной грузовой тележки) МК находятся в срединном положении по запасу хода штока гидроцилиндра устройства гашения (координата $x = 0$); 3) при достижении поршнем гидроцилиндра жестких упоров (ограничителей хода) в его крайних положениях происходит скачкообразное торможение поршня и точки подвеса до нулевой скорости; 4) масса груза сосредоточена в одной точке; 5) грузовой канат описан абсолютно жестким нерастяжимым стержнем; 6) длина подвеса при гашении колебаний постоянна; 7) активное га-

шение колебаний с помощью гидроцилиндров начинается в момент достижения максимального угла отклонения каната от вертикали q_{max} , ближайший к моменту полной остановки моста (основной грузовой тележки).

Последнее допущение обусловлено тем, что предварительные исследования показали: активное гашение остаточных колебаний, начатое с того момента, когда угол каната достигнет q_{max} , позволяет сократить время гашения колебаний при одновременном уменьшении остаточного смещения нижней точки подвеса (роликов) после гашения относительно среднего (первоначального) положения.

Допущения № 1 и № 7 вызывают увеличение времени цикла МК на незначительную величину, в среднем всего на 1...1,75 с.

Увеличение времени цикла на 1...1,75 с, учитывая среднюю продолжительность цикла МК в несколько сотен секунд (ориентировочно 200...500 с, зависит от конкретных условий эксплуатации) и одновременное сокращение времени цикла за счет гашения остаточных колебаний, которые занимают около 20 % цикла, принято допустимым и несущественным.

Масса груза принимала фиксированное значение $m_{гр} = 100$ кг (масса крюковой обоймы без полезного груза). Данный параметр имел наиболее неблагоприятное значение с позиции максимальных ускорений разгона и торможения, вызывающих остаточные колебания с максимальной амплитудой (см. таблицу).

Дополнительными исследованиями было установлено, что изменение массы перемещаемого груза при одних и тех же значениях длины подвеса l само по себе не оказывает влияния на период колебаний, амплитуду и декремент затухания колебаний, т. е. на геометрические показатели колебательного процесса, при условии, что коэффициент демпфирования по угловой координате b_r при этом также изменяется пропорционально массе груза:

$$b_r = k_b m_{гр},$$

где k_b — коэффициент пропорциональности.

Влияние на геометрические показатели колебательного процесса имеет лишь значение коэффициента пропорциональности k_b .

Данный коэффициент оказывает существенное влияние на время гашения остаточных колебаний $t_{кон. кол}$ (рис. 2).

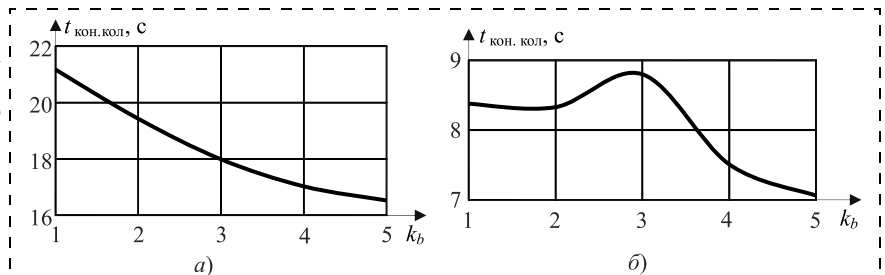


Рис. 2. Зависимости времени гашения остаточных колебаний $t_{кон. кол}$ от значений коэффициента пропорциональности k_b (примеры)

На рис. 2, а приведена зависимость $t_{\text{кон. кол}}$ от k_b при длине грузового каната $l = 12$ м, амплитуде отклонения каната $q_{\text{max}} = 20^\circ$, максимальном ускорении штока гидроцилиндра $a_{\text{п max}} = 1,5$ м/с², максимальной скорости штока гидроцилиндра $v_{\text{п max}} = 1,5$ м/с, максимальном ходе штока гидроцилиндра $l_{\text{п max}} = 1,5$ м. На рис. 2, б приведена аналогичная зависимость при длине грузового каната $l = 4$ м, амплитуде отклонения каната $q_{\text{max}} = 4^\circ$, максимальном ускорении штока гидроцилиндра $a_{\text{п max}} = 0,5$ м/с², максимальной скорости штока гидроцилиндра $v_{\text{п max}} = 0,5$ м/с, максимальном ходе штока гидроцилиндра $l_{\text{п max}} = 0,5$ м. В среднем при увеличении k_b диссипация энергии в системе возрастает, поэтому время гашения колебаний уменьшается, хотя и не всегда монотонно (рис. 2, б).

По результатам натурных наблюдений за работой различных МК было установлено, что значение k_b находится в пределах $k_b \in [0,5; 5]$.

При проведении вычислительного эксперимента по гашению остаточных колебаний груза значение коэффициента k_b было заморожено и принимало фиксированное значение $k_b = 1$.

Описание способа гашения остаточных колебаний груза

Способ гашения остаточных колебаний груза [10] заключается в синтезе с помощью имитационной модели МК с ПИД регулятором функции ускорения перемещения точки подвеса вдоль оси X_0 .

Расчетная схема механизма гашения остаточных колебаний груза в одной плоскости приведена на рис. 3. Данная расчетная схема является фрагментом пространственной расчетной схемы МК с двумя тележками (см. рис. 1). Упрощение заключается в том, что мост и основная тележка полностью неподвижны и считаются присоединенными к звену стойки. Рассматривается перемещение только одного гидроцилиндра с одной дополнительной тележкой.

Масса штока гидроцилиндра с приведенной к штоку массой дополнительной тележки обозначена $m_{\text{п}}$. На движение точки подвеса (штока гидроцилиндра с приведенной массой $m_{\text{п}}$) наложены ограничения в виде характеристик гидропривода: максимального развиваемого штоком ускорения $a_{\text{п max}}$, максимальной развиваемой скорости $v_{\text{п max}}$

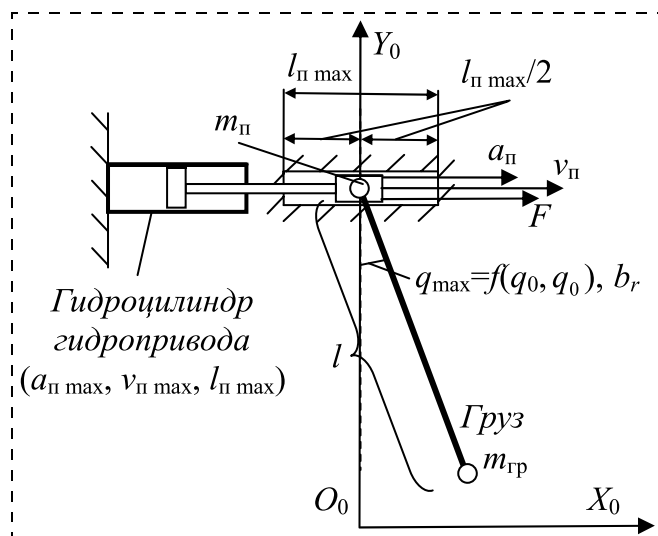


Рис. 3. Расчетная схема механизма гашения остаточных колебаний груза в одной плоскости

и максимального хода штока $l_{\text{п max}}$. На гидроцилиндр воздействует осевая сила сопротивления F .

Согласно предложенной схеме связей (рис. 4), с использованием блоков пакета математического моделирования механических систем SimMechanics Second Generation MATLAB была разработана модель механической системы мостового крана с ПИД регулятором, позволяющая изучать различные режимы гашения остаточных колебаний груза на стадии проектирования МК (рис. 5) [12–14].

В качестве основных варьируемых параметров при проведении вычислительного эксперимента могут выступать:

- 1) длина грузового каната (подвеса груза) от осей роликов, приводимых в движение штоком гидроцилиндра, до центра масс груза l , м;
- 2) максимальное отклонение (амплитуда остаточных колебаний) грузового каната МК от вертикали после полной остановки моста (основной грузовой тележки) q_{max} , °;
- 3) максимальное развиваемое ускорение штока гидроцилиндра вспомогательной тележки $a_{\text{п max}}$, м/с²;
- 4) максимальная развиваемая скорость штока гидроцилиндра вспомогательной тележки $v_{\text{п max}}$, м/с;
- 5) максимальный ход штока гидроцилиндра вспомогательной тележки $l_{\text{п max}}$, м.

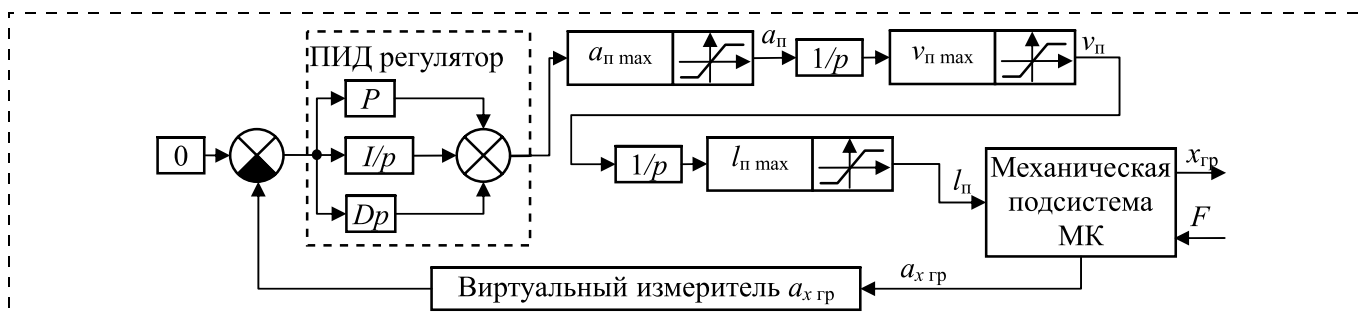


Рис. 4. Схема связей модели механической подсистемы мостового крана с ПИД регулятором для гашения остаточных колебаний груза с помощью гидропривода

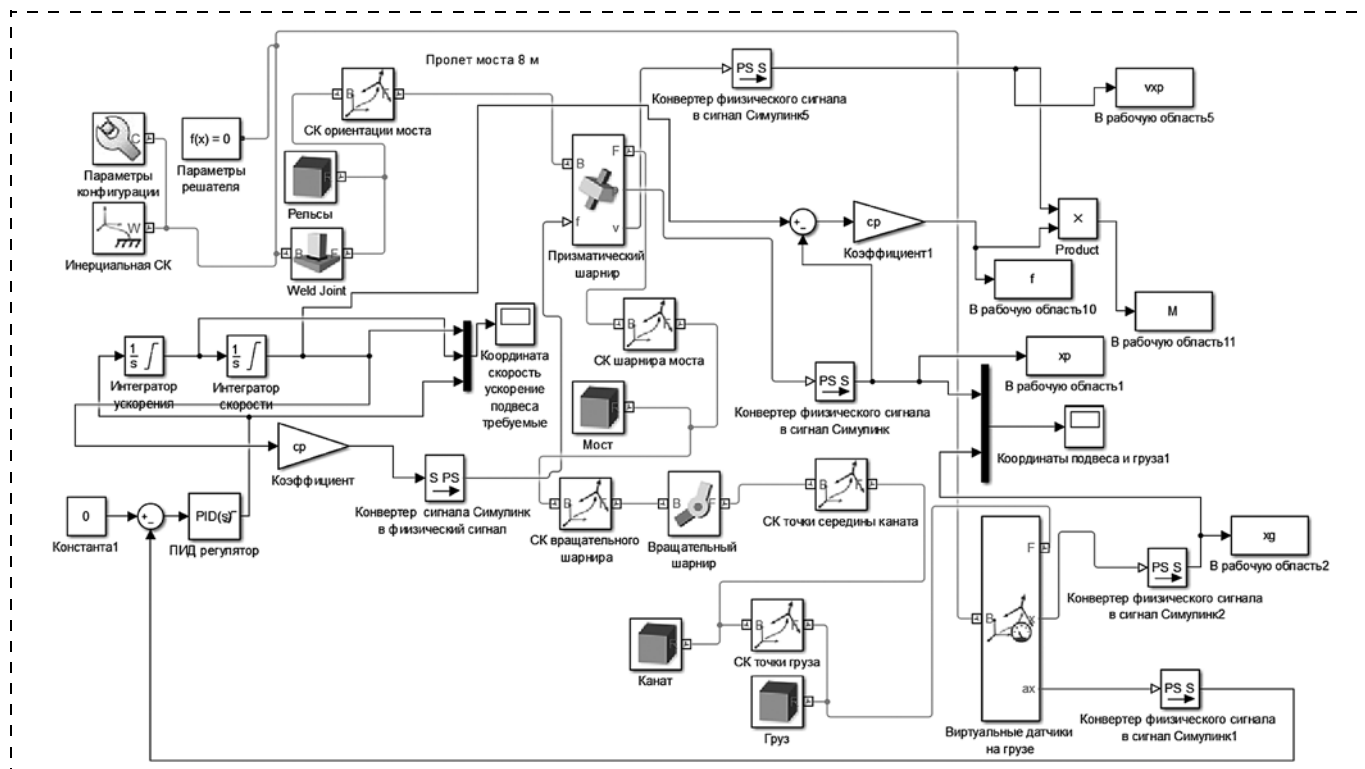


Рис. 5. Имитационная модель процесса гашения остаточных колебаний груза мостового крана с ПИД регулятором в обозначениях SimMechanics Second Generation и Simulink

Средняя продолжительность моделирования процесса гашения колебаний (получения одного отклика) на ПК средней производительности (AMD Athlon 64 X2 Dual Core Processor 5600+ 2.90 GHz) составила около 10 с.

Для группы параметров МК и его системы управления в эксперименте по гашению остаточных колебаний груза были приняты фиксированные значения:

- 1) масса груза $m_{гр} = 100$ кг;
- 2) масса штока гидроцилиндра с приведенной к штоку массой дополнительной тележки $m_{п} = 100$ кг;
- 3) коэффициент пропорциональности для вычисления коэффициента демпфирования по угловой координате $k_b = 1$. Связанный с ним коэффициент демпфирования по угловой координате $b_r = k_b m_{гр} = 100$ Н·м/(рад/с);
- 4) параметры ПИД регулятора: пропорциональный коэффициент, интегральная и дифференциальная постоянные времени: $P = 20$; $I = 5$; $D = 5$ соответственно.

Гашение остаточных колебаний груза считалось полностью завершенным в момент времени $t_{кон. кол}$ при выполнении условия необратимого снижения скорости точки подвеса ниже порогового значения 0,01 м/с:

$$v_{п}(t) \leq 0,01 \text{ м/с } \forall t > t_{кон. кол}.$$

Прикладная интерпретация и иллюстрация полученных результатов исследования

В результате выполнения отдельного запуска имитационной модели МК с ПИД регулятором с определенными значениями факторов — переменных l , q_{max} , $a_{п max}$, $v_{п max}$, $l_{п max}$ генерируются временные зависимости перемещения $l_{п}(t)$, скорости $v_{п}(t)$ и ускорения $a_{п}(t)$ точки подвеса, временные зависимости $x_{гр}(t)$ горизонтальной координаты и ускорения $a_{x гр}(t)$ перемещения груза вдоль оси O_0X_0 .

Примеры временных зависимостей $x_{гр}(t)$ и $l_{п}(t)$ для двух различных сочетаний $a_{п max}$, $v_{п max}$, $l_{п max}$ при одних и тех же значениях $l = 12$ м, $q_{max} = 16^\circ$ приведены на рис. 6.

Приведенные примеры показывают, что изменение сочетания значений $a_{п max}$, $v_{п max}$, $l_{п max}$ позволяет гасить одни и те же остаточные колебания с существенно различной эффективностью, выражаемой временем гашения $t_{кон. кол}$. Время гашения при этом может изменяться в несколько раз.

В то же время любой исследованный вариант гашения колебаний, даже самый худший вариант с наибольшим временем, все равно сокращает время колебаний по сравнению с полным отсутствием гашения как минимум в 2...3 раза.

Процесс гашения с использованием разработанного способа в настоящей работе оценивался критерием эффективности — временем гашения остаточных колебаний $t_{кон. кол}$. Целевая функция

$$t_{кон. кол} \rightarrow \min$$

при ограничениях вида

$$a_{\Pi} \leq a_{\Pi \max}; v_{\Pi} \leq v_{\Pi \max}; l_{\Pi} \leq l_{\Pi \max}.$$

Кроме динамических параметров гидропривода разработанная математическая модель позволяет накладывать ограничения на другие параметры, характеризующие процесс гашения колебаний. Например, ограничения могут накладываться: на максимальное усилие на штоке гидроцилиндра; максимальную мощность гидропривода, полную работу гидропривода, остаточное смещение $l_{\Pi.ост}$ штока гидроцилиндра и точки подвеса груза отно-

сительно среднего положения $x_{гр} = 0$. Последний параметр при указанном выше максимальном ограничении хода штока $l_{\Pi \max} = 1,5$ м в самом худшем случае не будет превышать значения $l_{\Pi.ост} = l_{\Pi \max}/2 = 0,75$ м.

Исследования показали, что наибольшее влияние на время гашения $t_{кон. кол}$ оказывают: длина грузового каната l и начальная амплитуда колебаний $q_{\max}$. Этим подтверждается известный физический смысл данных параметров и известный характер их влияния на продолжительность маятниковых колебаний груза.

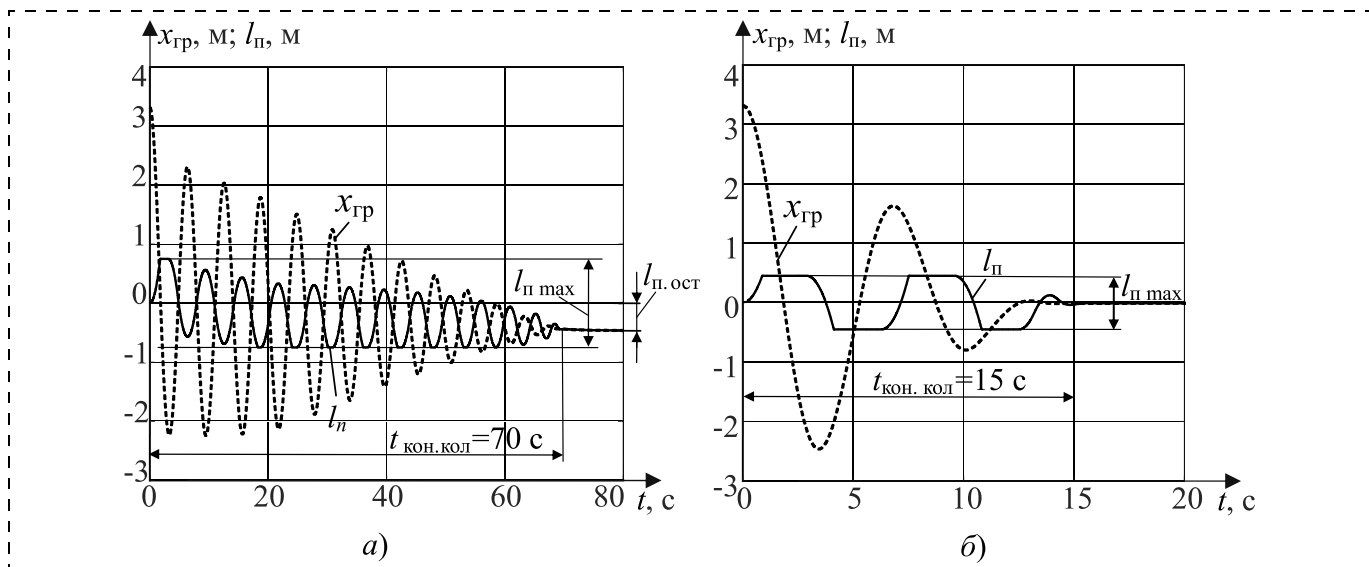


Рис. 6. Временные зависимости перемещений подвеса $l_{\Pi}(t)$ и груза $x_{гр}(t)$ при гашении остаточных колебаний амплитудой $q_{\max} = 16^\circ$ при длине грузового каната $l = 12$ м:

а — при $a_{\Pi \max} = 0,5$ м/с², $v_{\Pi \max} = 0,8$ м/с, $l_{\Pi \max} = 1,5$ м; б — при $a_{\Pi \max} = 1,2$ м/с², $v_{\Pi \max} = 1,4$ м/с, $l_{\Pi \max} = 0,9$ м

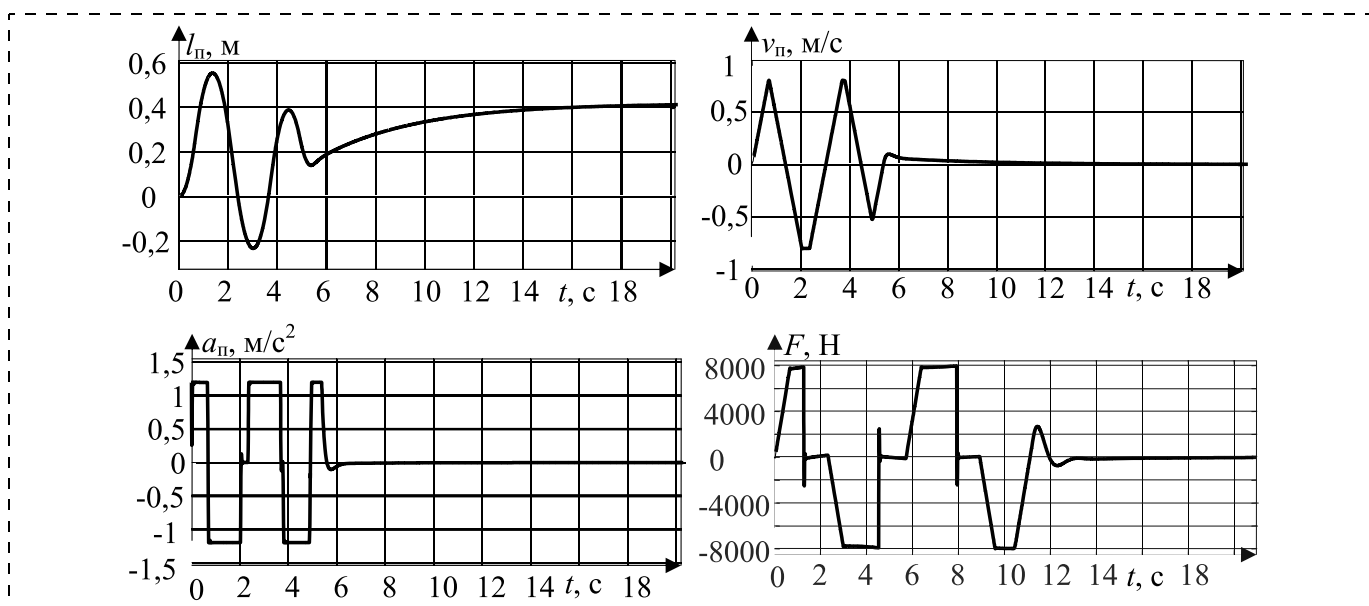


Рис. 7. Временные зависимости перемещения, скорости, ускорения штока гидроцилиндра и силы сопротивления, действующей на шток гидроцилиндра в процессе гашения колебаний с начальными условиями $l = 12$ м, $q_{\max} = 20^\circ$, при значениях динамических параметров гидропривода $a_{\Pi \max} = 1,2$ м/с², $v_{\Pi \max} = 0,8$ м/с, $l_{\Pi \max} = 1,5$ м (пример)

Длина грузового каната l регламентируется технологией работ и расположением места доставки груза. Целесообразно ее уменьшение. Максимальная амплитуда колебаний носит случайный характер.

Из факторов динамических ограничений гидропривода, которые в наибольшей степени поддаются коррекции, самое большое влияние на среднее время гашения колебаний оказывает максимальное ускорение штока: увеличение $a_{п\max}$ в 3 раза (с 0,5 до 1,5 м/с²) вызывает уменьшение времени гашения колебаний в среднем на 38 %.

Для каждого сочетания значений параметров l , $q_{\max}$, характеризующих какие-либо текущие остаточные колебания, с помощью имитационной модели МК с заложенными в нее значениями динамических параметров гидропривода $a_{п\max}$, $v_{п\max}$, $l_{п\max}$ могут быть синтезированы временные зависимости перемещения, скорости и ускорения штока гидроцилиндра, а также силы F , действующей на шток гидроцилиндра в процессе гашения колебаний (рис. 7).

Заключение

Разработанный способ позволяет эффективно гасить остаточные маятниковые колебания груза на гибком канатном подвесе посредством перемещений точки подвеса с помощью гидроцилиндров, обеспечивая сокращение времени остаточных колебаний до 10...25 с, т. е. почти в 10 раз. В результате среднее время цикла мостового крана может быть сокращено не менее чем на 10 %. Разработанный способ целесообразно использовать при модернизации существующих и создании новых мостовых кранов.

Список литературы

1. Щедринов А. В., Сериков С. А., Колмыков В. В. Автоматическая система успокоения колебаний груза для мостового крана // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2007. № 8. С. 13–17.
2. Blackburn D., Singhose W., Kitchen J., Patrangaru V., Lawrence J. Command Shaping for Nonlinear Crane Dynamics // Journal of Vibration and Control. 2010. N. 16. P. 477–501.

3. Толочко О. И. Сравнительный анализ методов гашения колебаний груза, подвешенного к механизму поступательного движения мостового крана // Электромашиностроение и электрооборудование. 2010. № 75. С. 22–28.
4. Omar H. M. Control of gantry and tower cranes: Ph. D. Dissertation. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.
5. Abdel-Rahman E. M., Nayfeh A. H., Masoud Z. N. Dynamics and control of cranes: a review // Journal of Vibration and Control. 2003. N. 9. P. 863–908.
6. Fang Y., Dixon W. E., Dawson D. M., Zergeroglu E. Nonlinear coupling control laws for an underactuated overhead crane system // IEEE/ASME Trans. Mechatronics. 2003. Vol. 8, N. 3. P. 418–423.
7. Москаленко В. В. Электрический привод. М.: Академия, 2007. 368 с.
8. Патент 146374 Российская Федерация, МПК В66С13/04. Мостовой кран / Щербаков В. С., Корытов М. С., Вольф Е. О.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)" (RU); № 2014120325/11; заявл. 20.05.14; опубл. 10.10.14. Бюл. № 28. 2 с.
9. Патент 146002 Российская Федерация, МПК В66С13/04. Мостовой кран / Щербаков В. С., Корытов М. С., Вольф Е. О.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)" (RU); № 2014117419/11; заявл. 29.04.14; опубл. 27.09.14. Бюл. № 27. 2 с.
10. Патент 2564560 Российская Федерация, МПК В66С13/18. Способ повышения точности и скорости перемещения груза по требуемой траектории грузоподъемным краном мостового типа / Щербаков В. С., Корытов М. С., Вольф Е. О.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)" (RU); № 2014118376/11; заявл. 06.05.14; опубл. 10.10.15, Бюл. № 28. 9 с.
11. Иванченко Ф. К. Расчеты грузоподъемных и транспортных машин. Киев: Вища школа, 1978. 576 с.
12. Shcherbakov V., Korytov M., Sukharev R., Volf E. Mathematical modeling of process moving cargo by overhead crane // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 701–702. P. 715–720. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.701-702.715.
13. Shcherbakov V., Korytov M., Volf E., Breus I. The Reduction of Errors of Bridge Crane Loads Movements by Means of Optimization of the Spatial Trajectory Size // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 811. P. 99–103. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.811.99.
14. Korytov M. S., Shcherbakov V. S., Volf E. O. Impact sigmoidal cargo movement paths on the efficiency of bridge cranes // International Journal of Mechanics and Control. 2015. Vol. 16, N. 02. P. 3–8.

Active Way of Clearing of Fluctuations of Freight after a Stop of the Bridge Crane

V. S. Scherbakov, sherbakov_vs@sibadi.org, M. S. Korytov, kms142@mail.ru, E. O. Shershneva, wolf_eo@sibadi.org,
Siberian State Automobile and Road Academy (SIBADI), Omsk, 644092, Russian Federation

Corresponding author: Korytov Mikhail S., D. Sc., Associate Professor, Professor of the department "Cars, Constructional Materials and Technologies", Siberian State Automobile and Road Academy (SIBADI), Omsk, 644092, Russian Federation, e-mail: kms142@mail.ru

Received on February 02, 2016

Accepted on February 12, 2016

Necessary condition of increase of productivity of cranes of bridge type is reduction of residual pendular fluctuations of freight on a flexible rope suspension after its moving to a target final position. For clearing of residual fluctuations of freight it is offered to use the hydraulic drive. Improvement of a design is executed by means of two hydraulic cylinders located perpendicularly in the horizontal plane. The problem of clearing of residual fluctuations of freight on a flexible rope suspension in one of the vertical planes of three-dimensional space after a full stop of the bridge was formulated (or as version of the main cargo cart) the bridge crane. Spatial fluctuations of freight at small corners of deviations of a cargo rope from a gravitational vertical can be presented as superposition of fluctuations in two mutually perpendicular vertical planes. Therefore the developed active way of clearing can be applied also to spatial residual fluctuations of small amplitude. The active way of clearing of residual fluctuations of freight consists in synthesis by means of imitating model of the bridge crane with proportional-integral-differential the regulator of function of acceleration of movement of a point of a suspension along a horizontal axis. On the movement of a point of a suspension, i.e. hydraulic cylinder rod with the specified weight, restrictions in the form of characteristics of a hydraulic actuator are imposed: the maximum acceleration developed by a rod, the maximum gathered speed, and the maximum course of a rod. The hydraulic cylinder is influenced by the axial force of resistance. According to the offered scheme of communications, with use of blocks of a package of mathematical modeling of the mechanical SimMechanics Second Generation MATLAB systems, the model of mechanical system of the bridge crane with proportional-integral-differential regulation, allowing to study various modes of clearing of residual fluctuations of freight at a design stage of the bridge crane was developed. The developed way allows to provide reduction of time of residual pendular fluctuations of freight. As a result crane productivity increases.

Keywords: bridge crane, PID-regulation, speed, movement, freight, clearing of fluctuations, drive

For citation:

Scherbakov V. S., Korytov M. S., Shershneva E. O. Active Way of Clearing of Fluctuations of Freight after a Stop of the Bridge Crane, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 6, pp. 368—374.

DOI: 10.17587/mau.17.368-374

References

1. **Shhedrinov A. V., Serikov S. A., Kolmykov V. V.** *Avtomaticheskaja sistema uspokoenija kolebanij gruza dlja mostovogo krana* (Automatic soothing vibrations of the bridge crane to load), *Pribory i Sistemy. Upravlenie, Kontrol', Diagnostika*, 2007, no. 8, pp. 13—17 (in Russian).
2. **Blackburn D., Singhose W., Kitchen J., Patrangenu V., Lawrence J.** Command Shaping for Nonlinear Crane Dynamics, *Journal of Vibration and Control*, 2010, no. 16, pp. 477—501.
3. **Tolochko O. I., Bazhutin D. V.** *Sravnitel'nyj analiz metodov gashenija kolebanij gruza, podveshennogo k mehanizmu postupatel'nogo dvizhenija mostovogo krana* (A comparative analysis of methods of damping cargo-being revisited under the mechanism of translational motion of overhead crane), *Jelektromashinostroyenie i Jelektrooborudovanie*, 2010, no. 75, pp. 22—28 (in Russian).
4. **Omar H. M.** Control of gantry and tower cranes: Ph. D. Dissertation, Blacksburg, Virginia, Publishing house of Polytechnic Institute and State University, 2003.
5. **Abdel-Rahman E. M., Nayfeh A. H., Masoud Z. N.** Dynamics and control of cranes: a review, *Journal of Vibration and Control*, 2003, no. 9, pp. 863—908.
6. **Fang Y., Dixon W. E., Dawson D. M., Zergeroglu E.** Nonlinear coupling control laws for an underactuated overhead crane system, *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, 2003, vol. 8, no. 3, pp. 418—423.
7. **Moskalenko V. V.** *Jelektricheskij privod* (Electric drive), Moscow, Akademija, 2007, 368 p. (in Russian).
8. **Patent** 146374 Rossijskaja Federacija, MPK B66C13/04. Mostovoj kran / Shherbakov V. S., Korytov M. S., Vol'f E. O.; zavitel' i patentoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovanija "Sibirskaja gosudarstvennaja avtomobil'no-dorozhnaja akademija (SibADI)" (RU); № 2014120325/11; zajavl. 20.05.14; opubl. 10.10.14. Bjul. № 28. 2 p. (Patent 146374 Russian Federation, B66C13/04. B. C. bridge crane / Scherbakov, Korytov M. S., Wolf E. O.; applicant and patent holder Federal public budgetary educational institution of higher education "Siberian state automobile and road academy (SIBADI)" (RU); No. 2014120325/11; 20.05.14 is declared; 10.10.14 is published. Byullyuten No. 28. 2 p.)
9. **Patent** 146002 Rossijskaja Federacija, MPK B66C13/04. Mostovoj kran / Shherbakov V. S., Korytov M. S., Vol'f E. O.; zavitel' i patentoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovanija "Sibirskaja gosudarstvennaja avtomobil'no-dorozhnaja akademija (SibADI)" (RU); № 2014117419/11; zajavl. 29.04.14; opubl. 27.09.14. Bjul. № 27. 2 p. (Patent 146002 Russian Federation, B66C13/04. B.C. bridge crane / Scherbakov, Korytov M. S., Wolf E. O.; applicant and patent holder Federal public budgetary educational institution of higher education "Siberian state automobile and road academy (SIBADI)" (RU); No. 2014117419/11; 29.04.14 is declared; 27.09.14 is published. Bulletin No. 27. 2 p.)
10. **Patent** 2564560 Rossijskaja Federacija, MPK B66C 13/18. Spособ povyshenija tochnosti i skorosti peremeshhenija gruza po trebuemoj traektorii gruzopod'emnym kranom mostovogo tipa / Shherbakov V. S., Korytov M. S., Vol'f E. O.; zavitel' i patentoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovanija "Sibirskaja gosudarstvennaja avtomobil'no-dorozhnaja akademija (SibADI)" (RU); № 2014118376/11; zajavl. 06.05.14; opubl. 10.10.15. Bjul. № 28. 9 p. (Patent 2564560 Russian Federation, B66C 13/18. A way of increase of accuracy and speed of movement of freight on the required trajectory the load-lifting crane of bridge type / Scherbakov V. S., Korytov M. S., Wolf E. O.; applicant and patent holder Federal public budgetary educational institution of higher education "Siberian state automobile and road academy (SIBADI)" (RU); No. 2014118376/11; 06.05.14 is declared; it is published 10.10.15, the Bulletin No. 28. 9 p.)
11. **Ivanchenko F. K.** *Raschety gruzopod'emnyh i transportirujushih mashin* (Calculations of the load-lifting and transporting cars), Kiev, Vishha shkola, 1978, 576 p. (in Ukrainian).
12. **Shcherbakov V., Korytov M., Sukharev R., Volf E.** Mathematical modeling of process moving cargo by overhead crane, *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 701—702, pp. 715—720. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.701—702.715.
13. **Shcherbakov V., Korytov M., Volf E., Breus I.** The Reduction of Errors of Bridge Crane Loads Movments by Means of Optimization of the Spatial Trajectory Size, *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 811, pp. 99—103. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.811.99.
14. **Korytov M. S., Shcherbakov V. S., Volf E. O.** Impact sigmoidal cargo movement paths on the efficiency of bridge cranes, *International Journal of Mechanics and Control*, 2015, vol. 16, no. 02, pp. 3—8.

О. С. Колосов, д-р техн. наук, проф., KolosovOS@mpei.ru,
Д. Н. Анисимов, канд. техн. наук, доц., Д. В. Хрипков, аспирант,
Национальный исследовательский университет "МЭИ"

Формирование структуры и состава многоуровневых нечетких диагностических систем с использованием стохастической модели¹

Проводится анализ эффективности работы многоуровневых диагностических систем без ограничений на размерность (число неисправностей или патологий) и число признаков. Системы базируются на нечетком логическом выводе. Исследования проводятся с применением стохастической модели объекта. Показывается, что многоуровневые диагностические системы во многих практических случаях имеют более высокую эффективность по сравнению с диагностическими системами полной размерности. Предлагается методика формирования структуры и состава многоуровневых диагностических систем.

Ключевые слова: нечеткая логика, многоуровневая диагностическая система, методика построения, диагностическая подсистема нижнего уровня, стохастическая модель диагностируемого объекта

Введение

Появление диагностических систем (ДС) динамических объектов сложной структуры, базирующихся на "мягких вычислениях" [1–4], связано, в первую очередь, с относительно большим числом возможных развивающихся неисправностей (патологий) в этих объектах (далее по тексту будем отождествлять понятия "неисправность" и "патология"). При этом число признаков неисправностей для проведения диагностики часто оказывается ограниченным, а области значений этих признаков для разных патологий оказываются пересекающимися. К таким объектам могут быть отнесены объекты различной природы: технические, химические, биологические и т. д. Весьма распространенной ситуацией для подобных объектов является отсутствие достаточных статистических выборок значений признаков патологий для успешного применения статистических методов диагностики.

Построение ДС на базе "мягких вычислений" обычно реализуется одним из двух возможных способов. Первый ориентируется на построение ДС конкретных патологий [3, 4], а второй нацелен на выявление наиболее возможной патологии из всех возможных [5, 6]. Оба названных подхода не свободны от недостатков. В частности, для ДС, ориентированных на выявление конкретных патологий, отсутствуют подходы по сравнительному анализу эффективности таких систем при их "работе" по одним и тем же признакам, но для других патологий. Для ДС, работающих по всем имеющимся признакам и оценивающим наиболее возможную патологию из всех возможных, характерны плохо различимые диагнозы. Подобная ситуация рассматривается в работе [5] для системы диагностики патологий сетчатки глаза. Названные недостатки ДС, построенных на "мягких вычислениях", удается до некоторой степени нивелировать путем построе-

ния многоуровневых (иерархических) ДС на базе нечеткого логического вывода [6, 7], в которых первый (нижний) уровень системы образуют подсистемы, ориентированные на выявление конкретных патологий, а на верхних уровнях проводится обработка результатов диагностики подсистем нижнего уровня в целях установления наиболее значимого диагноза. Фактически многоуровневые ДС призваны аккумулировать в себе оба названных выше подхода к построению ДС, основанных на "мягких вычислениях". Вместе с тем, в работе [5] не раскрываются как механизмы формирования самих подсистем нижнего уровня, так и логические построения верхних уровней, которые призваны повысить эффективность работы всей многоуровневой ДС.

Постановка задачи

В данной работе обсуждаются вопросы структурного построения и функционального состава многоуровневых ДС, базирующихся на нечетком логическом выводе. При этом не накладываются ограничения на размерность системы (число диагностируемых патологий) и на возможное число используемых признаков для диагностики. В качестве инструмента, обеспечивающего поиск приемлемой структуры ДС и функционального построения отдельных ее уровней, используется стохастическая модель диагностируемого объекта. Модель осуществляет генерирование случайным образом значений признаков с заданными математическими ожиданиями (МО) и среднеквадратическими отклонениями (СКО) для соответствующих видов патологий объекта диагностики. В работе предлагается методика построения многоуровневых ДС в виде последовательности шагов (действий) по построению соответствующих уровней диагностики, начиная с первого. При этом в самом начале на первом шаге решается принципиальный вопрос о целесообразности построения многоуровневой (иерархической) ДС. Ключевую роль здесь играет взаимное сопоставление множеств значений признаков для соответствующих патологий.

¹ Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ (проект 16-01-00054а).

Структура многоуровневой ДС

Структура многоуровневой ДС показана на рис. 1.

Здесь нижний (первый) уровень образуют подсистемы диагностики (Π_i), построенные на основе нечеткого логического вывода с использованием всех возможных сочетаний формализованных признаков патологий из всех, имеющихся в наличии. На втором уровне ДС подсистемы нижнего уровня группируются в блоки (C_j), предназначенные на выявление конкретной патологии. Число таких блоков на втором уровне не превышает числа диагностируемых патологий. При этом часть подсистем нижнего уровня могут оказаться малоинформативными и не используются в блоках второго уровня. На верхнем (третьем) уровне ДС проводится сравнительный анализ работы блоков второго уровня диагностики конкретного объекта в целях выработки окончательного диагноза или выстраивания степеней соответствия возможных патологий для принятия окончательного решения.

Подсистемы нижнего уровня ДС

Подсистемы базируются на нечетком логическом выводе. Текущее техническое состояние объекта оценивается совокупностью определенных значений формализованных признаков, например, температуры нагрева, амплитуды вибрации при работе и т. д. Однако числовые значения этих признаков для одной патологии могут иметь различные значения, но в определенном диапазоне. Каждый признак патологии имеет свою область значений, а взаимное распределение этих областей для одного признака может иметь виды, показанные на рис. 2.

Дуги над областями значений параметра на рис. 2 не несут никакой количественной меры, а предназначены только для более наглядного пояснения текстового материала. Вариант, показанный на рис. 2, а, где области значений признака для разных патологий не пересекаются, является тривиальным. Для диагностики такого случая достаточно определить, в какой части находится значение признака. В варианте на рис. 2, б области значений признака пересекаются незначительно, и поэтому можно проводить диагностику аналогично варианту на рис. 2, а, однако в данном случае есть некоторая вероятность ошибочного диагноза. Вариант на рис. 2, в отличается от варианта на рис. 2, б большей областью пересечения, поэтому простейшая диагностика только по одному данному признаку вызывает большое число ошибочных диагнозов. В варианте на рис. 2, г области значений признака для разных патологий совпадают, и такой признак является неинформативным для ДС. В варианте на рис. 2, д одна область перекрывает другую, и здесь можно диагностировать отсутствие патологии N_2 , если значение признака находится не в централь-

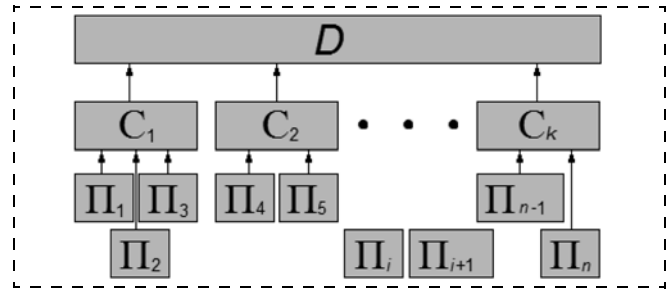


Рис. 1. Структура многоуровневой ДС

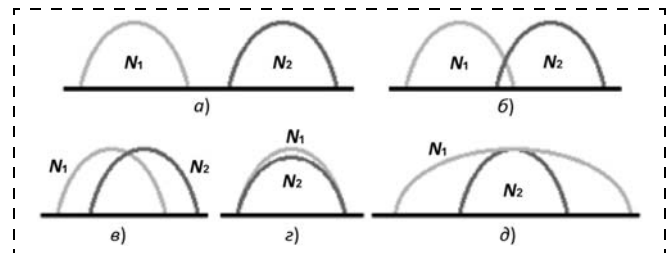


Рис. 2. Варианты взаимного распределения областей значений регистрируемого признака P_A для двух патологий N_1 и N_2

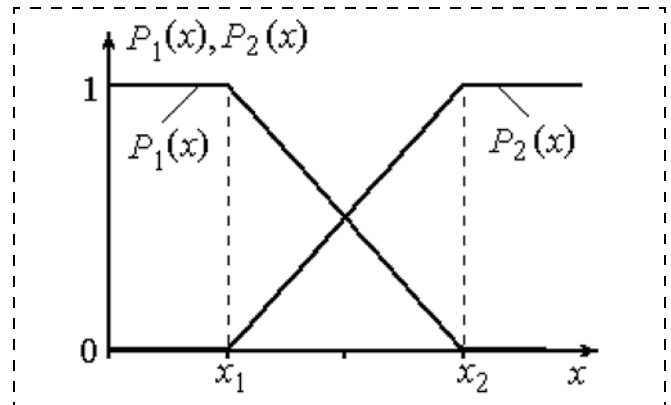


Рис. 3. Вид функции принадлежности с линейными термами

ной части. В противном случае, вариант на рис. 2, д аналогичен варианту на рис. 2, г.

Диагностика сложных динамических объектов во многих случаях связана с областями значений признаков патологий, подобными, показанным на рис. 2, в и рис. 2, д. Поскольку патологии в этих случаях нецелесообразно диагностировать простой логикой, то необходимо привлекать дополнительные признаки и использовать методы "мягких вычислений" для построения ДС. В данном случае наиболее подходящим представляется метод нечеткой логики, где оценивается степень принадлежности каждого признака к определенной патологии. Было показано [1], что наилучшие результаты дают ДС, использующие максиминный базис и линейную форму термов функций принадлежности, показанные на рис. 3. Линейная форма термов как бы подчеркивает равномерное распределение возможных значений признака патологии внутри заданного диапазона.

Линейные термы:

$$\begin{cases} P_1(x) = 1, x \leq x_1; \\ P_1(x) = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}, x_1 < x < x_2; \\ P_1(x) = 0, x \geq x_2; \\ P_2(x) = 0, x \leq x_1; \\ P_2(x) = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}, x_1 < x < x_2; \\ P_2(x) = 1, x \geq x_2. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь x_1 и x_2 — МО значений признака A или B соответственно для патологий N_1 и N_2 ; x — значения признаков A или B .

Максиминный метод (базис) заключается в выборе лучшего результата среди термов, привязанных к патологии. Пусть есть две патологии и два признака, и значения этих признаков распределяются одинаково, как показано на рис. 4.

Для первой патологии используются термы $P_1(A)$ и $P_1(B)$, для второй — $P_2(A)$ и $P_2(B)$. Таким образом, получаем степень принадлежности пато-

логии $P(N_1)$ и $P(N_2)$, и патология с большей степенью принадлежности считается верной.

Ранее данный метод был использован [6] при построении ДС патологий сетчатки глаза. Разрабатываемая ДС призвана диагностировать пять патологий по девяти признакам. Области значений признаков патологий сетчатки глаза показаны на рис. 5, где по оси абсцисс для каждого признака отклады-

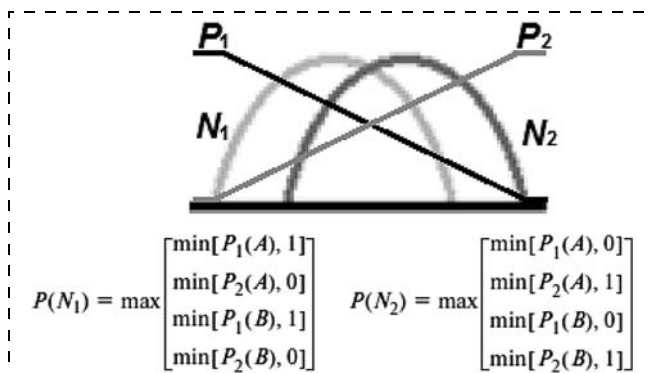


Рис. 4. Пример оценки степени принадлежности с применением максиминного базиса

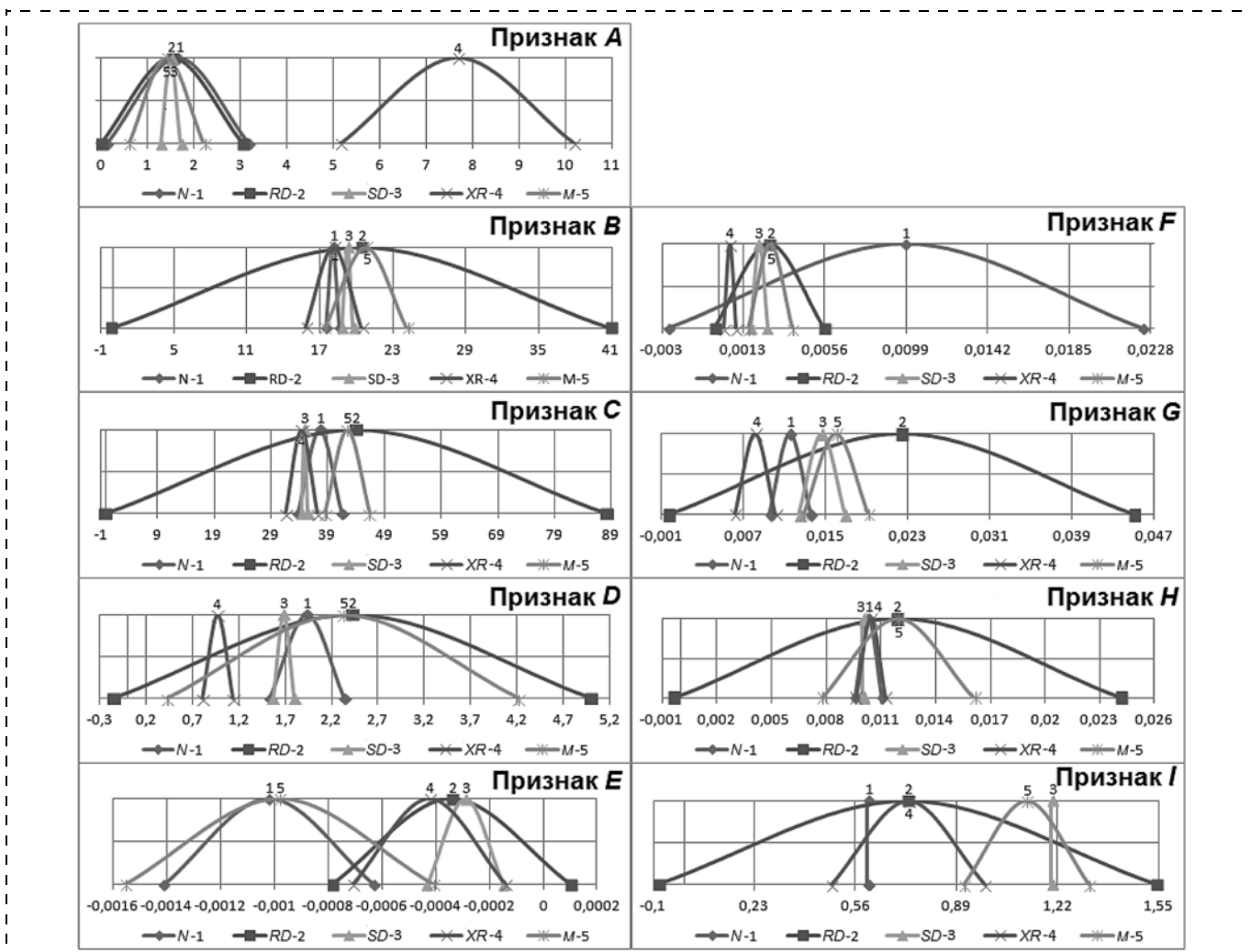


Рис. 5. Области значений признаков патологий сетчатки глаза

ваются области его значений. Оси ординат, как и в рассмотренном выше примере, служат только для обозначения наличия или отсутствия данного признака у соответствующей патологии. Для лучшей различимости области наличия признаков у соответствующих патологий обозначаются дугами, а не прямоугольниками. При этом никакого количест-

венного смысла ординаты этих дуг не имеют (кроме "да" или "нет"). Далее в работе эти признаки будут использованы при отработке методики построения многоуровневой ДС.

Не прибегая к расшифровке смысла каждой патологии и не раскрывая механизмов получения числовых значений признаков, отметим, что за исключением признака *A* все остальные признаки в основном подпадают под варианты, показанные на рис. 2, в, д. Признак *A* позволяет, используя простую логику, диагностировать патологию *XR*. В работе [6] было показано, что ДС с малым числом признаков нередко оказывается более эффективной, чем с большим набором признаков. В самом деле, воспользовавшись полным набором признаков, показанных на рис. 5, в данной работе была сформирована ДС на основе нечеткого логического вывода. Результаты работы такой системы показаны в табл. 1 (в таблицах 1–5 и 7 закрашены светло-серым цветом ошибочные диагнозы, а темно-серым — верные). ДС выдает массу ошибочных и плохо различимых диагнозов для конкретных пациентов (первый столбец таблицы) с известными патологиями.

Для повышения качества работы ДС в работе [6] была введена в рассмотрение трехуровневая система по схеме, показанной на рис. 1, в которой во всех подсистемах нижнего уровня использовались по три признака. Таким образом, число подсистем нижнего уровня составило 84. Результаты работы такой ДС показаны в табл. 2. Результаты стали значительно лучше, но все еще появлялись ошибочные результаты. Поэтому требуется более глубокая проработка вопросов, связанных с методикой построения многоуровневых ДС.

Метод отбора

После изучения распределения областей значений признаков для диагнозов реального объекта был составлен простой алгоритм выявления патологий, блок-схема которого показана на рис. 6. Этот алгоритм, названный "Методом отбора", по существу, не может являться альтернативой многоуровневой ДС, а применяется совместно с последней для формирования окончательного результата на верхнем уровне трехуровневой ДС.

Результаты диагностирования тех же пациентов "Методом отбора" сведены в табл. 3, где каждая ячейка указывает причину отвергания или конечного подтверждения (помечены "X") диагноза данной патологии, число после знака ":" означает коэффициент принадлежности указанного параметра, а число после знака "=" означает значение указанного параметра. Применение данного метода также дает ошибочные и плохо различимые результаты.

Формирование подсистем нижнего уровня ДС

В связи с тем, что подборка пациентов для обучения ДС весьма ограничена, для дальнейших ис-

Таблица 1

Пациенты с известными диагнозами	Нечеткое множество возможных патологий				
	<i>N</i>	<i>M</i>	<i>XR</i>	<i>SD</i>	<i>RD</i>
<i>N_009R</i>	0,38	0,45	0,34	0,98	1
<i>N_008L</i>	0,13	0,30	0,18	1	0,67
<i>RD_10R</i>	0,03	0,30	1	0,5	0,81
<i>RD_003R</i>	0,29	0	0	0	0
<i>SD_002L</i>	0,56	0,45	0,79	1	0,79
<i>SD_005L</i>	1	0,23	0,36	0,67	0,91
<i>XR_R003L</i>	0	0,45	0,27	0,77	1
<i>XR_R006L</i>	0	0,30	0,18	1	0,67

Таблица 2

Пациенты с известными диагнозами	Нечеткое множество возможных патологий				
	<i>N</i>	<i>M</i>	<i>XR</i>	<i>SD</i>	<i>RD</i>
<i>N_009R</i>	1	0,54	0,26	0,55	0,44
<i>N_008L</i>	1	0,55	0,27	0,56	0,44
<i>RD_10R</i>	0,25	0,46	0,25	0,53	1
<i>RD_003R</i>	0,38	1	0,097	0,70	0,72
<i>SD_002L</i>	0,64	0,74	0,23	1	0,91
<i>SD_005L</i>	0,65	0,60	0,33	1	0,76
<i>XR_R003L</i>	0,20	0,017	1	0,23	0,36
<i>XR_R006L</i>	0,57	0,32	1	0,70	0,72

Таблица 3

Пациенты с известными диагнозами	Нечеткое множество возможных патологий				
	<i>N</i>	<i>M</i>	<i>XR</i>	<i>SD</i>	<i>RD</i>
<i>N_008L</i>	<i>X</i> (<i>I</i> = 0,6)	<i>I</i> : 0,58	<i>A</i> : 0,11	<i>E</i> : 0,53	<i>E</i> : 0,53
<i>N_009R</i>	<i>E</i> : 0,33	<i>E</i> : 0,33	<i>A</i> : 0,14	<i>I</i> ≠ 1,2	<i>X</i> (<i>I</i> : 0,58)
<i>RD_003R</i>	<i>X</i> (<i>I</i> = 1,2)	<i>I</i> : 0,20	<i>A</i> : 0,08	<i>E</i> : 0,59	<i>E</i> : 0,59
<i>RD_10R</i>	<i>E</i> : 0,28	<i>E</i> : 0,28	<i>A</i> : 0,09	<i>I</i> ≠ 1,2	<i>X</i> (<i>I</i> : 0,80)
<i>SD_002L</i>	<i>E</i> : 0,17	<i>E</i> : 0,17	<i>A</i> : 0,18	<i>X</i> (<i>I</i> = 1,2 <i>H</i> = 10)	<i>X</i> (<i>H</i> : 0,57)
<i>SD_005L</i>	<i>E</i> : 0,31	<i>E</i> : 0,31	<i>A</i> : 0,17	<i>X</i> (<i>I</i> = 1,2 <i>H</i> = 10)	<i>X</i> (<i>H</i> : 0,57)
<i>XR_003L</i>	<i>A</i> : 0,17	<i>A</i> : 0,17	<i>X</i> (<i>A</i> : 0,82)	<i>A</i> : 0,17	<i>A</i> : 0,17
<i>XR_006L</i>	<i>A</i> : 0,37	<i>A</i> : 0,37	<i>X</i> (<i>A</i> : 0,62)	<i>A</i> : 0,37	<i>A</i> : 0,37

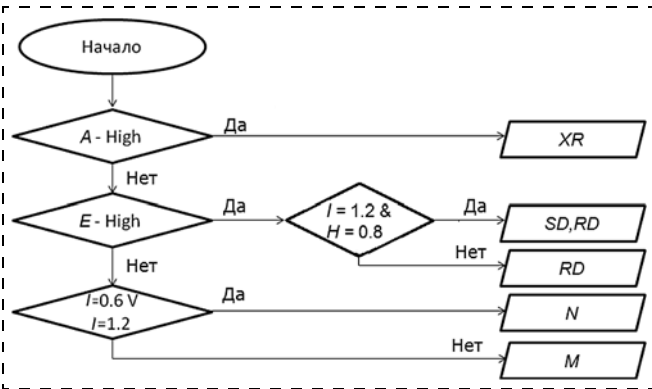


Рис. 6. Блок-схема "Метода отбора"

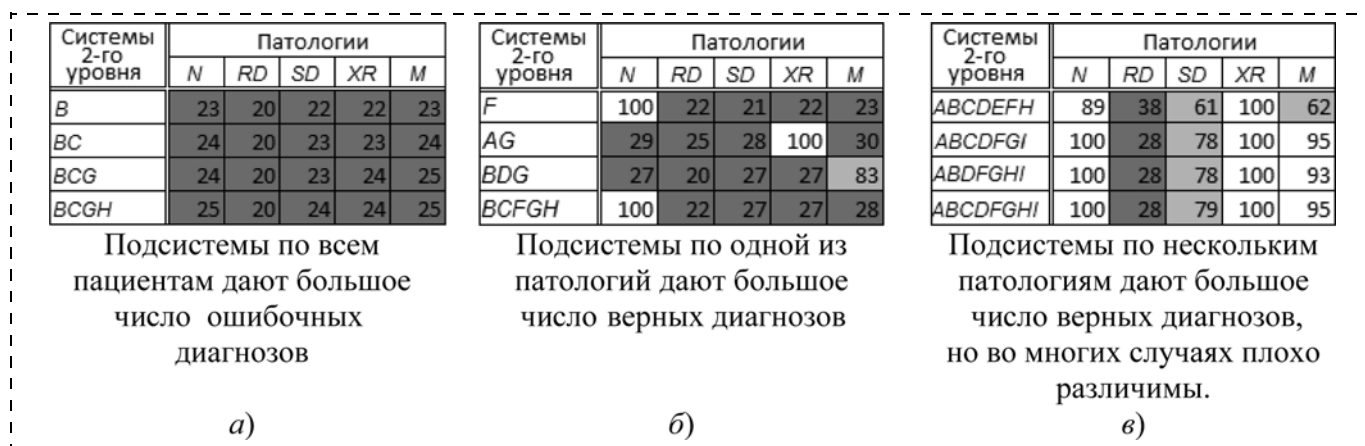


Рис. 7. Примеры подсистем:

а — неинформативная, б — информативная, в — условно информативная

следований была создана программа, генерирующая случайных "пациентов". Данная программа генерирует "пациента с заданным диагнозом" с математическим ожиданием и СКО, вычисленным по существующим данным относительно небольших выборок реальных пациентов.

Для отбора подсистем нижнего уровня необходимо оценить эффективность всех возможных частных ДС на базе нечеткого логического вывода с использованием всех возможных сочетаний из девяти признаков. Таких подсистем в данном случае может быть 511. Поэтому были исследованы все 511 вариантов сочетаний признаков. Среди таких сочетаний можно выделить:

- неинформативные сочетания, т. е. такие подсистемы, которые дают слишком большое число ошибочных диагнозов;
- информативные сочетания, т. е. подсистемы, которые по одной из патологий дают большое число верных диагнозов;

- условно информативные сочетания, т. е. подсистемы, которые по нескольким патологиям дают большое число верных диагнозов, но во многих случаях плохо различимых.

В представленных на рис. 7 примерах числа указывают процентное соотношение верно диагностированных патологий к общему числу пациентов с заданным диагнозом и подкрашены белым цветом — с высокой степенью точности распознавания патологии данной подсистемой, светло-серым — с средней степенью точности, темно-серым — с низкой. В первых столбцах указаны признаки, используемые в подсистемах.

Формирование блоков подсистем второго уровня ДС

В результате анализа эффективности подсистем нижнего уровня были отобраны по 20 наиболее информативных подсистем (блоки 2-го уровня) для каждой диагностируемой патологии. Эти блоки показаны на рис. 8. Введем обозначения: блок

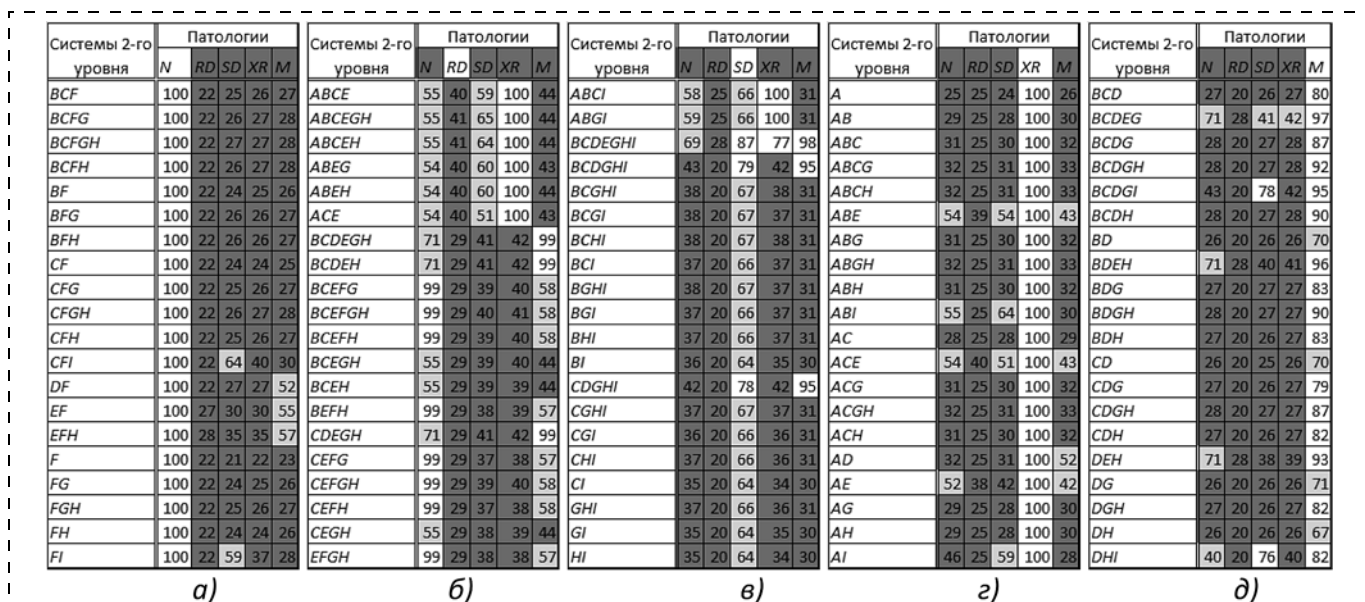


Рис. 8. Группы отобранных информативных систем для патологий

Таблица 4

	<i>ABCI</i>	<i>ABGI</i>	<i>BCDEGHI</i>	...	<i>HI</i>	Среднее
<i>N</i>	0,40	0,40	0,17	...	0,40	0,39
<i>RD</i>	0	0	0	...	0	0
<i>SD</i>	0,57	0,57	0,57	...	0,57	0,57
<i>XR</i>	0,18	0,18	0,40	...	0,40	0,38
<i>M</i>	0,57	0,57	0,17	...	0,57	0,53

Таблица 5

	<i>ABCI</i>	<i>ABGI</i>	<i>BCDEGHI</i>	...	<i>HI</i>	Сумма
<i>N</i>				...		0
<i>RD</i>				...		0
<i>SD</i>	<i>X</i>	<i>X</i>	<i>X</i>	...	<i>X</i>	20
<i>XR</i>				...		0
<i>M</i>	<i>X</i>	<i>X</i>		...	<i>X</i>	17

C1 — система для выявления *N*; блок *C2* — система для выявления *RD*; блок *C3* — система для выявления *SD*; блок *C4* — система для выявления *XR*; блок *C5* — система для выявления *M*. Ячейки подкрашены аналогично таблицам на рис. 7.

Все названные блоки образуют второй уровень ДС. В табл. 4 представлены результаты диагностики пациента *SD002L* с патологией "*SD*" блоком *C3*, призванным выявлять указанную патологию.

Необходимо отметить, что проверка данного пациента блоком *C3* на возможные другие патологии, при которых автоматически меняются функции принадлежности по соответствующим признакам, дает меньшее среднее значение степени принадлежности по сравнению с известным диагнозом *SD*. В данном случае верным диагнозом является диагноз, у которого среднее значение по всем подсистемам является наибольшим. Однако подобные блоки второго уровня при диагностировании конкретной патологии часто дают плохо различимые (близкие) результаты с другими патологиями. Для более четкого отделения плохо различимых диагнозов был также рассмотрен метод "5 %-ного коридора". Существо метода состоит в том, что если все имеющиеся средние степени соответствия диагностируемых патологий не превышают 0.95 от максимального среднего значения одной из них, то последняя принимается за истинную. В противном случае имеем плохо различимые диагнозы. В табл. 5 показывается, как метод "5 %-ного коридора" исключает плохо различимый диагноз "*M*" из рассмотрения. В данном случае все 20 подсистем блока *C3* дают диагноз "*RD*" и 17 — диагноз "*M*".

На втором уровне ДС необходимо данные диагностируемого пациента обработать всеми блоками этого уровня и передать на дальнейшую обработку на третий уровень ДС.

Алгоритмы работы ДС на третьем уровне

Этот уровень для выработки окончательного решения может содержать несколько алгоритмов

(включая и "метод отбора"), сочетание которых позволяет наилучшим образом провести диагностику. Рассмотрим такие алгоритмы.

Самым естественным является метод сравнения результатов диагностирования пациента всеми блоками второго уровня ДС. Назовем его "Методом систем 2-го уровня". Результаты такой обработки для рассматриваемого выше пациента показаны в табл. 6, где темно-серым цветом выделены не рассматриваемые результаты, а светло-серым — максимальное значение в диагонали, которое указывает на верный диагноз. Метод "5 %-ного коридора", по приведенным данным в скобках и в последнем столбце, подтверждает единственный верный диагноз. Вместе с тем, обработка других пациентов с известными диагнозами далеко не всегда дает хорошие результаты. Это иллюстрируется табл. 7, где отмечены неверные и плохо различимые результаты. Причиной такого результата может оказаться не совсем удачный подбор подсистем нижнего уровня при формировании некоторых блоков на втором уровне ДС. Если пересмотра структур блоков второго уровня не делать, то можно предложить еще три возможных алгоритма при наличии результатов обработки данных пациента блоками второго уровня в виде табл. 4. Назовем эти алгоритмы "Алгоритмами 3-го уровня".

Эти методы иллюстрируются табл. 8, в которой в отличие от табл. 6 добавлены три столбца: "минимум", "среднее", "максимум". В ячейках этих столбцов заносятся соответственно минимальное, среднее или максимальное значения из соответствующих строк табл. 6. За истинный диагноз берется диагноз той строки, где на пересечении со столбцом оказывается наибольшее из чисел этого столбца.

Таблица 6

Патология	Блоки 2-го уровня ДС					Метод 5 % коридора
	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>	<i>C5</i>	
<i>N</i>	0,18 (0)	0,17 (0)	0,39 (0)	0,61 (13)	0,55 (15)	0
<i>RD</i>	0,18 (2)	0,08 (0)	0 (0)	0,18 (2)	0,09 (0)	0
<i>SD</i>	0,71 (16)	0,70 (19)	0,57 (20)	0,72 (18)	0,64 (20)	20
<i>XR</i>	0,69 (16)	0,53 (14)	0,38 (0)	0,18 (0)	0,62 (18)	0
<i>M</i>	0,63 (17)	0,17 (0)	0,53 (17)	0,61 (16)	0,31 (0)	0

Таблица 7

Пациенты с известными диагнозами	Нечеткое множество возможных патологий				
	<i>N</i>	<i>RD</i>	<i>SD</i>	<i>XR</i>	<i>M</i>
<i>N_008L</i>	0,12	0,09	0	0,10	0,40
<i>N_009R</i>	0,15	0,12	0	0,14	0,33
<i>RD_003R</i>	0,30	0,11	0,54	0,07	0,55
<i>RD_10R</i>	0,18	0,04	0	0,09	0,37
<i>SD_002L</i>	0,18	0,08	0,57	0,18	0,31
<i>SD_005L</i>	0,20	0,09	0,57	0,17	0,34
<i>XR_003L</i>	0,12	0,14	0	0,79	0,21
<i>XR_006L</i>	0,11	0,11	0	0,61	0,17

Патология	Системы 2-го уровня					Методы диагностики			
	C1	C2	C3	C4	C5	Минимум	Среднее	Максимум	Метод 5 % коридора
<i>N</i>	0,18 (0)	0,17 (0)	0,39 (0)	0,61 (13)	0,55 (15)	0,17	0,37	0,61	0
<i>RD</i>	0,18 (2)	0,08 (0)	0 (0)	0,18 (2)	0,09 (0)	0	0,10	0,18	0
<i>SD</i>	0,71 (16)	0,70 (19)	0,57 (20)	0,72 (18)	0,64 (20)	0,56	0,66	0,72	20
<i>XR</i>	0,69 (16)	0,53 (14)	0,38 (0)	0,18 (0)	0,62 (18)	0,18	0,47	0,68	0
<i>M</i>	0,63 (17)	0,17 (0)	0,53 (17)	0,61 (16)	0,31 (0)	0,17	0,44	0,62	0

Пример в табл. 8 иллюстрирует совпадение всех результатов диагностирования рассматриваемого пациента всеми алгоритмами, включая метод "5 %-ного коридора", где темно-серым цветом выделены не рассматриваемые результаты, а светло-серым — максимальное значение, которое указывает на верный диагноз.

Рассмотренный в примерах пациент может быть условно отнесен к хорошо диагностируемому. Для проверки эффективности предлагаемых алгоритмов по каждой патологии было сгенерировано по 1000 "пациентов". Итоги верных, плохо различимых (спорных) и ошибочных диагнозов в процентном соотношении сведены в табл. 9.

Как следует из результатов обработки, для диагностирования *N* лучше всего подходит метод "5 %-ного коридора", для диагностирования *RD* лучше всего себя показал "Метод отбора". При диагностировании *SD* и *XR* все методы показали 100 %-ный результат. Для выявления *M* лучше всего

использовать метод "5 %-ного коридора" и "Метод отбора".

Рассмотренная трехуровневая ДС ориентирована на диагностику патологий сетчатки глаза, однако ее состав и функционирование позволяют сформулировать общую методику построения подобных систем диагностики для самых разных объектов.

Помимо описанных методов разрабатывается комбинированный метод, который использует результаты описанных выше методов. В данной системе белым цветом выделены системы с числом верных диагнозов до 80 %, светло-серым — от 80 до 90 %, темно-серым — от 90 %.

Методика построения многоуровневой диагностической системы

Эта методика состоит из следующей последовательности шагов.

Шаг 1. Тщательное изучение и сопоставление областей значений всех имеющихся формализованных числовых признаков патологий.

Шаг 2. С использованием признаков с непересекающимися областями значений для определенных патологий (если таковые обнаружены) уменьшение числа диагностируемых патологий за счет использования в ДС простых логических построений.

Шаг 3. Создание статистической модели патологий объекта диагностирования с использованием областей значений всех имеющихся формализованных числовых признаков патологий.

Шаг 4. Формирование и исследование эффективности подсистем диагностики нижнего уровня на основе нечеткого логического вывода со всеми возможными сочетаниями признаков с использованием статистической модели объекта диагностирования.

Шаг 4. Отбор подсистем нижнего уровня для формирования блоков второго уровня диагностической системы.

Шаг 5. С использованием на третьем уровне ДС алгоритма сопоставления результатов работы нижнего и второго уровней с применением статистической модели объекта, проверка эффективности всей диагностической системы.

Шаг 6. В случае необходимости повышение эффективности работы ДС дальнейшие действия могут идти в двух направлениях: 1) применение иных

Таблица 9

Патология	Методы диагностики					
	Метод отбора	Метод систем 2 ур.	Метод системы 3 ур. (мин.)	Метод системы 3 ур. (сред.)	Метод системы 3 ур. (макс.)	Метод 5 % коридора
<i>N</i>	88,8 % 0 % 11,2 %	61,7 % 1,3 % 37 %	80,5 % 0 % 19,5 %	91,1 % 1,7 % 7,2 %	90,6 % 3,9 % 5,5 %	90 % 5,7 % 4,3 %
<i>RD</i>	91,9 % 0 % 8,1 %	46,6 % 2 % 51,4 %	26,9 % 1,4 % 71,7 %	45,5 % 1,8 % 52,7 %	43,7 % 3,7 % 52,6 %	44,2 % 3,8 % 52 %
<i>SD</i>	100 % 0 % 0 %	100 % 0 % 0 %	100 % 0 % 0 %	100 % 0 % 0 %	98,6 % 1,4 % 0 %	100 % 0 % 0 %
<i>XR</i>	100 % 0 % 0 %	100 % 0 % 0 %	100 % 0 % 0 %	100 % 0 % 0 %	100 % 0 % 0 %	100 % 0 % 0 %
<i>M</i>	71,7 % 0 % 28,3 %	53,9 % 2,1 % 44 %	54,5 % 14,5 % 31 %	58,3 % 3,4 % 38,3 %	27,9 % 10,5 % 61,6 %	68,8 % 10,2 % 21 %
Итого	90,48 % 0 % 9,52 %	72,44 % 1,08 % 26,48 %	72,38 % 3,18 % 24,44 %	79,14 % 1,38 % 19,64 %	72,16 % 3,9 % 23,94 %	80,6 % 3,94 % 15,46 %

алгоритмов или их комбинаций на третьем уровне системы; 2) изменение состава подсистем в блоках второго уровня.

Заключение

Представленные в работе результаты показывают эффективность многоуровневых диагностических систем на базе нечеткого логического вывода.

Использование статистической модели объекта диагностирования позволяет достаточно быстро проводить обучение, настройку и проверку работоспособности диагностической системы.

При построении многоуровневых диагностических систем желательно иметь как можно больше формализуемых диагностических признаков. Для этой цели хорошо использовать коэффициенты модели для динамических объектов, частотные и временные характеристики переходных процессов и т. д.

Также для повышения эффективности результатов диагностирования необходимо использовать многотермовый вид функции принадлежности, число термов которой зависит от распределения областей значений соответствующего признака.

Список литературы

1. Мелихов А. Н., Бернштейн Л. С., Коровин С. Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. М.: Наука, 1990. 272 с.
2. Прикладные нечеткие системы / Асаи К., Ватада Д., Иваи С. Пер. с япон. / Под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. М.: Мир, 1993. 368 с.
3. Zadeh L. A. Fuzzy Logic, Neural Networks, and Soft Computing // Communications of the ACM. 1994. Vol. 37, N. 3. P. 77–84.
4. Аверкин А. Н., Батыршин И. З. Мягкие вычисления // Новости искусственного интеллекта. 1996. № 3. С. 161–164.
5. Ежов А., Четчин А. Нейронные сети в медицине // Открытые системы. 2007. № 4. С. 34–37.

6. Еремеев А. П., Хазиев Р. Р., Зуева М. В., Цапенко И. В. Прототип диагностической системы поддержки принятия решений на основе интеграции байесовских сетей доверия и метода Демпстера—Шефера // Программные продукты и системы. 2013. № 1. С. 11–16.
7. Eremeev A. P., Vagin V. N. Methods and tools for modeling reasoning on diagnostic systems // ICEIS 2009 — 11th International Conference on Enterprise Information Systems. Milan, 2009. P. 271–276.
8. Анисимов Д. Н., Вершинин Д. В., Колосов О. С., Хрипков А. В., Зуева М. В., Цапенко И. В. Использование подстраиваемой динамической модели сетчатки глаза в компонентном анализе для диагностики патологий методами искусственного интеллекта // Вестник МЭИ. 2008. № 5. С. 70–74.
9. Анисимов Д. Н., Вершинин Д. В., Колосов О. С., Зуева М. В., Цапенко И. В. Диагностика текущего состояния динамических объектов и систем сложной структуры методами нечеткой логики с использованием имитационных моделей // Искусственный интеллект и принятие решений. 2012. № 3. С. 39–50.
10. Колосов О. С., Анисимов Д. Н., Хрипков Д. В. Исследование многоуровневых нечетких диагностических систем с использованием стохастической модели. // Мехатроника, автоматизация, управление. Т. 16. 2015. № 4. С. 254–261.
11. Анисимов Д. Н. Формализация процедуры исключения транзитивно замыкающих дуг при организации иерархической структуры на множестве нечетких ситуаций // Вестник МЭИ. 2011. № 4. С. 34–40.
12. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с.
13. Анисимов Д. Н., Астахова Ю. Ю., Вершинин Д. В., Колосов О. С., Зуева М. В., Цапенко И. В. Дифференциация патологий сетчатки глаза на основе нечеткой логики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 2. С. 56–61.
14. Норвич А. М., Турскен И. Б. Построение функций принадлежности // Нечеткие множества и теория возможностей. М.: Радио и связь, 1986. С. 64–71.
15. Zimmermann H. J., Zysno P. Quantifying vagueness in decision models // European Journal of Operational Research. 1985. N. 22. P. 148–158.
16. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. М.: Наука, 2006.
17. Pedrycz W. Fuzzy Control and Fuzzy Systems. New York: John Wiley and Sons, 1993.
18. Анисимов Д. Н. Использование нечеткой логики в системах автоматического управления // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2001. № 8. С. 39–42.

The Formation of Multi-Level Fuzzy Diagnosing Systems Structure Using Stochastic Models

O. S. Kolosov, KolosovOS@mpei.ru✉, D. N. Anisimov, D. V. Khripkov,

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", 111250, Moscow, Russian Federation

Corresponding author: Kolosov Oleg S., KolosovOS@mpei.ru,
National Research University "Moscow Power Engineering Institute", 111250, Moscow, Russian Federation

Received on February 05, 2016

Accepted on February 17, 2016

An appearance of diagnostic systems of complex structure dynamic objects, based on "soft computing" is connected, primarily, with a relatively large number of possible developing faults (abnormalities) in these objects. The number of symptoms for diagnosis is often limited, and the field of values of these characteristics for different pathologies are intersecting. The claimed genus can include objects of different nature: technical, chemical, biological, etc. A very common situation for such objects is the lack of sufficient statistical samples of values of signs of pathology for the successful application of statistical methods for diagnosis. This work discusses the problems of structural construction and functional multi-level diagnosing systems based on fuzzy logic reasoning. While not subject to the restrictions on the dimensionality of the system (the number of diagnostically pathologies) and the possible number of signs used for diagnosis. As a tool, providing an acceptable and functional structure of the diagnosing systems and its individual levels, is used stochastic model of the diagnosed object. The model implements the generation of random values of features with preset mathematical expectation and standard deviation values for the respective

pathologies of the diagnostic object. This article paper proposes a method of constructing a multi-level diagnosing system in a sequence of steps (actions) to build appropriate levels of diagnostics. First of all it is solving the fundamental question of the expediency of constructing a multi-level (hierarchical) diagnosing system.

Keywords: fuzzy logic, multi-level diagnostic system, method of construction, the diagnostic subsystem of the lower level, a stochastic model of the diagnosed object

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation (project № 16-01-00054a)

For citation:

Kolosov O. S., Anisimov D. N., Khripkov D. V. The Formation of Multi-Level Fuzzy Diagnosing Systems Structure Using Stochastic Models, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 6, pp. 375—383.

DOI: 10.17587/mau.17.375-383

References

1. Melihov A. N., Bernshtein L. S., Korovin S. Ya. *Situatsionnye sovetuyushchie sistemy s nechetkoi logikoi* (Situation advising system with fuzzy logic), Moscow, Nauka, 1990, 272 p. (in Russian).
2. Asai K., Watada D., Iwai S. *Prikladnye nechetkie sistemy* (Applied fuzzy systems), Moscow, Mir, 1993, pp. 368 (in Russian).
3. Zadeh L. A. Fuzzy Logic, Neural Networks, and Soft Computing, *Communications of the ACM*, 1994, vol. 37, no. 3, pp. 77—84.
4. Averkin A. N., Batyrshin I. Z. *Myagkie vychisleniya* (News Artificial Intelligence), *Novosti Iskusstvennogo Intellekta*, 1996, no. 3, pp. 161—164 (in Russian).
5. Yezhov A., Chechetkin A. *Neironnye seti v medicine* (Neural networks in medicine), *Open Systems*, 2007, no. 4, pp. 34—37 (in Russian).
6. Ereemeev A. P., Khaziev R. R., Zueva M. V., Tsapenko I. V. *Prototip diagnosticheskoi sistemy podderzki prinyatiya reshenij na osnove integratsii bajesovskikh setej doveria I metoda Dempstera-Shefera* (A prototype of the diagnostic decision support system based on integration of trust networks and Bayesian method, Dempster-Shafer), *Software Products and Systems*, 2013, no. 1, pp. 11—16 (in Russian).
7. Ereemeev A. P., Vagin V. N. Methods and tools for modeling reasoning on diagnostic systems, *ICEIS 2009 — 11th International Conference on Enterprise Information Systems*, Milan, 2009, pp. 271—276.
8. Anisimov D. N., Vershinin D. V., Kolosov O. S., Khripkov A. V., Zueva M. V., Tsapenko I. V. *Ispol'zovanie podstraivayemoy dinamicheskoy modeli setchatki glaza v komponentnom analize dlja diagnostiki patologiy metodami iskusstvennogo intellekta* (Using the adjustable dynamic model of the retina in the component analysis for the diagnosis of pathologies of artificial intelligence methods), *Messenger MPEI*, 2008, no. 5, pp. 70—74 (in Russian).
9. Anisimov D. N., Vershinin D. V., Kolosov O. S., Zueva M. V., Tsapenko I. V. *Diagnostika tekushchego sostoyaniya dinamicheskikh*

ob'ektov i sistem slozhnoi struktury metodami nechetkoi logiki s ispol'zovaniem imitatsionnykh modelei (Diagnosis of the current state of dynamic objects systems and the complex structure of fuzzy logic techniques using simulation models), *Iskusstvennyi Intellekt i Prinyatie Reshenii*, 2012, no. 3, pp. 39—50 (in Russian).

10. Kolosov O. S., Anisimov D. N., Khripkov D. V. *Issledovanie mnogourovnevnykh sistem s ispol'zovaniem stokhasticheskoi modeli* (Research multilevel fuzzy diagnostic system using stochastic models), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, vol. 16, 2015, no. 4, pp. 254—261 (in Russian).

11. Anisimov D. N. *Formalizatsiya protsedury iskl'yucheniya tranzitivno zamykayushchikh dug pri organizatsii ierarkhicheskoi struktury na mnozhestve nechetkikh situatsii* (The formalization of procedures exclude transitive envelopes of arcs in the organization of the hierarchical structure on the set of fuzzy situations), *Vestnik MEI*, 2011, no. 4, pp. 34—40 (in Russian).

12. Zadeh L. A. *Ponyatie lingvisticheskoi peremennoi i ego primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh reshenii* (The concept of linguistic variable and its application to the adoption of approximate solutions.), Moscow, Mir, 1976, 165 p. (in Russian).

13. Anisimov D. N., Astakhov Y. Y., Vershinin D. V., Kolosov O. S., Zueva M. V., Tsapenko I. V. *Differenciatsiya patologiy setchatki glaza na osnove nechetkoi logiki* (Differentiation of retinal pathologies, based on fuzzy logic), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2010, no. 2, pp. 56—61 (in Russian).

14. Norvich A. M., Tursken I. B. *Postroeniye funktsii prinadlezhnosti* (Construction of membership functions), *Nechetkie mnozhestva i teoriya vozmozhnostei*, Moscow, Radio i Svyaz', 1986, pp. 64—71 (in Russian).

15. Zimmermann H. J., Zysno P. Quantifying vagueness in decision models, *European Journal of Operational Research*, 1985, no. 22, pp. 148—158 (in Russian).

16. Makarov I. M., Lokhin V. M., Manko S. V., Romanov M. P. *Iskusstvennyi intellekt I intellektualnye sistemy upravleniya* (Artificial Intelligence and Intelligent Systems upravleniya), Moscow, Nauka, 2006 (in Russian).

17. Pedrycz W. *Fuzzy Control and Fuzzy Systems*, New York, John Wiley and Sons, 1993.

18. Anisimov D. N. *Ispol'zovanie nechetkoi logiki v sistemakh avtomaticheskogo upravleniya* (The use of fuzzy logic in automatic control systems), *Pribory i Sistemy. Upravlenie, Kontrol', Diagnostika*, 2001, no. 8, pp. 39—42 (in Russian).

24—25 ноября 2016 г. в Санкт-Петербурге состоится 27-я конференция "Экстремальная робототехника (ЭР-2016)", и в этом году ее проведение приурочено к юбилею основателя ЦНИИ РТК и бессменного председателя программного комитета конференции — Е. И. Юревича.



Каждый год более двадцати пяти лет конференция "Экстремальная робототехника" собирает на своей площадке ведущих российских специалистов, молодых ученых в области робототехники, аспирантов, студентов крупнейших технических университетов. Вот уже несколько лет подряд конференция проходит в формате международного мероприятия, что позволяет в "открытом поединке" максимально оценить национальные составляющие мирового научно-исследовательского потенциала в области создания средств технической кибернетики и робототехники космического, воздушного, наземного и морского базирования.

В рамках конференции, как всегда, планируется рассмотреть широкий круг вопросов: от концептуальных проблем создания до практического применения уже существующих робототехнических комплексов. Тематика конференции посвящена актуальным вопросам, связанным с созданием робототехнических систем нового поколения для работы в экстремальных условиях и чрезвычайных ситуациях, включая борьбу с терроризмом, пожаротушение, решение оборонных задач, а также с задачами освоения космоса и глубин Мирового океана, медицины, атомной энергетики и опасных производств.

Работа конференции традиционно запланирована в формате пленарных и секционных заседаний, дискуссий, круглых столов, посвященных актуальным проблемам и задачам в сфере робототехнических систем и средств безопасности.

Международная конференция "ЭР-2016" открыта для всех желающих, а их организатор — ЦНИИ робототехники и технической кибернетики — всегда рад новым участникам и гостям.

Подробная информация о конференции на сайте: <http://er.rtc.ru>.

В. Е. Павловский, д-р физ.-мат. наук, проф., гл. науч. сотр., vlpavl@mail.ru,
Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва,
В. В. Павловский, ст. преподаватель, vlpavl2000@mail.ru,
Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова, Москва

Технологии SLAM для подвижных роботов: состояние и перспективы¹

Обсуждается технология SLAM одновременных локализации робота в среде передвижения и картирования окружающего пространства, которая стала одной из основных при решении задачи навигации мобильных роботов. Дан краткий обзор популярных эффективных методов реализации этой технологии, основанных на различных алгоритмах и использующих разную аппаратную базу.

Ключевые слова: навигация, локализация, картирование, робот, SLAM

Введение

Одной из основных задач систем управления (СУ) автономных роботов является задача навигации и ее подзадача — локализация робота в пространстве.

В автоматизированной навигации подвижных агентов (роботов) технология одновременной локализации и картирования (SLAM, Simultaneous Localization And Mapping) — это вычислительная схема построения или обновления карты неизвестной окружающей среды с одновременным отслеживанием местоположения агента в ее пределах. Эта технология стала основной в навигации мобильных агентов (роботов) [1–3]. К настоящему времени уже существует большой ряд алгоритмов реализации технологии SLAM с известным, по крайней мере приближенным, решением. Популярные приближенные методы решения включают специальную фильтрацию — расширенный фильтр Калмана или фильтр частиц — и статистическое оценивание данных. Эти алгоритмы SLAM существенно ориентированы на имеющиеся аппаратные ресурсы, особенно в бортовых вариантах, следовательно, они нацелены на эксплуатационное соблюдение ограничений этих ресурсов и соответствующую вычислительную эффективность.

Существующие подходы используются в автоматизированных автомобилях, беспилотных воздушных транспортных средствах, автономных подводных транспортных средствах, марсоходах, недавно появившихся роботах типа сервисных для работ внутри помещений. В обзоре будем использовать работы [1–15].

Постановка проблемы

Рассматривается следующая задача SLAM: на основе ряда наблюдений (измерений), полученных от датчика o_t в дискретные моменты времени t , требуется вычислить оценку местоположения агента (робота) x_t и построить карту окружающей его среды m_t . Все данные считаются вероятностными, что является ключевым положением всех рассматриваемых алгоритмов SLAM.

Таким образом, цель состоит в том, чтобы вычислить условную вероятность карты m_t и положения агента x_t при условии имеющегося измерения от датчика:

$$P(m_t, x_t | o_{1:t}). \quad (1)$$

Применение правила Байеса дает схему для того, чтобы последовательно обновить последующее значение местоположения, учитывая карту и функцию перехода $P(x_t | x_{t-1})$:

$$P(m_t | o_{1:t}, m_t) = \\ = P(o_t | x_t, m_t) \sum_{x_{t-1}} P(x_t | x_{t-1}) P(x_{t-1} | m_t, o_{1:t-1}) / Z. \quad (2)$$

Здесь x_t — положение робота в текущий момент времени t ; x_{t-1} — положение в предыдущий момент времени; m_t — построенная карта; $o_{1:t}$ — массив показаний датчиков в течение всего движения от начального до текущего момента. В знаменателе стоит соответствующий нормирующий множитель. Таким образом, формула описывает условное распределение для оценки текущего положения робота на основании построенной карты, показаний датчиков и оценки в предыдущий момент. Следующая формула аналогично описывает пересчет условного распределения для карты:

$$P(m_t | x_t, o_{1:t}) = \\ = \sum_{m_{t-1}} P(m_t | x_t, m_{t-1}, o_t) P(m_{t-1} | o_{1:t-1}, x_t). \quad (3)$$

¹ Работа выполнена при существенной поддержке гранта РФФИ 15-07-07483-а.

Отметим, что как и многие проблемы статистического оценивания, совместное определение этих двух переменных может быть найдено на основе некоторого оптимального решения, основанного на алгоритмах типа максимального правдоподобия.

Здесь и далее будем положение агента (аппарата) называть его позой, это принятый в теории SLAM термин.

Особенности алгоритмов технологии SLAM

Согласно приведенной выше схеме алгоритмы, реализующие технологию SLAM, используют различные вычислительные схемы для решения задачи локализации и картирования на основе данных, полученных от различных датчиков.

Базовые (первоначальные) алгоритмы SLAM основаны на уравнениях (1)–(3), включают фильтры Калмана, фильтры частиц (иначе, методы Монте-Карло) и оценки, использующие различные интервальные вычисления. Они обеспечивают оценку указанной выше функции вероятности для позы робота и для параметров карты.

Популярным методом в технологии SLAM является уравнивание, основанное на использовании изображений от видеосенсоров. Уравнивание проводится для устранения невязок, обусловленных наличием ошибок в избыточно измеренных величинах, и для определения наиболее вероятных значений искомым неизвестных или их значений, близких к этим вероятнейшим. В процессе уравнивания это достигается путем определения поправок к измеренным величинам (углам, направлениям, длинам линий или превышениям). Нередко уравнивание выполняется методом наименьших квадратов для минимизации невязок.

Уравнивание в технологии SLAM позволяет совместно оценивать позы и характерные положения ориентиров, увеличивая точность карты, и используется во многих новых коммерциализированных системах, включающих технологию SLAM, таких как например, проект Google Танго [9] (проект специального гаджета — планшета с 3D-информацией об окружающем пространстве). Здесь используется ряд изображений (видеокадров) серии 3D-пунктов с различных точек наблюдения, а с помощью уравнения решается задача одновременного уточнения 3D-координат, описывающих геометрию сцены, параметров относительного движения и оптических особенностей камеры, используемой для получения изображения. Эти вычисления выполняются согласно специализированному критерию оптимальности, включающему соответствующие параметры проектирования изображения всех наблюдаемых пунктов.

Заметим, что уравнивание почти всегда используется в качестве последнего шага каждого основанного на 3D-особенностях среды алгоритма реконструкции сцены. Уравнивание было первоначально применено в области фотограмметрии в

1950-х гг. и все более часто используется исследователями компьютерного видения в течение последних лет.

Новые алгоритмы для технологии SLAM остаются до сих пор активной областью исследований, которые ведутся согласно различным требованиям и предположениям о типах карт, датчиков и моделей обработки. Многие из современных систем, реализующих технологию SLAM, основаны на комбинации различных подходов.

Сенсоры. Измерения в технологии SLAM

В технологии SLAM часто используются несколько различных типов датчиков, так как только в этом случае возможно последовательное уточнение данных о позе робота и о карте. Возможности и пределы (физические ограничения) различных типов датчиков были основной причиной разработки новых алгоритмов. Статистическая независимость измерений — обязательное требование, чтобы справиться с метрическими отклонениями и с шумом в измерениях.

Различным типам датчиков соответствуют различные алгоритмы SLAM.

Лазерные измерители. При использовании в качестве основных сенсоров лазерных измерителей получаемые визуальные данные предоставляют подробную информацию о многих объектах (измеряемых пунктах, точках) в области, окружающей робот, создавая своеобразные облака измерений. В этом случае иногда может быть сделан вывод о том, что не требуется применение технологии SLAM, поскольку формы в этих облаках данных могут быть легко и однозначно выровнены (методом уравнивания) в каждом шаге через соответствующую регистрацию изображений.

Сонары. Хорошими датчиками измерения дальностей могут служить сонары. Они могут работать в условиях пониженной видимости, например, в тумане, что в таких случаях делает их предпочтительными.

Тактильные датчики. Тактильные (осязательные) датчики используются чрезвычайно редко, поскольку они позволяют получить только информацию об объектах, расположенных очень близко к агенту-роботу. Поэтому необходима их интеграция с другими сенсорными системами.

Осязательные датчики и радиодатчики. Некоторые технологии SLAM предусматривают использование осязательных датчиков (измерение выполняется только локальным прикосновением), радаров и технологии Wi-Fi.

В современных технологиях SLAM применяются для ориентирования также квазиоптические радиодатчики, реализуемые в трилатеральном (определение положения по трем базовым станциям (БС)) или в мультилатеральном вариантах с множественными БС (в системах RTLS (Real-time Locating

Systems), работающих, например, по радиометкам), или как мультиугломерная конструкция.

Оптические датчики могут быть одномерными (с единственным лучом) или двумерными (широкий луч, или двойной луч). В качестве оптических датчиков могут использоваться лазерные дальномеры, 3D-сенсоры высокого разрешения (например LiDAR), 3D-оптические локаторы. Эти датчики могут также включать специальные сенсоры — вспышки, одну или несколько 2D-камер. В алгоритмах, специализированных для работы под водой, в качестве датчиков могут использоваться 2D-или 3D-гидролокационные датчики.

С 2005 г. было выполнено интенсивное исследование технологии vSLAM (визуальной технологии SLAM), использующей, прежде всего, визуальные датчики (камеры) из-за увеличивающейся интенсивности применения таких датчиков, например камер в мобильных устройствах. Визуальные датчики и датчики типа оптических локаторов достаточно информативны, чтобы допускать существенное (значашее) получение измерений во многих случаях.

Ориентиры. Информация, получаемая от датчиков, может быть основана на ориентирах и на прямой обработке исходных данных. Ориентиры — уникально идентифицируемые объекты в мире, местоположение которых может быть оценено датчиком (например, точки доступа Wi-Fi или радиомаяки). Часто при прямой обработке исходных данных не делается предположение о том, что ориентиры могут быть точно определены, и вместо этого в них вероятностная модель $P(o_i|x_t)$ (вероятность данного измерения при данном местоположении объекта) рассматривается непосредственно как функция местоположения.

Носимый SLAM. Применяют также технологию SLAM для людей-пешеходов (операторов), в которой используется специальная обувь с установленными инерциальными датчиками в предположении, что пешеходы в состоянии избежать стен и двигаться вдоль них. Такая система автоматически строит план стен и может построить планы здания для дальнейшей обработки внутренней системой позиционирования. Оператору нужно в этом случае обойти помещения, и система создаст их карту.

SLAM во внешней среде. Для некоторых применений в естественной среде (так называемых outdoor-приложений) необходимость в технологии SLAM была почти полностью устранена из-за высоких точностей датчиков GPS, особенно в их дифференциальных версиях с повышенной точностью. С точки зрения технологии SLAM такие датчики могут быть рассмотрены как датчики местоположения, полностью доминирующие над прочими измерителями. Однако датчики GPS могут снизить качество работы полностью или в определенных случаях, например, в случаях плохой видимости спутников или технических проблем, такие примеры могут быть особенно интересны для некоторых приложений робототехники (движение в лесу, горах).

Ресурсы

- а) На странице в Интернет <http://openslam.org/> собран богатый набор различных методов SLAM. Там же имеются примеры реализаций различных алгоритмов, и они находятся в открытом доступе.
- б) В известной системе для роботов ROS (*Robot Operating System*) имеется пакет, поддерживающий реализацию алгоритма Mono-SLAM (SLAM, работающий с одной монокулярной камерой) [7, 8].
- в) В MATLAB имеются реализации нескольких версий SLAM — модели EKF-SLAM, FastSLAM 1.0, FastSLAM 2.0 и UKF-SLAM (метод, позволяющий избавиться от процедуры линеаризации в нелинейном стохастическом оценивании). Они реализованы как пакеты MATLAB-файлов и готовы к применению.

Алгоритмы SLAM

В общем случае алгоритм SLAM можно описать [14] как повторяющуюся последовательность шагов:

- 1) сканирование окружающего пространства,
- 2) определение смещения на основе сравнения текущего кадра с предыдущим,
- 3) выделение на текущем кадре особенностей-меток,
- 4) сопоставление меток текущего кадра с метками, полученными за всю историю наблюдений,
- 5.1) обновление информации о положении робота за всю историю наблюдений,
- 5.2) проверка на петли — не проходит ли робот повторно по одной и той же части местности,
- 5.3) выравнивание общей карты мира (отталкиваясь от положения меток и робота за всю историю наблюдений).

На каждом шаге алгоритма робот располагает предположениями о структуре мира (у него есть текущая карта) и историей движения в нем (траектория движения относительно карты с разбивкой по времени).

Опишем кратко наиболее распространенные методы SLAM.

Базисный SLAM

Базисным SLAM будем называть первоначальные версии и схемы алгоритмов SLAM. Популярным методом для решения задачи SLAM был расширенный фильтр Калмана (*EKF, Extended Kalman Filter*). На каждом шаге у робота есть набор ранее полученных ориентиров (landmark) и поступившие данные (дальномерные и фото, пусть RGB). На основании новых и предыдущих кадров можно определить смещение робота (используя методы визуальной одометрии) и предсказать новую позицию робота. В месте с тем, из нового кадра можно выделить местоположение особенностей (ориентиров) и вычислить положение робота относительно них. На основе разницы между двумя этими оценками позиций робота обновляются вероятности/веса

для всех ориентиров и корректируются позы—траектория движения робота. В качестве структуры для хранения информации о мире и траектории движения робота используется разрастающаяся со временем матрица ковариации, содержащая на каждом шаге исчерпывающую информацию о текущем представлении мира. Заметим, что в случае большого числа поз лучше подойдет фильтр частиц. Типичная схема SLAM приведена на рис. 1 [12]. Здесь показаны реальная траектория и реальные положения ориентиров вокруг робота, и те же характеристики, полученные как оценки по доступ-

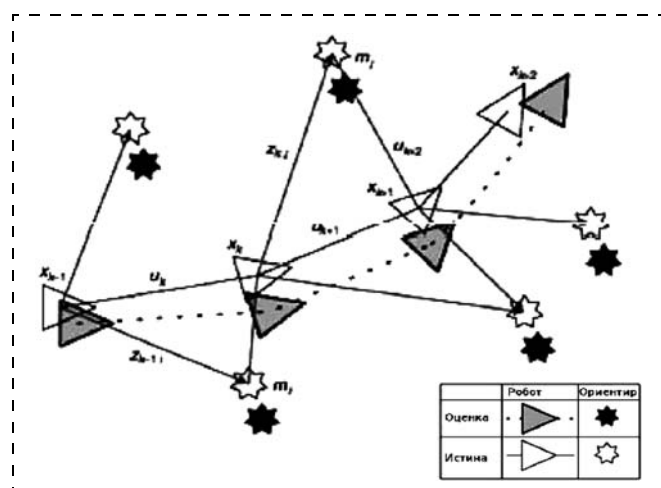


Рис. 1. Схема концепции SLAM



Рис. 2. Персональный робот ER-1 (Evolution Robotics, USA)

ным измерениям сенсоров робота. Цель алгоритмов навигации, очевидно, состоит в том, чтобы эти данные не сильно расходились.

Аппаратные средства робота достаточно важны. В качестве мобильных роботов будем рассматривать колесные роботы для применений внутри помещений. Далее будем главным образом рассматривать программное обеспечение SLAM и не будем рассматривать роботы со сложными моделями движения, такие как гуманоидные роботы, автономные подводные транспортные средства, автономные самолеты, роботы со нестандартными конфигурациями колеса и т. д.

Робот. Важным параметром качества работы робота является такой параметр, как оценка своего собственного положения только от одометрических датчиков, измеряющих вращения колес. У робота не должно быть ошибки больше, чем 2 см за 1 м перемещения и 2° за поворот робота на 45° . Типичные датчики положения робота должны сообщать роботу его координаты (x, y) в некоторой декартовой системе координат и также давать информацию о текущем смещении робота.

Для примера можно указать известную и давно выпускаемую конструкцию — мобильный робот ER-1 фирмы Evolution Robotics, USA. Робот поставляется с камерой и пресобранной системой управления нижнего уровня (рис. 2).

Рис. 2 дает определенное представление о типе робота, на который рассчитан базисный SLAM.

Устройство измерения дальностей (дальномеры). Используемые в настоящее время устройства измерения дальностей являются обычно лазерными сканерами. Они очень точны, эффективны и не требуют сложных вычислений при обработке измерений. Однако, надо отметить, они весьма дороги, цены могут превышать несколько тысяч USD. Есть с лазерными сканерами некоторые проблемы — они могут давать большие ошибки при попытке измерений от определенных поверхностей включая стекло, где они могут дать очень плохие данные. Также лазерные сканеры не могут использоваться под водой, так как вода препятствует распространению света, и измеряемый диапазон существенно уменьшается по сравнению с измерениями на воздухе.

Некоторое время назад весьма широко применялись такие сонары (ультразвуковые датчики). Они очень дешевы по сравнению с лазерными сканерами. Однако их измерения не очень хороши по сравнению с лазерными сканерами, и они часто дают некачественные данные. Если лазерные сканеры дают узкие лучи измерения, не превышающие обычно $0,25^\circ$, у сонара могут легко получаться лучи шириной до 30° .

Следует отметить также использование систем видения. Традиционно такая реализация сенсорной системы была весьма сложна в вычислительном плане и также была существенно подвержена ошибкам из-за изменений в освещенности (отметим здесь такой крайний случай, как комнату без

света, в ней система видения вообще работать не будет). В последние годы, тем не менее, в этой области были некоторые интересные достижения, например, инфракрасное зрение. Часто системы видения используют стереосистемы, чтобы измерить расстояние. Использование такого видения в последние годы более типично, нежели применение лазера или гидролокатора, что упрощает конструирование алгоритмов обработки. Также следует заметить, что картина, получаемая от системы видения, содержит существенно больший объем данных по сравнению со сканерами или локаторами. Некоторое время назад это было проблемой вычислительной обработки, но сейчас эта проблема снята в связи с резко возрастающей вычислительной мощностью бортовых процессоров. Например, у ER-1 имеется система видения, она будет использоваться в SLAM.

Данные одометрии. Важный аспект рассматриваемого алгоритма SLAM — данные одометрии. Цель получения одометрических данных — найти приблизительное положение робота, как оно измерено (и пересчитано) датчиками вращения колес робота. Эти данные служат начальным условием того, где робот мог бы находиться, для дальнейшего использования процедур EKF.

Сложная проблема в работе с данными одометрии и лазерными данными состоит в строгом контроле времени измерений и их синхронизации. Лазерные данные в некоторое время устаревают, если одометрические данные получены существенно позже. Чтобы удостовериться, что они действительны, можно экстраполировать данные.

Ориентиры. Ориентиры — особенности в среде, которые можно легко повторно наблюдать и отличить от окружающей среды.

Они используются роботом, чтобы узнать, где он находится (чтобы локализовать себя). Существенно, что ориентиры распознаются либо дальномерами, либо системой видения, либо датчиками прикосновения.

Можно сказать, что тип ориентиров робота и их использование будет зависеть от окружающей среды, в которой работает робот. Ориентиры должны быть заметными с различных точек наблюдения, чтобы позволять рассмотреть их (обнаружить) из различных положений и с различных углов наблюдения. Кроме того, ориентиры должны быть достаточно уникальными, чтобы они могли быть легко определены при переходе от одного временного шага к другому. Другими словами, если робот повторно наблюдает два ориентира, должна быть обеспечена возможность легко определить, какой из ориентиров был виден ранее. Если два ориентира находятся очень близко друг к другу, это может привести к ошибке и, тем самым, вызвать проблему.

Разработчик системы навигации должен выбрать ориентиры, постоянные на участке движения робота или, по крайней мере, изменяющиеся весьма редко. Наконец, есть очевидное условие, что время

поиска и обработки ориентиров роботом не должно быть слишком большим, иначе это сделает общую задачу робота плохо выполнимой.

Итак, ключевые условия о подходящих ориентирах следующие:

- ориентиры должны быть заметными с разных точек наблюдения;
- отдельные ориентиры должны быть отличимыми друг от друга;
- ориентиры должны быть достаточно многочисленными в окружающей среде;
- ориентиры должны быть постоянными.

Извлечение (детектирование) ориентиров. Как только определено, какие ориентиры робот должен использовать, необходимо определить надежный способ извлечения данных о них из сенсорных измерений. Как упомянуто выше, это зависит в основном от того, какие типы ориентиров назначены роботу, а также какие датчики используются в SLAM-системе.

Для лазерного сканирующего дальномера (и других дальномеров) хорошо работает способ определения скачков дальностей в измерениях на местности и наблюдения "поведения" нормалей к поверхности, построенных по триангуляционной сетке, в свою очередь, построенной по измеренным дальномером точкам поверхности. Здесь совместное наблюдение нормалей и скачков дальностей позволяет надежно выделять крупные препятствия на поверхности передвижения робота, которые могут служить ориентирами. Данный подход является разработкой авторов настоящей статьи, он проверен в серии экспериментов, моделирующих процесс опознавания ориентиров.

Схема алгоритма *базисного SLAM* для рассмотренного аппарата показана на рис. 3. Блоки этой схемы соответствуют описанным выше этапам вычислений с добавленными к ним вычислениям оценок по фильтрам Калмана или расширенного EKF.

Общая вычислительная схема фильтра Калмана (одно из представлений) может быть традиционно описана формулами (следуя, например, [15]):

$$\begin{aligned} q_{i+1}^* &= \hat{q}_{i+1} + K_{i+1}[R_{i(i+1)} - R_{0(i+1)}]; \\ K_{q(i+1)} &= [I - K_{i+1}H_{i+1}]K_{q0(i+1)} \times \\ &\times [I - K_{i+1}H_{i+1}]^T + K_{i+1}W_{i+1}K_{i+1}^T; \\ K_{i+1} &= K_{q0(i+1)}H_{i+1}^T \times \\ &\times [H_{i+1}K_{q0(i+1)}H_{i+1}^T + W_{i+1}]^{-1}; \\ K_{q0(i+1)} &= \Phi_i K_{qi} \Phi_i^T + V_i, \end{aligned} \quad (4)$$

где q_{i+1}^* — апостериорный вектор состояния объекта-агента размерностью 6×1 , здесь полагается, что определению подлежат три проекции радиус-вектора агента в некоторой (пространственной) системе координат и три проекции его скорости, при плоском движении размерность векторов и матриц



Рис. 3. Схема базисного SLAM

может быть уменьшена; $\hat{q}_{i+1}$ — априорный вектор состояния размерностью 6×1 ; K_{i+1} — матрица (коэффициентов) усиления фильтра размерностью $6 \times n$; $R_{i(i+1)}$ — "истинный" вектор измерений размерностью $n \times 1$; $R_{0(i+1)}$ — навигационный (расчетный) вектор измерений размерностью $n \times 1$; $K_{q(i+1)}$ — априорная матрица ковариаций среднеквадратических отклонений, характеризующих точность оценки вектора состояния, размерностью 6×6 ; H_{i+1} — матрица наблюдаемости размерностью $n \times 6$; I — единичная матрица размерностью 6×6 ; W_{i+1} — матрица ошибок измерения размерностью $n \times n$; $K_{q0(i+1)}$ — апостериорная матрица ковариаций среднеквадратических отклонений, характеризующих точность оценки вектора состояния, размерностью 6×6 ; Φ_i — фундаментальная матрица размерностью 6×6 ; V_i — матрица влияния внешних возмущений на вектор состояния; n — число измерений, вводимых в обработку.

В этой технологии понимается, что матрица наблюдаемости H — это матрица перехода, связывающая измерения и вектор состояния, получаемый от сенсоров. Фундаментальная матрица Φ — это матрица, описывающая движение связанной системы координат объекта (в проекциях на оси инерциальной) относительно инерциальной в заданном интервале времени.

Формула (4) является ядром системы вычислений и показывает вычислительную сложность SLAM. Заметим также, в этой процедуре имеется нетривиальная функция обращения матрицы, т. е. вычисления обратной матрицы.

MonoSLAM

Это алгоритм (алгоритмы), использующий данные от одной монокулярной камеры на роботе.

В этом состоит отличие данного метода от методов, использующих лазерные сканеры. Вычислительная схема весьма похожа на описанную в предыдущем разделе. Подробно эта система введена в работе [7].

Как в классических подходах SLAM, основанных на лазерных сканерах, предполагается, что поза робота описана как стохастическая переменная с гауссовским распределением, и карта окружающей среды не слишком насыщена. Окружающая среда описана ограниченным набором геометрических особенностей, т. е. имеет геометрически измеримые характеристики. Особенности также описаны как гауссовские переменные. Метод строит вероятностную 3D-карту среды робота и оценивает положение робота в ней.

Системное состояние, определенное роботом, определяет позу робота и наносится на карту, представленную в любое время $t = kt$, где t — время, начиная с предыдущего шага, оно также задается как стохастическая переменная с гауссовским распределением.

Информация относительно движения камеры в любой момент закодирована в векторе x_k , построенном как траектория робота.

Все статистические вычисления также проводятся как статистические фильтрации, могут использоваться различные фильтры.

В заключительной части работы [7] описано применение метода для андроидного робота. Таким роботом был выбран HRP-2. Авторы утверждают, что это один из самых совершенных роботов к моменту проведения экспериментов.

Робот оснащен тринокулярной видеокамерой, смотрящей вперед, позволяющей получать точные трехмерные измерения пространства перед роботом. Эта камера служила видеосенсором алгоритма SLAM. Помимо этого робот имеет и другие сенсоры, среди которых авторы выделяют трехосевой гироскоп, установленный в груди аппарата, позволяющий измерять угловые скорости тела на частоте до 200 Гц. В экспериментах этот датчик опрашивался на частоте 30 Гц, расширяя возможности стандартного monoSLAM.

Задача движения была поставлена следующим образом. Робот должен был двигаться в достаточно загроможденной лабораторной среде по окружности, причем из соображений безопасности траектория была разделена на пять частей, между которыми робот делал короткие остановки. Система SLAM работала все время не прерываясь. Рассмотренный в работе [7] алгоритм monoSLAM подтвердил свою достаточно эффективную работоспособность.

FastSLAM

Имеется эффективный алгоритм SLAM под названием FastSLAM [5]. Использование этого фильтра вычислительно более эффективно, чем использование классического фильтра Калмана.

В основе этого метода лежит идея разбиения фильтра большой размерности на множество фильтров малой размерности, что позволяет уменьшить вычислительную сложность задачи и соответственно ускорить вычисления. Рассмотрим для простоты движение робота на плоскости; тогда поза робота описывается тремя параметрами (координаты x и y и направление оси робота), а все ориентиры — двумя координатами x и y . Таким образом, если карта содержит K ориентиров, общее число параметров, требующих определения в задаче SLAM, составляет $2K + 3$.

Таким образом, в случае большого K размерность задачи возрастает пропорционально, что затрудняет применение традиционных методов. Фильтр Калмана требует хранения ковариационной матрицы всех параметров, которая содержит уже $(2K + 3)^2$ элементов, и полного пересчета ее при каждом измерении. Фильтры частиц (Particle Filter) также эффективны в случае небольших размерностей, но могут испытывать сложности с отслеживанием сложных многомерных областей, если не увеличивать число частиц. Практически непосредственная реализация этих методов позволяет эффективно обрабатывать карты с несколькими сотнями ориентиров, но тысячи ориентиров уже не позволяют обработку в реальном времени.

Метод FastSLAM основан на том, что отдельные измерения положений разных ориентиров независимы друг от друга (в строгом смысле вероятностной независимости случайных погрешностей этих измерений). Если бы мы точно знали положение робота, оценки координат каждого из K ориентиров можно было бы делать только на основании наблюдений за ним — наблюдения за другими ориентирами на них не влияют. Таким образом, $2K$ -мерная задача оценки карты распадается на K независимых двумерных задач оценки положений отдельных ориентиров, и при каждом измерении нужно обновлять данные только по тем ориентирам, которые наблюдались в этот раз.

В задаче SLAM, однако, положение робота также неизвестно и определяется по тем же наблюдениям за ориентирами. В этом случае между измерениями разных ориентиров возникает вероятностная зависимость через параметры позы робота — погрешности измерений одних ориентиров вносят погрешности в определяемую позу и через них влияют на погрешности измерения других ориентиров. Однако, если мы рассмотрим *условные распределения* оценок положений ориентиров относительно заданного распределения измеряемой позы робота, эти оценки уже будут *условно независимы*. Таким образом, общее апостериорное распределение $2K + 3$ параметров, измеряемых в методе SLAM, можно следующим образом разбить в трехмерное распределение параметров позы и K двумерных распределений координат ориентиров, условных

по распределению позы, но независимых при этом условии друг с другом:

$$p(s^t, \theta | z^t, u^t, n^t) = p(s^t | z^t, u^t, n^t) \prod_{k=1}^K p(\theta_k | s^t, z^t, u^t, n^t), \quad (5)$$

где s — поза робота, u — управление, z — измерения положений ориентиров (показания датчиков), а n — идентификация ориентиров, сопоставление наблюдений ориентирам; об этом будет подробнее сказано ниже. Верхний индекс t обозначает массив значений для всех моментов времени — распределения определяются не только текущими наблюдениями, но и всей прошлой историей. Заметим, однако, что в силу марковской природы рассматриваемых процессов можно хранить только текущую оценку распределений, последовательно обновляя ее на основании наблюдений. Наконец, θ — множество положений ориентиров, которые и измеряются в методе вместе с позой s , они не зависят от времени. Таким образом, формула (5) в явном виде отражает разложение совместного распределения s и θ в произведение безусловного распределения для позы s и условных по позе распределений положений всех ориентиров θ_k по отдельности.

Это разложение — строго верное и применимое в любых ситуациях SLAM — и лежит в основе метода FastSLAM. Практическая предложенная авторами реализация включает модифицированный фильтр частиц с M частицами для распределения позы и привязанными к каждой из этих частиц фильтра K двумерными фильтрами Калмана, измеряющими условные распределения параметров ориентиров. Всего получается KM фильтров, но эффективная организация фильтров Калмана в виде бинарного дерева вместо линейного списка позволяет обновлять всю структуру за $O(M \log k)$ операций для каждого наблюдения. Таким образом, метод становится намного эффективнее непосредственного многомерного фильтра для всех параметров, вычислительная сложность которого имеет порядок K^2 операций для каждого наблюдения.

Проведенные авторами эксперименты (как на вычислительных моделях, так и с физической моделью на полигоне NASA для исследований Mars Rover) показали, что оптимальное число частиц M фильтра составляет порядка 100 — при дальнейшем увеличении M точность измерений уже заметно не улучшается независимо от сложности карты. При этом алгоритм справляется в реальном времени с картами, содержащими тысячи и десятки тысяч ориентиров (моделирование проводилось для карт с 50 000 ориентиров) — величины, лежащие далеко за пределами возможностей обычных многомерных фильтров.

Кроме того, как дополнительное достоинство данного метода следует отметить большую устойчивость к ошибкам идентификации. Под идентификацией в задачах SLAM понимается отождествление ориентиров между измерениями — "понимание", что данные два наблюдения в разные

моменты времени относятся к одному ориентиру. В классическом методе ошибка идентификации может приводить к "катастрофическим последствиям". В случае метода FastSLAM вместо единого фильтра используются M фильтров, привязанных к отдельным частицам, и поэтому есть возможность по-разному обновлять эти блоки фильтров на основании разных гипотез об идентификации ориентиров. В дальнейшем частицы с привязанными к ним картами, основанными на неверной идентификации, потеряют в точности измерений и будут отсеяны фильтром частиц, что позволит методу "выправиться" и восстановить точность после ошибочной идентификации.

vSLAM

В определенном смысле визуальный SLAM обобщает методы работы monoSLAM.

vSLAM использует изображения от камеры, чтобы планировать положение робота в новой окружающей среде. Этот метод работает, отслеживая особенности изображений между кадрами камеры и определяя позу робота и положение особенностей в мире, основанные на их относительном движении. Это фактически обеспечивает дополнительный одометрический источник, который полезен для определения местоположения робота. Поскольку датчики камеры обычно более дешевые, чем лазерные датчики, это может быть полезной альтернативой или дополнением к основным на лазере методам локализации.

В этом разделе решение проблемы SLAM описывается с помощью ее графоориентированной формулировки. В этой структуре позы робота описаны узлами графа. Ребра между этими узлами представляют пространственные связи или ограничения между позами. Они, как правило, строятся из наблюдения датчиками или от одометрии. При такой формулировке решением проблемы SLAM будет такая конфигурация узлов, которая минимизирует ошибки введения ограничений.

Переход к оптимизации ориентирован на ряд поз и ограничений между ними. Одним из ограничений является карта. В графовом представлении каждая поза камеры соответствует одному узлу. Кроме того, для каждого узла можно строить стек наблюдаемых особенностей, а также их 3D-положения относительно узла. Ограничения между узлами вычислены на основе особенностей, связанных с узлами.

Значительное число методов SLAM требует использования точных, а потому дорогих и крупногабаритных сенсоров, таких как лазерные дальнометры, которые не всегда можно разместить на небольшом летающем аппарате. Здесь предлагается простой и надежный алгоритм, работающий с техническим зрением на базе одной или двух недорогих видеокамер и дающий устойчивые результаты даже при низком качестве (в экспериментах использовалось разрешение 320×200) и значительном сма-

зывании изображений. При этом алгоритм ориентирован на летающие роботы, и предполагается, что камеры установлены снизу робота и смотрят вертикально вниз для картографирования ландшафта под роботом. В случае стереозрения при этом возможно построение трехмерного ландшафта с определением также и высоты элементов рельефа; при наличии одной камеры алгоритм строит карту в предположении, что рельеф плоский. Кроме камер, предполагается оснащение робота датчиком наклона аппарата, определяющим углы тангажа и крена. Опыт показывает, что даже недорогие датчики определяют эти углы с достаточно высокой точностью.

Обработка информации с камер состоит в нахождении на них выделяющихся деталей — ориентиров, и анализе смещения этих ориентиров между разными снятыми камерой кадрами. В общем случае положение камеры описывается шестью параметрами (три координаты и три угла), и для определения всех шести требуется сопоставление трех ориентиров. Однако определение двух углов по датчику наклона дает возможность определять остальные параметры только по двум ориентирам. Для этого сначала изображения поворачиваются для коррекции данных углов тангажа и крена и построения виртуального горизонтального изображения. Затем по изменению масштаба — расстояния между ориентирами — определяется изменение высоты робота над рельефом, а по повороту соединяющей их линии — изменение угла рыскания. Наконец, после нормализации кадра коррекцией масштаба и поворота определяется смещение по горизонтальным осям.

Для отождествления ориентиров в разных кадрах используются 64-битные дескрипторы SURF (Speeded Up Robust Features) — это целочисленные характеристики особенностей изображения, инвариантные относительно поворотов и масштабирования; для каждого кадра хранится множество дескрипторов найденных особенностей и их координаты. Для определения смещения достаточно сопоставления двух ориентиров, поэтому применяется следующая процедура. Алгоритм сортирует все возможные сопоставления ориентиров по степени сходства (Евклидову расстоянию в пространстве дескрипторов). Затем берется пара наиболее похожих ориентиров, для них вычисляется соответствующее смещение камеры, после чего вычисляются проекции остальных ориентиров — как они должны были бы выглядеть при таком смещении камеры. Далее вычисляется суммарная оценка соответствия этих вычисленных проекций с ориентирами на реальном изображении (оценивая как близость координат на изображении, так и близость SURF дескрипторов). Если эта оценка превышает заданный порог — алгоритм полагает, что нужная трансформация найдена; иначе считается, что отождествление ориентиров было ложным, и берется следующая пара по степени сходства. Отметим, что отождествляемые пары берутся

именно так — сортировкой общего массива по степени сходства, это эффективнее, чем сравнивать сначала первый ориентир со всеми, потом второй, и так далее. В результате алгоритм останавливается либо после нахождения приемлемого по оценке соответствия, либо по превышении разрешенного времени работы. В последнем случае считается, что соответствие кадров не найдено.

Этот алгоритм применяется в двух ситуациях. Прежде всего, сопоставляются соседние кадры для "визуальной одометрии" — определяется последовательность смещений аппарата и интегрированием ее получаются итоговые координаты. Однако такой метод подвержен накоплению ошибок, поэтому в случае возвращения в область, где робот уже был, проводится коррекция для "замыкания петли" — совмещения начала и конца пути.

Алгоритм, дающий возможность таких коррекций, составляет основу рассматриваемого метода vSLAM. Для этого строится граф, вершинами которого являются все когда-либо полученные кадры, а ребрами — ограничения на смещения между этими кадрами, полученные сопоставлением ориентиров. Изначально граф строится как цепь кадров, связанных ограничениями "визуальной одометрии", каждый раз рассчитываются только координаты позы робота для очередного кадра. Однако при этом каждый раз текущие координаты робота сопоставляются с координатами, в которых были сняты прошлые кадры; и если одно из прошлых положений оказывается близким к текущему (в пределах 3σ , где σ — оценка дисперсии координат), этот прошлый кадр также сопоставляется с текущим. Далее, если визуальное сопоставление успешно найдено, соответствующее ребро добавляется к графу, после чего координаты всех вершин пересчитываются так, чтобы минимизировать (в смысле метода наименьших квадратов) суммарные отклонения перемещений между прошлыми позами робота (вершинами графа) от визуально определенных смещений. Этот подход с использованием графов позволяет эффективно корректировать накопленные ошибки, "замыкая петли" траектории, при этом корректно обрабатывая ситуации многократных "возвращений в знакомые места" для сложных траекторий со множеством самопересечений.

Для тестирования этого метода использовались ручные эксперименты: две камеры и датчик наклона были закреплены на длинном шесте, который нес перед собой экспериментатор. С этим снаряжением он обошел вокруг здания, пройдя около 190 м, замкнув в конце траекторию. При этом накопленная ошибка оказалась довольно велика (порядка 20...30 м). Однако после возвращения к началу траектории метод корректно обнаружил замыкание петли и скорректировал построенный граф, исправив ошибки локализации. При этом на территории отсутствовали бросающиеся в глаза детали (часть пути со-

ставляла трава, часть — покрытая плитами дорога), но это не помешало успешно найти соответствие.

Второй эксперимент проводился также вручную внутри здания. На пути были разложены разные предметы, и определялась точность картографирования этих предметов. В результате получилась относительная погрешность менее 8 %, в основном порядка 5 %.

Далее были проведены эксперименты с реальными роботами. Робот — мини-дирижабль был оснащен камерами без датчика наклона (считая, что наклон всегда равен нулю — для дирижабля это близко к истине), после чего он проведен по области эксперимента для картографирования. Затем ему была поставлена задача удержания позиции; экспериментаторы несколько раз отталкивали робота от удерживаемой позиции, но всякий раз он успешно определял свое перемещение и возвращался.

Наконец, был проведен эксперимент с мини-вертолетом. На вертолете стояла одна камера без датчика наклона. Опять же, наклон считался равным нулю — что является уже намного более грубым допущением в случае вертолета. Тем не менее, картографирование области с помощью вертолета определило координаты ключевых ориентиров с ошибкой 20...60 см при общих размерах области 35 м.

Таким образом, эксперименты показывают надежную и устойчивую работу алгоритма в реальных условиях даже при оснащении роботов минимальным набором дешевых сенсоров.

INS SLAM, INS-GPS-SLAM

Как показано выше, в технологии SLAM редко используется единственный сенсор, который связан, главным образом, со счислением пути (dead reckoning, DR, одометрическое счисление) или инерциальной навигационной системой (INS).

Аббревиатура ИНС СЛАМ (в англоязычной литературе INS/SLAM или INS/VSLAM) обозначает систему, объединяющую обработку данных от сенсоров инерциальной навигационной системы (ИНС, INS) и от системы VSLAM.

В работе [6] предлагается именно объединение с инерциальной навигационной системой. В целом построение системы SLAM требует радара, лазерного сканера, датчика видения или любых других



Рис. 4. Общая схема ИНС-SLAM

типов датчиков, это определяет характеристики данных (рис. 4). Предлагаемый подход использует единственный датчик видения (в варианте vSLAM), который является относительно дешевым вариантом, но полностью одна камера здесь не дает полного решения проблемы.

Из-за нелинейной модели наблюдения-видения зрительного датчика описанная выше интеграция с INS выполнена на основе вариантов: расширенного фильтра Калмана (ЕКФ), сигма-точечного фильтра Калмана (UKF) или распределенного фильтра частиц.

Результаты моделирования показывают, что предложенный распределенный фильтр имеет лучшие характеристики работы с точки зрения определения вектора изменений состояния и числа вычислений. Есть соответствующие оценки работы по сравнению с централизованным фильтром частиц, известным оптимальным фильтром. Вообще, известно, что ЕКФ обеспечивает большую скорость вычисления; однако у получаемой оценки возникает самая большая ошибка из-за особенностей фильтра Калмана. Централизованному фильтру частиц нужно самое большое время вычисления даже при том, что его результат оценки близок к распределенному. Таким образом, предложенный фильтр может получить более высокое качество оценки работы и уменьшить время вычисления, используя распределенную структуру фильтра.

В отличие от фильтра Калмана, созданный фильтр частиц может быть применен к нелинейным системным моделям с негауссовским шумом распределения; может быть способен к оценке состояния даже в том случае, когда трудно формировать модель измерения или когда распределение не гауссовское. Датчик видения дает базу для оценки, и она может быть улучшена при использовании фильтра частицы, даже в нелинейных случаях.

Одна из самых больших проблем в формировании фильтра INS/VSLAM состоит в том, что типы и число заметных характерных точек, а также комбинация доступных измерений датчиков изменяются, что приводит к изменению конфигурации фильтра.

Результаты моделирования показывают, что и аппаратно и программно рассмотренный фильтр является наиболее эффективным.

Заключение

Разработки методов SLAM ведутся и в России [10–13]. Особый интерес представляют работы [10, 11], где описана система типа monoSLAM, работающая лишь от единственного лазерного дальномера.

Важные результаты приведены в работе [13], где представлено сравнение работы трех алгоритмов типа SLAM, работающих по видеопотоку от единственной камеры. Рассмотрены monoSLAM, PTAM и LSD-SLAM. Эти алгоритмы фактически идентичны по используемой сенсорной аппаратуре (единствен-

ная видеокамера), но различаются методами определения особенностей на изображении. PTAM использует детектор углов на изображении, LSD-SLAM — области изображений для построения карты и пройденной траектории, что позволяет ему составлять высокодетализированные карты в режиме реального времени. Однако в целом метод monoSLAM позволяет строить наиболее точную траекторию по наименее детализированной карте.

Приведенное выше описание методов SLAM и результаты работы [13] приводят к выводу, что создание алгоритма SLAM, обеспечивающего универсальное решение задач одновременной локализации и картирования для мобильных агентов, еще далеко от завершения.

Список литературы

1. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Simultaneous_localization_and_mapping.
2. **Seren Riisgaard, Morten Rufus Bias.** SLAM for Dummies. A Tutorial Approach to Simultaneous Localization and Mapping. 127 p. URL: http://ocw.mit.edu/courses/aeronautics-and-astronautics/16-412j-cognitive-robotics-spring-2005/projects/laslam_blas_repo.pdf.
3. **Leonard J. J., Durrant-Whyte H. F.** Simultaneous map building and localization for an autonomous mobile robot // Intelligent Robots and Systems' 91. Intelligence for Mechanical Systems. Proc. IROS'91. IEEE/RSJ International Workshop. 1991. P. 1442–1447. DOI: 10.1109/IROS.1991.174711
4. **Steder B., Grisetti G., Stachniss C., Burgard W.** Visual SLAM for Flying Vehicles. 5 p. URL: <http://ais.informatik.uni-freiburg.de/publications/papers/stder08tro.pdf>.
5. **Montemerlo M., Thrun S., Koller D., Wegbreit B.** FastSLAM: A Factored Solution to the Simultaneous Localization and Mapping Problem // Carnegie-Mellon University, Stanford University, Proc. of American Association for Artificial Intelligence, AAAI-02. 2002. P. 593–598.
6. **Dae Hee Won, Sebum Chun, Sangkyung Sung, Young Jae Lee, Jeongho Cho, Jungmin Joo, Jungkeun Park.** INS/vSLAM System Using Distributed Particle Filter // International Journal of Control, Automation, and Systems. 2010. 8 (6). P. 1232–1240. DOI: 10.1007/s12555-010-0608-7.
7. **Andrew J. Davison, Ian D. Reid, Nicholas D. Molton, Olivier Stasse.** MonoSLAM: Real-Time Single Camera SLAM // IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence. 2007. Vol. 29, N. 6. P. 1–16.
8. **Russo L., Rosa S., Bona B., Matteucci M.** A ROS Implementation of the Mono-SLAM Algorithm. 13 p. URL: <http://www.slideshare.net/csandit/a-ros-implementation-of-the-monoslam-algorithm>.
9. URL: <https://www.google.com/atap/project-tango/>
10. **Герасимов В. Н., Михайлов Б. Б.** Решение задачи управления движением мобильного робота при наличии динамических препятствий // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. "Приборостроение". 2012. Спец. выпуск № 6 "Робототехнические системы". С. 83–92.
11. **Герасимов В. Н.** Алгоритм SLAM на основе корреляционной функции // Экстремальная робототехника. Сб. докл. в Всеросс. науч.-техн. конф. 2015. С. 101–106.
12. **Кузнецов П. М.** Система навигации робота на базе визуальной одометрии. СПб: Изд. СПбГУ, 2012. 15 с. URL: <http://www.apmath.spbu.ru/ru/education/master/2012/kuznecov-prez.pdf>
13. **Боковой А. В.** Исследование методов одновременного картирования и локализации беспилотных летательных аппаратов по видеопотоку, полученному с единственной камеры // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. "Экстремальная робототехника". Тр. II Всеросс. семинара "Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта (БТС ИИ)" (2015). 2015. С. 26–33.
14. URL: <http://my-it-notes.com/2013/01/slam-basis-and-links-at-open-source/>.
15. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Kalman_filter

SLAM Technologies for the Mobile Robots: State and Prospects

V. E. Pavlovsky, vlpavl@mail.ru✉,

Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS, Moscow, 125047, Russian Federation,

V. V. Pavlovsky, vlpavl2000@mail.ru,

Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, 117997, Russian Federation

Corresponding author: **Pavlovsky Vladimir E.**, D. Sc., Leading Resercher,
Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS,
Moscow, 125047, Russian Federation, e-mail: vlpavl@mail.ru

Received on 29.12.2015

Accepted on 10.02.2016

SLAM is a modern technology of a simultaneous localization of a mobile robot in the environment of motion and mapping of the surrounding space. By using SLAM a robot determines its position (solves the problem of localization) in space and simultaneously builds a map of the environment. This is a major technology for approaching the problem of navigation of the mobile robots. Now certain algorithms are already available with the known solution for the problem of SLAM. SLAM algorithms are applied widely for control of the mobile devices moving on the roads or off roads, for control of the flying robots (autonomous robot planes, helicopters, dirigibles), and for control of the android walking robots. Of course, for each class of the mobile robots there are specific features of a concrete SLAM technology, but the main ideas remain the same. In the specified technology a robot orientates itself in relation to the known reference points, using the sensors providing information on the reference points. In the first SLAM algorithms video cameras and/or range finders were often used, and later satellite navigation sensors were used.

The article presents a brief review of the popular effective solutions to the SLAM problem based on various sensor processing algorithms and using different hardware. Among them the basic SLAM methods, such as MonoSLAM, FastSLAM, VisualSLAM, INS-SLAM, and INS-GPS-SLAM are considered. Their description is presented in the same order as information about these methods appeared in literature, and in the specified row, so the subsequent methods are more improved, than the preceding ones.

Now the above methods ensure a reliable navigation for the mobile robots, however, new methods appear, and research is going on, in particular, with the aim to increase the speed of the SLAM methods and develop new sensors providing information on the environment.

Keywords: navigation, localization, mapping, robot, SLAM

For citation:

Pavlovsky V. E., Pavlovsky V. V. SLAM Technologies for the Mobile Robots: State and Prospects, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 6, pp. 384–394.

DOI: 10.17587/mau.17.384-394

References

1. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Simultaneous_localization_and_mapping.
2. **Soren Riisgaard, Morten Rufus Bias.** SLAM for Dummies. A Tutorial Approach to Simultaneous Localization and Mapping, 127 p., Available at: http://ocw.mit.edu/courses/aeronautics-and-astronautics/16-412j-cognitive-robotics-spring-2005/projects/laslam_blas_repo.pdf.
3. **Leonard J. J., Durrant-Whyte H. F.** Simultaneous map building and localization for an autonomous mobile robot, Intelligent Robots and Systems' 91. *Intelligence for Mechanical Systems. Proc. IROS'91. IEEE/RSJ International Workshop*, 1991, pp. 1442–1447, DOI: 10.1109/IROS.1991.174711.
4. **Steder B., Grisetti G., Stachniss C., Burgard W.** Visual SLAM for Flying Vehicles, 5 p., available at: <http://ais.informatik.uni-freiburg.de/publications/papers/stder08tro.pdf>.
5. **Montemerlo M., Thrun S., Koller D., Wegbreit B.** FastSLAM: A Factored Solution to the Simultaneous Localization and Mapping Problem, Carnegie-Mellon University, Stanford University, *Proc. of American Association for Artificial Intelligence, AAAI-02*, 2002, pp. 593–598.
6. **Dae Hee Won, Sebum Chun, Sangkyung Sung, Young Jae Lee, Jeongho Cho, Jungmin Joo, Jungkeun Park.** INS/vSLAM System Using Distributed Particle Filter, *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2010, vol. 8 (6), pp. 1232–1240, DOI: 10.1007/s12555-010-0608-7.
7. **Andrew J. Davison, Ian D. Reid, Nicholas D. Molton, Olivier Stasse.** MonoSLAM: Real-Time Single Camera SLAM, *IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence*, 2007, vol. 29, no. 6, pp. 1–16.
8. **Russo L., Rosa S., Bona B., Matteucci M.** A ROS Implementation of the Mono-SLAM Algorithm, 13 p., available at: <http://www.slideshare.net/csandit/a-ros-implementation-of-the-monoslam-algorithm>.
9. Available at: <https://www.google.com/atap/project-tango/>
10. **Gerasimov V. N., Mikhailov B. B.** Reshenie zadachi upravleniya dvizheniem mobil'nogo robota pri nalichii dinamicheskikh prepyatstviy (Solution motion control tasks the mobile robot in the presence of dynamic obstacles), *Vestnik MGTU im. N. E. Bauman. Ser. "Priborostroenie"*. 2012, Spet. iss. 6 "Robototekhnicheskie sistemy", pp. 83–92 (in Russian).
11. **Gerasimov V. N.** Algoritm SLAM na osnove korrelyatsionnoi funktsii (), *Proc. of the All-Russian Scientific and Engineering. Conf. Ekstremalnaya robototekhnika*, 2015, pp. 101–106 (in Russian).
12. **Kuznetsov P. M.** Sistema navigatsii robota na baze vizual'noi odometrii (Robot navigation system based on visual odometry), SPb., Publishing house of SPbGU, 2012, 15 p., available at: <http://www.apmath.spbu.ru/ru/education/master/2012/kuznecov-prez.pdf>
13. **Bokovoi A. V.** Issledovanie metodov odnovermennogo kartirovaniya i lokalizatsii bespilotnykh letatel'nykh apparatov po videopotoku poluchennomu s edinstvennoi kamery (Research of methods of one-dimensional mapping and localization of unmanned aerial vehicles for videopotokopoluchennomu with a single camera), *Proc. of the All-Russian Scientific and Engineering. Conf. Ekstremalnaya robototekhnika*, Works Proc. Seminar "Unmanned Vehicles with Elements of Artificial Intelligence (AI BPS)", 2015, pp. 26–33 (in Russian).
14. Available at: <http://my-it-notes.com/2013/01/slam-basis-and-links-at-open-source/>.
15. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Kalman_filter

А. В. Смирнов, аспирант, asmirnov_1991@mail.ru,

А. Ю. Беззубцев, аспирант-инженер, mannaz2012@mail.ru,

Институт программных систем им. А. К. Айламазяна РАН, г. Переславль-Залесский

Автоматическое передвижение роботизированного подвижного технического средства с построением схемы исследуемого помещения

Обсуждается решение проблемы автоматической навигации роботизированных подвижных технических средств (РПТС) в помещении. Рассматриваются метод и алгоритм передвижения РПТС по заданному помещению с последующим формированием схемы помещения. Разработанные алгоритмы основаны на использовании свойств среднеквадратического отклонения значений дистанции до окружающих РПТС объектов, полученных с комплекса дальномеров.

Ключевые слова: роботизированное подвижное техническое средство, схема помещения, план помещения, дисперсия, среднеквадратическое отклонение, команды управления, схема-прототип, комплекс дальномеров

Введение

В наши дни в робототехнике большое внимание уделяется задаче автоматического передвижения и ориентации роботов в пространстве. Решение этой задачи напрямую зависит от методов и алгоритмов построения карты территории или плана-схемы помещения, в котором находится робот. Одним из самых популярных на сегодняшний день является метод одновременной навигации и составления карты (SLAM [1, 2] от англ. Simultaneous Location and Mapping). Этот метод основан на одновременной генерации схемы помещения и движении робота с использованием сканирующего лазерного дальмера (СЛД) [3] или лидара (Lidar) [4] и данных об угловой скорости колес робота. Из российских разработок можно выделить методы, представленные в диссертации А. А. Минина [5], где описаны методы определения линейной и угловой скоростей мобильного робота по данным лазерного дальмера, комплексации данных дальмера с информацией от других датчиков, управления движением робота и планирования пути. Все эти методы хорошо зарекомендовали себя на практике, но, тем не менее, имеют ряд недостатков, ключевым из которых является стоимость лазерного сканера.

Из-за дороговизны сканирующего оборудования возникла потребность в разработке менее материально затратного метода построения схемы помещения и ориентации роботизированного подвижного технического средства (РПТС). Сейчас независимо разработчику доступны такие устройства определения расстояния до объекта, как дальномеры. Все дальномеры различаются по типу используемого сигнала для измерения расстояния. Самыми дорогими на рынке являются ультразвуковые дальномеры [6], более дорогие — инфракрасные [7, 8] и лазерные [9]. Тем не менее, стоимость самого дорогого дальмера по меньшей мере в 10 раз ниже, чем у СЛД. Комплексы из дальномеров уже ис-

пользуют как вспомогательное средство ориентирования роботов в пространстве.

В данной статье рассматриваются метод и алгоритм автоматического передвижения РПТС с последующим построением схемы помещения с использованием данных, полученных от комплекса дальномеров, и данных об изменении среднеквадратического отклонения расстояний до объектов.

Системы навигации РПТС

Разработка систем навигации РПТС в помещении является нетривиальной задачей. Прежде всего, необходимо определить, по какому принципу робот будет получать информацию об окружающей среде и близлежащих объектах. В зависимости от используемых датчиков и сенсоров системы навигации можно разделить на следующие группы:

1) системы навигации, основанные на использовании сенсоров, работающих вне видимого спектра. К таким сенсорам относят дальномеры всех типов. К ним также можно отнести СЛД. Такие системы характерны тем, что информация об окружающей среде формируется за счет анализа данных о расстоянии до окружающих РПТС объектов;

2) системы навигации, основанные на использовании компьютерного зрения [10]. Здесь главной задачей робота является анализ и обработка изображений или видеопотока, полученного с установленных на его борту камер. Компьютерное зрение также позволяет наделять роботов стереозрением, необходимым для генерации карты глубин, с помощью которой можно определить расстояние до объектов, попавших в поле зрения камер;

3) системы навигации, основанные на использовании маяков. Такие системы требуют дополнительной установки маяков в исследуемом помещении. Задачей робота является определение местоположения каждого из маяков и нахождение по полученным данным собственных координат и ориентация в пространстве;

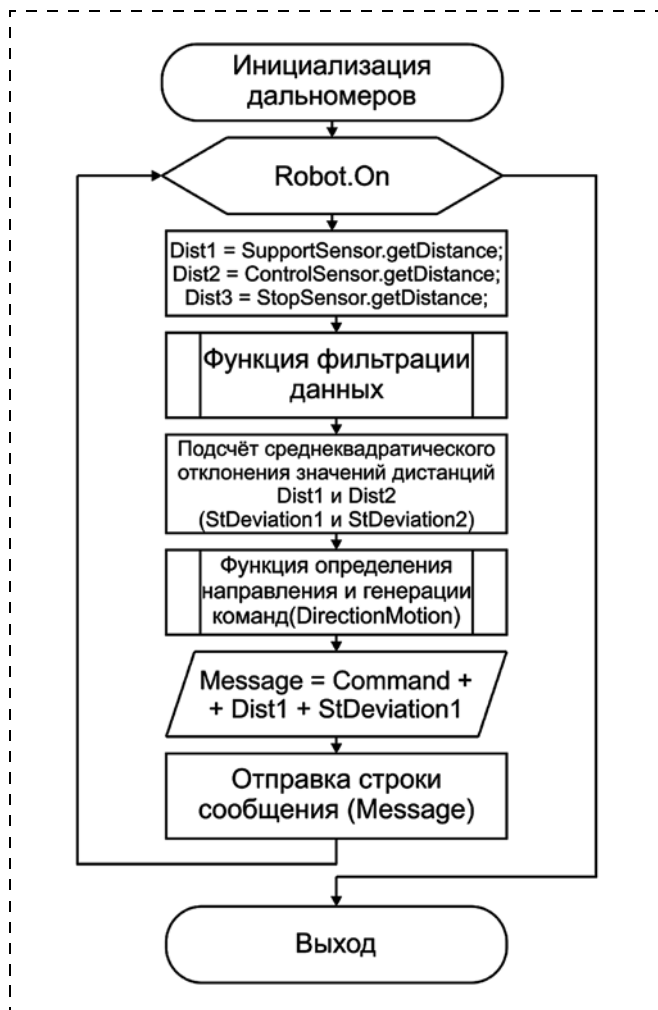


Рис. 2. Блок-схема алгоритма движения РПТС по заданному помещению

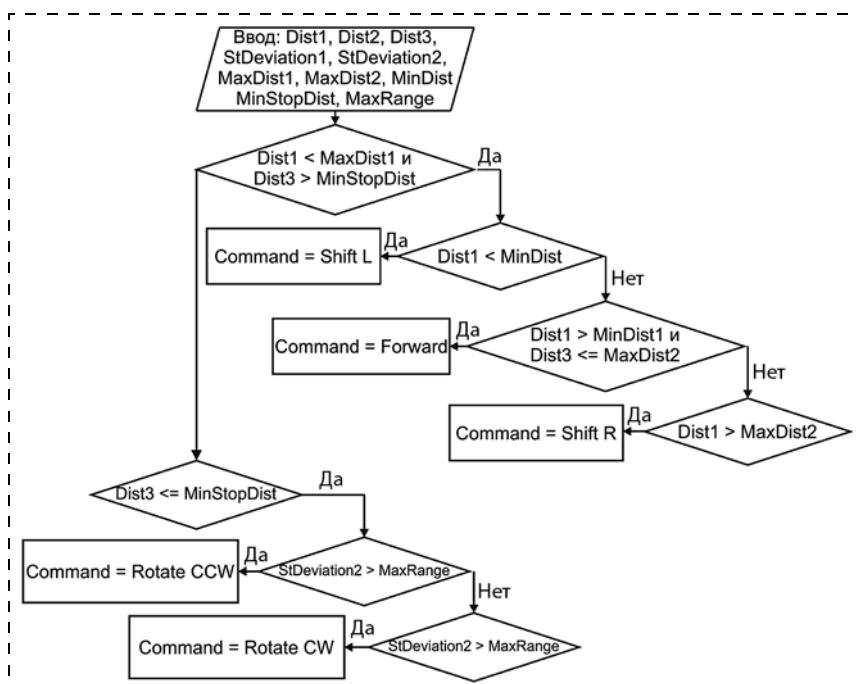


Рис. 3. Блок-схема функции DirectionMotion

ченных от опорного и контрольного дальномеров. Дисперсия рассчитывается по формуле

$$D[X] = \frac{\sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n X_i\right)^2}{n}}{n-1}, \quad (1)$$

где X — случайная величина (значение с дальномера), n — число элементов последовательности;

среднеквадратическое отклонение — по формуле

$$\sigma = \sqrt{D[X]}. \quad (2)$$

Для расчета среднеквадратических отклонений значений, полученных от опорного и контрольного дальномеров, был выбран шаг длиной в пять измерений расстояния. Рассчитанные таким образом данные используются в качестве указателя стороны поворота, а также играют важную роль в построении схемы помещения;

4) генерация команд управления функцией DirectionMotion. Список команд, доступных для управления ПТС:

- движение вперед (Forward);
- поворот против часовой стрелки (Rotate CCW);
- поворот по часовой стрелке (Rotate CW);
- смещение вправо (Shift R);
- смещение влево (Shift L).

Команды управления представляют собой числовые значения, но для удобства в статье применяются их буквенно-символьные обозначения, которые были перечислены выше;

5) формирование строки сообщения. Сообщение отправляется на одноплатный компьютер Raspberry Pi или аналогичный. Затем полученное сообщение раз-

деляется на составные части, каждая из которых содержит свой сегмент данных. Данные, которые формируют сообщение, необходимы также для построения схемы помещения. Пере-
сылаемое сообщение содержит в себе:

- команду управления двигателями;
- дистанцию до опорной стены;
- среднеквадратическое отклонение значений дистанции от опорного дальномера.

Все перечисленные этапы повторяются в цикле, пока РПТС находится во включенном состоянии.

Функция DirectionMotion

На рис. 3 изображена блок-схема функции DirectionMotion.

В функции DirectionMotion происходит сравнение значений расстояния, полученных от опорного дальномера Dist1, с крайними значениями дистанции MaxDist1, MaxDist2 и MinDist, где MaxDist1 — максимальная дистанция, при которой данные с дальномера яв-

ляются достоверными, MaxDist2 и MinDist — границы диапазона значений расстояния до стены.

Также в функции DirectionMotion проверяется условие остановки/разворота. Данные от остановочного дальномера проходят проверку на минимально допустимую дистанцию до стены. Минимально допустимая дистанция хранится в переменной MinStopDist. В переменной MaxRange записано значение максимального среднеквадратического отклонения расстояния. Сравнивая среднеквадратические отклонения опорного и контрольного дальномеров с этой переменной, можно понять, с какой стороны в данный момент времени находится стена, а с какой пустота, так как значение среднеквадратического отклонения при направлении дальномера в пустоту увеличивается благодаря техническим особенностям используемых дальномеров.

Значения переменных MaxDist1, MaxDist2, MinDist, MinStopDist и MaxRange подбираются эмпирическим путем в зависимости от конфигурации исследуемого помещения и скорости движения РПТС.

Следует отметить, что РПТС двигался против часовой стрелки в заданном помещении. При движении по часовой стрелке необходимо инвертировать команды.

Построение схемы исследуемого помещения

Понятие "схема-прототип"

Разработка алгоритма построения схемы помещения потребовала введения нового понятия "схема-прототип". Схема-прототип помещения — это схема помещения, в которой не учитывается вся кривизна стен. Такая схема не отображает углубления и выступы, габаритные размеры которых менее одного метра. Также схема-прототип может отображать как все помещение, так и только его часть.

Сама по себе схема-прототип не является планом или схемой помещения, однако она дает представление о реальной конфигурации исследуемого помещения, что делает возможным использование схемы-прототипа для автоматической ориентации РПТС.

Алгоритм построения схемы-прототипа помещения

Для построения схемы-прототипа помещения используются следующие данные: управляющие команды РПТС, расстояния, снятые с опорного дальномера, и среднеквадратическое отклонение значений этих расстояний. Построение схемы-прототипа состоит из трех основных этапов:

1) фильтрация команд. Из сгенерированного списка команд удаляются (заменяются) команды с неявным поворотом, т. е. те команды Rotate CW и Rotate CCW, при подаче которых РПТС не совершал поворот, а лишь подруливал перед препятствием. Для обнаружения неявного поворота приме-

няется анализ длины участка подряд идущих повторяющихся команд. Во время тестирования было установлено, что при повторении команды на поворот менее пяти раз РПТС выполнял подруливание. Таким образом, обнаруженный участок, состоящий менее чем из пяти команд, удалялся из списка;

2) сохранение стартового расстояния до опорной стены. По умолчанию, РПТС до начала движения находится параллельно стене на оптимальной дистанции;

3) построение схемы-прототипа. Построение схемы-прототипа включает в себя несколько шагов:

- отслеживание изменения среднеквадратического отклонения расстояния до опорной стены. Считается, что если среднеквадратическое отклонение мало и не превышает определенного значения, полученного эмпирическим путем, то РПТС движется относительно параллельно с опорной стеной, т. е. угол отклонения минимален. В противном случае, если среднеквадратическое отклонение выходит за допустимое значение, считается, что РПТС либо проходит углубление в стене, либо опорный дальномер достиг максимального значения измерения расстояния, заложенного в него технически. Такая ситуация также может указывать на углубление или проем;
- построение точек прототипа. Построение схемы-прототипа происходит поточечно. Точки ставятся в соответствии со стартовым расстоянием до опорной стены, среднеквадратическим отклонением расстояния и командой управления. Если среднеквадратическое отклонение проходит проверку, то от центра рабочей области откладывается точка на стартовое расстояние. Иначе при обнаружении углубления в стене точки откладываются на расстояние, полученное в момент прохождения углубления. Здесь рабочей областью называется некое "полотно", на которое наносятся все точки схемы-прототипа. На этом этапе также происходит проверка команд управления. При этом учитываются только команды на поворот, так как после прохождения поворота необходимо изменить направление нанесения точек.

Результаты

В результате работы алгоритма автоматического передвижения РПТС прошел полный круг по заданному помещению (см. рис. 1). Во время движения РПТС собрал достаточное количество данных о помещении, в котором находится. Благодаря этим данным была сгенерирована схема-прототип исследуемого помещения, которая представлена на рис. 4.

Стоит заметить, что в представленной схеме не отображены углы помещения, так как при прохождении поворотов данные с опорного дальномера не являлись достоверными из-за движения РПТС. Также схема-прототип не отображает внутреннюю стену помещения. Внутренняя стена не обрабатывалась, потому что при движении РПТС против ча-

совой стрелки контрольный дальномер не давал достоверной информации о расстоянии до стены вследствие превышения максимально доступного для измерений расстояния.

Следует учесть еще тот факт, что в данной работе не учитывались внешние возмущающие факторы, такие как проскальзывания колес, так как не было данных о пройденном пути. В свою очередь, погрешность измерения дальномера была сведена к минимуму благодаря постфильтрации полученных от него данных, которая происходила непосредственно во время построения схемы-прототипа. Также, чтобы избежать "проблемы замыкания циклов" (slam loop closure problem), при построении схемы-прототипа были введены некоторые правила. В соответствии с ними РПТС при приближении к стене всегда делал поворот на 90° против часовой стрелки, затем проезжал точно такое же расстояние, что и до поворота. При отсутствии данных о пройденном пути считалось, что от поворота до поворота РПТС всегда проходит одно и то же расстояние из-за планировки помещения.

Несмотря на то, что схему-прототип удалось построить, использование ее для автоматической ориентации РПТС является нетривиальной задачей. В дальнейшем работа будет направлена на повышение точности схемы. Предполагается использовать данные с трехосевого цифрового магнитометра [15], акселерометра и гироскопа [16], чтобы иметь больше информации об ориентации РПТС в пространстве. Также для более точного позиционирования схемы необходимо знать, какую дистанцию прошел РПТС и с какой скоростью. Для получения подобных данных необходимо установить одометр [17] и энкодер [18].

Список литературы

1. **SLAM** — принципы и ссылки на open source. URL: <http://my-it-notes.com/2013/01/slam-basis-and-links-at-open-source/>

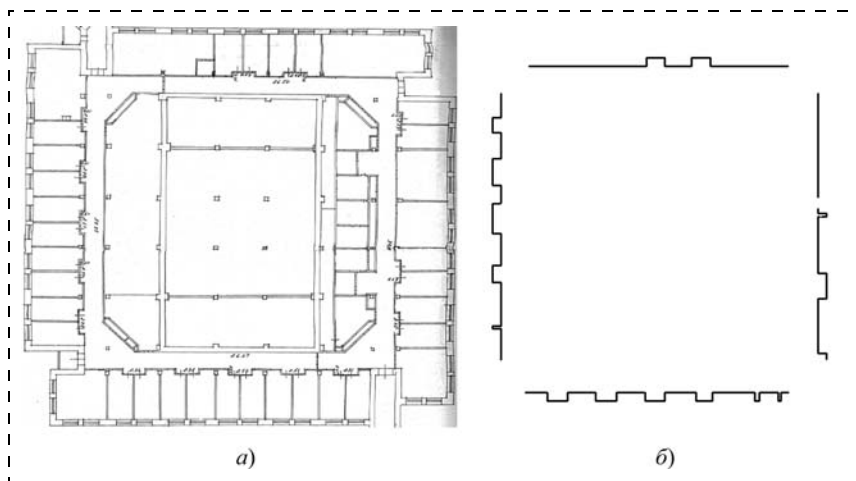


Рис. 4. Реальная схема помещения (а) и сгенерированная схема-прототип (б)

2. **SLAM**. Разработка роботов. URL: <http://robot-develop.org/archives/3954>
3. **Delphi**. Сканирующий лазерный дальномер. Разработка роботов. URL: <http://robot-develop.org/archives/3700>
4. **Лидар**. URL: <http://systemsauto.ru/active/lidar.html>
5. **Минин А. А.** Навигация и управление мобильным роботом, оснащенным лазерным дальномером: Автореф. дис. канд. техн. наук. Москва, 2008. 18 с.
6. **Ультразвуковой датчик измерения расстояния HC-SR04**. URL: <http://robocraft.ru/blog/electronics/772.html>
7. **ИК-дальномеры SHARP**. URL: http://roboforum.ru/wiki/ИК-дальномеры_SHARP
8. **Датчик измерения расстояния SHARP-GP2Y0A710K0F** — расчет расстояния. URL: <http://robocraft.ru/blog/arduino/770.html>
9. **Soga Laser Ranging Module Preview**. URL: <http://www.elec-freaks.com/7180.html>
10. **Машинное зрение**. URL: <http://robodem.ru/machinevision>
11. **Arduino Uno**. URL: <http://arduino.ru/Hardware/Arduino-BoardUno>
12. **Raspberry Pi 2 model B**. URL: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-2-model-b/>
13. **Орлов А. И.** Дисперсия случайной величины // Математика случая: Вероятность и статистика — основные факты. М.: МЗ-Пресс, 2004.
14. **Боровиков В.** STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов. СПб.: Питер, 2003. 688 с.
15. **Работа с магнитометром HMC5883L**. URL: http://avr-project.ru/publ/kak_podkluchit/rabota_s_magnitometrom_hmc5883l/2-1-0-150
16. **Акселерометр и гироскоп MPU6050**. URL: <http://cxem.net/mc/mc324.php>
17. **Одометр**. URL: <http://autodrop.ru/stati/517-chto-takoe-odometr.html>
18. **Энкодер**. URL: <http://robocraft.m/blog/technology/734.html>

Automatic Moving of a Robotic Mobile Device Making a Map of a Building

A. V. Smirnov, asmirnov_1991@mail.ru, **A. Yu. Bezzubtcev**, mannaz2012@mail.ru,
The Program Systems Institute of Russian Academy of Science,
Pereslavl-Zalessky, 152021, Russian Federation

Corresponding author: **Smirnov Alexander V.**, Engineer,
The Program Systems Institute of Russian Academy of Science, Pereslavl-Zalessky,
152021, Russian Federation, e-mail: asmirnov_1991@mail.ru

Received on January 19, 2016

Accepted on January 29, 2016

This article describes methods of solving problems of automatic navigation of robotized mobile devices inside of a building. A robotized mobile device has tracks and can move back and forth and turn right-hand and left-hand. Micro controller based on Arduino is responsible for receiving and processing of information taken from sensors. Analysis of the data occurs directly onboard of a robotized mobile device using a single-board computer Raspberry Pi or some kind of it. The article shows a method and an algorithm of a robotized mobile device to follow the path and then make a map of a particular building. While moving a robotized mobile device records in memory the data received from sensors. Then it processes the data and forms a map of the building. The relevance of this work is that the most common navigation systems using GPS (Global Positioning System) / GLONASS (GLObal NAVigation Satellite System) don't work in those conditions when a robotized mobile device is located in buildings, such as a room or a building hallway. A satellite signal is lost while going through cemental, metal or wooden constructions. The algorithms presented in the article are based on the properties of the standard deviation values of the distance to objects surrounding a robotized mobile device. The data were obtained through a set of range finders, which was installed onboard of a robotized mobile device, without using a complex and expensive scanning device. Developed algorithms have an advantage, they can work in a building without reference to GPS or GLONASS. The main features of the algorithm are simplicity, low price and accessibility of the used hardware.

Keywords: robotized mobile devices, map of a building, dispersion, the standard deviation, a set of rangefinders, pathfinder

For citation:

Smirnov A. V., Bezzubtcev A. Yu. Automatic Moving of a Robotic Mobile Device Making a Map of a Building, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 6, pp. 395—400.

DOI: 10.17587/mau.17.395-400

References

1. **SLAM** — *principy i ssylkina open source* (SLAM — principles and references to open source), available at: <http://my-it-notes.com/20.13/01/slam-basis-and-links-at-open-source/> (accessed 17.07.2015).
2. **SLAM**. Robot-develop, available at: <http://robot-develop.org/archives/3954> (accessed 17.07.2015).
3. **Delphi skanirujushhij lazernyj dal'nomer** [Scanning range finder]. Robot-develop, available at: <http://robot-develop.org/archives/3700> (accessed 17.07.2015).
4. **Lidar** [Light Detection and Ranging], available at: <http://systemsauto.ru/active/lidar.html> (accessed 17.07.2015).
5. **Minin A. A.** Navigacija i upravlenie mobil'nym robotom, osnashhennym lazernym dal'nomerom: Avtoref. dis. kand. tehn. nauk, Moskva, 2008, 18 p.
6. **Ul'trazvukovoj datchik izmerenija rasstojanija HC-SR04** (Ultrasonic ranging module HC-SR04), available at: <http://robocraft.ru/blog/electronics/772.html> (accessed 17.07.2015).
7. **IK-dal'nomery SHARP** (IR range finders), available at: http://roboforum.ru/wiki/ИК-дальномеры_SHARP (accessed 17.07.2015).
8. **Datchik izmerenija rasstojanija SHARP-GP2Y0A710K0F — raschi ot rasstojanija** (The sensor measurement range SHARP-GP2Y0A710K0F — calculation of distance), available at: <http://robocraft.ru/blog/arduino/770.html> (accessed 17.07.2015).
9. **Soga Laser Ranging Module Preview**, available at: <http://www.elec freaks.com/7180.html> (accessed 17.07.2015).
10. **Computer vision**, available at: <http://robodem.ru/machinevision> (accessed 17.07.2015).
11. **Arduino Uno**, available at: <http://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardUno> (accessed 17.07.2015).
12. **Raspberry Pi 2 modelB**, available at: <http://www.raspberrypi.org/products/raspberrypi-2-model-b/> (accessed 17.07.2015).
13. **Orlov A. I.** *Dispersija sluchajnoj velichiny, Matematika sluchajaj: Verojatnost' i statistika — osnovnyefakty* (The variance of the random variable, Mathematics cases: Probability and statistics — key facts), Moscow, Progress, 2003, 2004 (in Russian).
14. **Borovikov V.** *Statistica. Iskustvo analizadannyh na komp'jutere: Dlja professionalov* (The art of data analysis on the computer: For professionals), Peterburg, Progress, 2003, 688 p. (in Russian).
15. **Rabota s magnitometrom HMC5883L** (Working with the magnetometer HMC5883L), available at: http://avrproject.ru/publ/kak-podkljuchit-rabota_s-magnitometrom-hmc5883l/2-1-0-150 (accessed 17.07.2015).
16. **Akselerometr i giroskop MPU6050** (Accelerometer and gyroscope MPU6050), available at: <http://cxem.net/mc/mc324.php> (accessed 17.07.2015).
17. **Odometer**, available at: <http://autodrop.ru/stati/517-chto-takoe-odometr.html> (accessed 17.07.2015).
18. **Encoder**, available at: <http://robocraft.ru/blog/technology/734.html> (accessed 17.07.2015).

УДК [004.896: 004.932]: [681.586: 519.712]

DOI: 10.17587/mau.17.400-406

Нгуен Туан Зунг, науч. сотр., dunghvkt@yahoo.com,

Вьетнамская академия наук и технологий,

И. А. Щербатов, канд. техн. наук, доц., sherbatov2004@mail.ru,

О. М. Проталинский, д-р техн. наук, проф., protalinskiy@gmail.com,

Астраханский государственный технический университет

Система управления мобильным роботом на основе модифицированного алгоритма 3D-pointcloud

Предложена система управления мобильным роботом в зданиях и сооружениях, в основу которой положена методика построения траекторий движения с использованием сенсора глубины датчика Kinect. Синтезирован модифицированный алгоритм 3D-pointcloud, обеспечивающий решение задачи перемещения робота без столкновений с препятствиями. Показаны результаты экспериментов, подтверждающие эффективность изложенного в работе подхода.

Ключевые слова: датчик глубины, робот, SURF, 3D-pointcloud, распознавание образов, библиотека FLANN, система управления, траектория робота, предотвращение столкновений робота, навигация

Введение

Одной из основных задач управления мобильными роботами является необходимость объезда препятствий. При управлении движением робота используются системы навигации, базирующиеся на различных датчиках (например, стереокамеры [1, 2], электронный компас, инклинометр, сонар [3] и т. д.). Функциональность применяемых подходов зависит от эффективности и быстродействия алгоритмов распознавания и отслеживания препятствий. Для этих целей обычно применяются два класса методов: распознавание объектов на основе RGB-изображений (метод 1) [4–6] и пространственно-временной (метод 2) [7, 8]. Первый класс методов во многих случаях приводит к снижению точности распознавания и увеличению вычислительных мощностей из-за различий в изменении условий освещения и углов зрения средств фиксации изображения. Для устранения указанных недостатков применяется второй класс методов, обеспечивающих обнаружение препятствий на основе характерных областей изображения.

При навигации мобильных роботов планирование пути — это определение оптимальной траектории между начальной и целевой точками без столкновения с препятствиями [9, 10]. Как правило, траектория разделяется на линейные сегменты. В фазе навигации робот перемещается по этим сегментам [3]. Для вычисления безопасных кратчайших траекторий предложены несколько методов, использующихся при локальном или глобальном планировании движения [1]. Планирование глобального пути учитывает всю информацию об окружающей среде, и для этих целей применяется ряд методов: планирование Вороного [11, 12], сотовая декомпозиция (cell decomposition) [13] и т. д. Реализация этих подходов требует значительного времени на этапе предварительного расчета и использования вспомогательного аппаратного оборудования для увеличения быстродействия [12]. Основным недостаток — необходимость создания базы образов препятствий окружающего пространства для построения его топологии и связности объектов.

Алгоритмы локального планирования разработаны для предотвращения столкновения с препятствиями в непосредственной близости от робота. Для этого используется только информация о ближайших препятствиях. Наиболее известными являются методы на основе потенциальных полей [14], в которых пространство разделено регулярными сетками, на основе которых обеспечивается поиск оптимального пути без столкновения с препятствиями. Эти методы являются достаточно быстродействующими, но не позволяют предотвратить попадание в бесконечный цикл (локальные минимумы потенциальной функции). Для исключения проблемы локальных минимумов и получения оптимального пути используется подход, описанный

в работе [2] и обеспечивающий нахождение "грубой" траектории с последующим уточнением методами оптимизации.

При управлении роботом существует ряд трудностей в обнаружении препятствий и применении алгоритма планирования движения. Для их устранения необходимо разработать методику, использующую информацию о глубинах изображений, например от датчика Kinect, и алгоритм навигации робота для перемещения без столкновений. Для этого требуется решить три взаимосвязанные подзадачи: реализовать алгоритм 3D-Pointcloud для обнаружения любых препятствий в ближней зоне робота и алгоритм SURF для распознавания ориентиров; синтезировать методику построения карты препятствий; синтезировать алгоритм управления роботом.

Общий алгоритм работы системы

Датчик Kinect позволяет получать карту глубин изображения и имеет ряд преимуществ перед другими датчиками, работающими при низком уровне освещенности, позволяя получать калиброванную масштабную оценку, инвариантную по отношению к цвету и текстуре. Получаемые изображения глубины имеют разрешение 640×480 пикселей при 30 кадрах в секунду. Схема работы системы управления роботом показана на рис. 1. Методика включает три основных этапа: обнаружение препятствий, построение карты препятствий и построение траекторий.

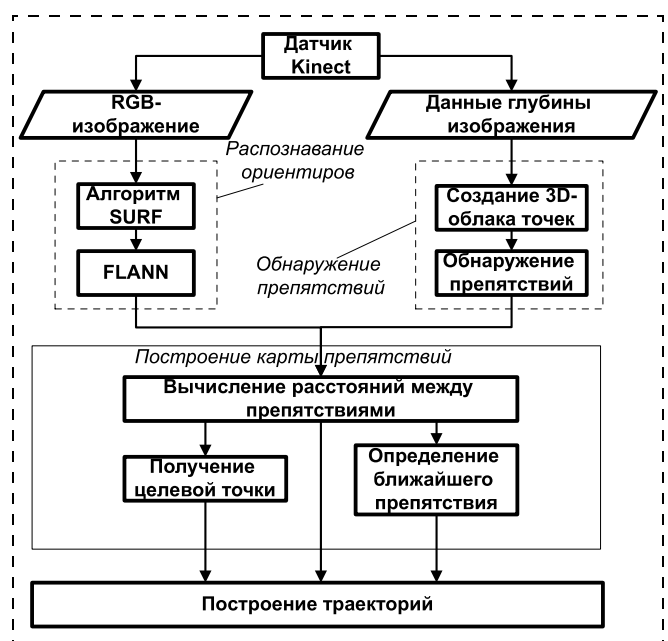


Рис. 1. Общая схема методики управления роботом

Распознавание ориентиров и обнаружение препятствий

Распознавание ориентиров (объектов) в потоке видеоданных является сложной задачей, для решения которой обычно применяются алгоритмы, использующие статистические выборки на основе локальных особенностей (например, HOG — Histograms of Oriented Gradients, EOH — Edge orientation histograms [15]), а также алгоритмы на основе извлечения особых точек изображения (например, SIFT — Scale Invariant Feature Transform [6], SURF — Speeded Up Robust Features [5]).

Алгоритм SURF является более предпочтительным по сравнению с другими [4]. Эффективность нахождения объектов с использованием алгоритма SURF можно увеличить за счет совместного применения библиотеки FLANN (рис. 2, 3, см. вторую сторону обложки) [16]. Требуемые скорость и точность распознавания также обеспечиваются и при движении самого робота. Эффективность обнаружения препятствий (подвижных и неподвижных объектов) в режиме реального времени с применением 3D-облака точек доказана в работе [17].

Облака точек — набор неорганизованных иррегулярных точек в трехмерном пространстве. Облака точек хранят координаты всех точек в ближней зоне мобильного робота, а также RGB-цвета, значения интенсивности и т. д. 3D-облака точек могут быть получены из карты глубины изображения, полученной от датчика Kinect (рис. 4).

Эффективность данной схемы выше, чем традиционных алгоритмов, которые базируются на изображениях, полученных из видимого спектра, по аналогии с тем, как это воспринимается человеческим глазом [18]. При этом применение алгоритма понижения разрешения и DBSCAN (плотностный алгоритм кластеризации пространственных данных с присутствием шума) [19] существенно увеличивает быстродействие алгоритма распознавания объектов и повышает его точность.

Построение карты препятствий

Окружающая среда робота очень сложна из-за различий при изменении условий освещения, углов зрения и наличия препятствий (подвижных и неподвижных). Кроме того, состояние окружающей среды может изменяться достаточно быстро, что приводит к снижению точности управления. Поэтому построение карты препятствий является ключевым этапом. Для перемещения без столкновений робот должен обладать информацией о препятствиях (например, о текущем местоположении, размерах

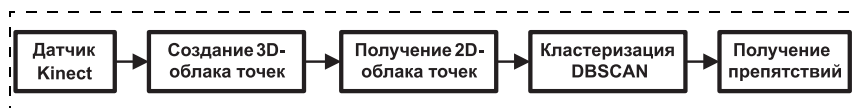


Рис. 4. Общая схема обнаружения препятствий

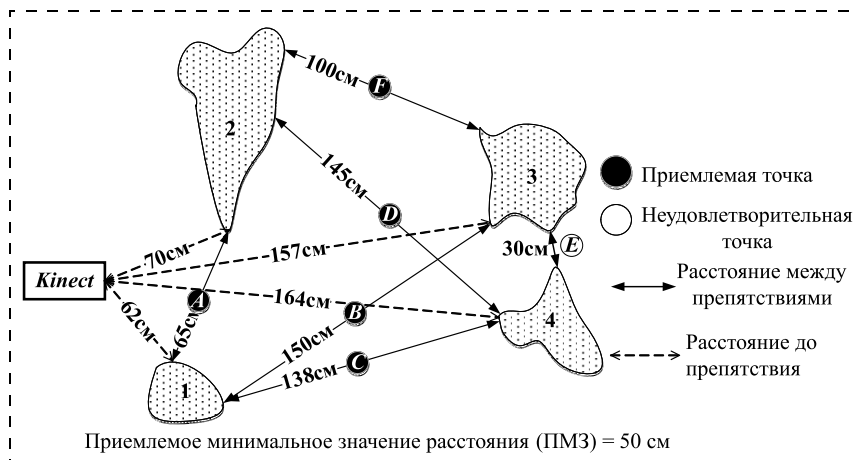


Рис. 5. Пример построения карты препятствий

препятствий и т. д.). Построение карты препятствий показано на рис. 5.

Алгоритм обеспечивает решение трех подзадач:

- получение информации о препятствиях;
- вычисление расстояний от датчика Kinect до препятствий и наименьших расстояний между препятствиями;
- получение требуемых точек: получение границ препятствия;
- сортировка расстояний от датчика Kinect до каждого препятствия в порядке от ближайшего к наиболее удаленному, а также формирование спи-

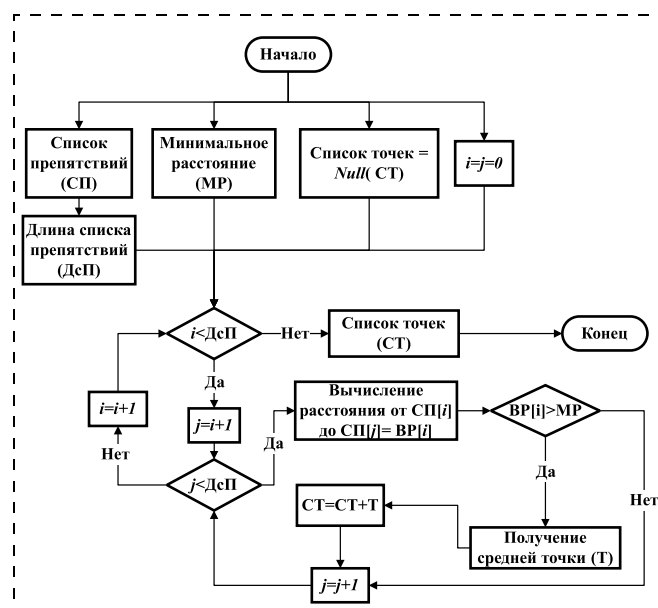


Рис. 6. Блок-схема алгоритма построения карты препятствий

ска препятствий (множества СП); вычисление расстояний от любого препятствия до остальных препятствий (получение множества СР); вычисление средней точки линии между препятствиями на основе множества СР. Если длина этой линии больше, чем приемлемое минимальное значение (ПМЗ), то средняя точка является допустимой (точки A, B, C, D, F на рис. 5), в противном случае — нет (точка E). Все допустимые точки сохраняются в множестве точек СТ. Реализующий данный подход алгоритм представлен на рис. 6.

Построение траекторий движения робота

Препятствия представляются многоугольниками на основе изображений, получаемых от датчика Kinect, и имеют реальные геометрические размеры, что наряду со свободными областями пространства позволяет вычислить траекторию перемещения робота из начальной точки в целевую.

Вычисление расстояния между препятствиями осуществляется по паре антипод между полигонами, представляющими препятствия, для случаев "вершина—вершина"; "вершина—граница"; "граница—граница".

Таким образом, выбор точки, в которую следует переместиться, обусловлен расстоянием до препятствия и наличием "свободного" прохода, т. е. расстояния между препятствиями, превышающего геометрические размеры фронтального сечения робота.

Построение траектории — поиск минимального пути от начальной точки до целевой, характеризующегося стоимостью пути. Стоимость пути — расстояние, которое проходит робот из текущего положения в целевое (сумма длин отрезков траектории между ними).

В общем случае стоимость пути является произвольной функцией дискретного пути — $F(P)$. Тогда стоимость пути — сумма стоимостей участков траектории, пройденных до точки p_i , $G(p_i)$ и стоимости перемещения от текущей точки до следующей $H(p_i, p_i + 1)$:

$$F(P) = G(p_i) + H(p_i, p_i + 1).$$

Обе функции G и H могут быть произвольными. Для типичных ситуаций функция G будет представлять собой стоимость прохождения через заданные точки к текущей точке p_i , а H — евклидово расстояние между точками p_i и $p_i + 1$.

Для нахождения минимальной стоимости пути обычно применяется алгоритм "А*" (рис. 7), используемый для поиска пути при обходе графа или в процессе составления эффективного плана прохождения пути между точками и т. д. В общем случае алгоритм находит путь от начального узла к узлу назначения. Эвристика используется для классификации каждого узла в соответствии с оценкой оптимального маршрута через этот узел, т. е. просматриваются узлы в порядке эвристической оценки.

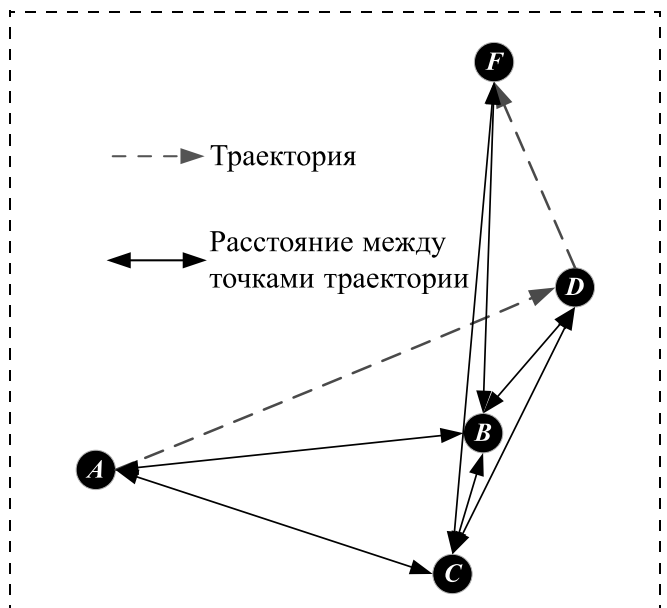


Рис. 7. Применение алгоритма А* для построения траекторий

Алгоритм просматривает все траектории от начальной вершины до конечной в целях поиска траектории, минимальной по стоимости. На каждом этапе обрабатывается множество траекторий из начального узла до всех нераскрытых вершин, размещающихся в очереди с приоритетом, определяемым по значению:

$$f(n) = g(n) + h(n);$$

$$g(n) = \sum_{i=1}^n d(i); d(i) = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2};$$

$$h(n) = \sqrt{(x_n - x_0)^2 + (y_n - y_0)^2},$$

где $g(n)$ — стоимость пути от начальной точки к точке n ; $h(n)$ — расстояние до цели (или до начальной точки) по прямой линии; x_0, y_0 — координаты начальной точки в плоскости перемещения; $d(i)$ — евклидово расстояние между точками с координатами x_i, y_i и x_{i-1}, y_{i-1} (текущей и предшествующей i -му моменту времени); x_n, y_n — координаты целевой точки.

Представим синтезированный алгоритм в следующем виде:

```
создать открытый перечень узлов, содержащий
только начальный узел;
создать закрытый пустой перечень узлов;
while (не достигнута цель)
{ рассмотреть возможность лучшего узла в открытом
списке (узел с наименьшим значением  $f$ )
  If (текущий узел является целью)
  { конец
  }
  Else
  { переместить текущий узел в закрытый список и
рассмотреть всех его соседей
```

For (каждый сосед)

If (этот сосед находится в закрытом списке и текущее значение g меньше)

{ обновить соседа с новым, более низким значением g ; изменить родительский узел соседа на текущем узле

}

Elseif (этот сосед находится в открытом списке и текущее значение g меньше)

{ обновить соседа с новым, более низким значением g ; изменить родительский узел соседа на текущем узле

}

Else (сосед не в открытом или закрытом списке)

{ Добавить соседа к открытому списку и установить его со значением g

}

}

}

Алгоритм работает пока значение $f(\cdot) = \min$ для целевой вершины, т. е. обеспечено решение с наименьшей стоимостью: чем меньше $h(\cdot)$, тем выше приоритет. Поэтому для реализации очереди используются сортирующие деревья.

Предотвращение столкновений с препятствиями

После построения карты препятствий окружающей среды и создания предварительно вычисленной траектории робот начинает движение в момент получения данных от датчика Kinect. Эти данные непрерывно превращаются в облако точек. Если траектория пересекается с новыми препятствиями или расстояние до препятствий меньше, чем ПМЗ, то робот останавливается. После этого текущее облако точек добавляется к карте препятствий и создается новая карта окружающей среды. После получения новой карты препятствий алгоритм вычисляет другой короткий безопасный путь от текущей позиции робота к цели. Однако предыдущий путь сохраняется, и если препятствия, блокирующие перемещения, исчезают, то робот продолжает движение в соответствии с предыдущей траекторией, т. е. алгоритм не зависит от динамических изменений окружающей среды.

Эксперименты и анализ результатов

Эксперименты проводили на ЭВМ со следующими характеристиками: центральный процессор Intel Pentium Duo T2390 с частотой 1,87 ГГц, объем оперативной памяти 1 Гб, объем видеопамати 256 Мб. Программная реализация обеспечивается применением библиотек FLANN, OpenCV и EMGUCV в среде Visual Studio C# 2010.

Условия окружающей среды для выполнения экспериментов: робот движется внутри зданий, параметры окружающей среды — минимальное рас-

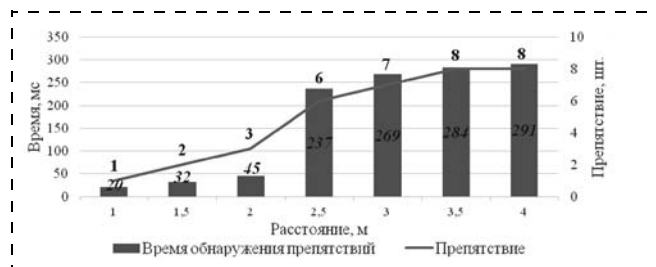


Рис. 9. Результаты применения алгоритма "3D-pointcloud"

Результаты экспериментов по управлению роботом

Параметры	Значения							Среднее
Расстояние, м	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	2,5
Препятствие, шт.	1	2	3	6	7	8	8	5
Время обнаружения препятствий (1)	20	32	45	237	269	284	291	168,29
Время построения карты препятствий (2)	8	7	20	183	279	346	356	171,29
Время создания траектории (3)	2	3	8	40	58	62	53	32,286
Общее время (1 + 2 + 3)	30	42	73	460	606	692	700	371,86

стояние от робота 0,4 м, максимальное расстояние от робота 8 м, высота 2 м; в окружающей среде много препятствий (существуют подвижные и неподвижные объекты), их число изменяется; условия освещения и углы зрения изменяются быстро. Предлагаемая методика обнаружения препятствий использует алгоритм 3D-pointcloud и обеспечивает успешное обнаружение препятствий даже при условии отсутствия хорошего освещения (рис. 8, см. вторую сторону обложки).

Из рис. 9 и таблицы следует, что производительность алгоритма является наиболее высокой, если максимальное расстояние до препятствия составляет менее 2,5 м. Время управления движением робота разделяется на три основных составляющих (см. таблицу): время обнаружения препятствий (ВОП); время построения карты препятствий (ВПК); время создания траектории (ВСТ):

$$ОВ = ВОП + ВПК + ВСТ.$$

Данные экспериментов показывают, что для построения траектории движения робота следует применять алгоритм 3D-Pointcloud для обнаружения препятствий и создания карты препятствий, а для построения траектории движения робота можно использовать алгоритм "А*". Для удобства сравнения полученных в рамках исследования результатов все полученные данные сведены к одной диаграмме, демонстрирующей эффективность предложенной в работе методики и алгоритмов (рис. 10, см. вторую сторону обложки).

Заключение

Данные экспериментов показывают, что для построения траектории движения следует использовать алгоритм 3D-Pointcloud (для обнаружения препятствий и создания карты препятствий) совместно с алгоритмом "А*". Структурная схема системы управления роботом, использующая синтезированную методику создания траекторий движения робота на основе данных, получаемых от датчика Kinect, и разработанные модифицированные алгоритмы, показана на рис. 11.

Разработанные алгоритмы могут применяться для любых дальномеров и стереокамер, которые возвращают цветные кадры и изображения глубины, так как описанные алгоритмы используют данные об удаленности объектов от сенсора и устойчивы к видимому спектру света (могут функционировать в полной темноте, не требуя подсветки).

Список литературы

1. Hwang Y., Ahuja N. Gross motion planning — a survey // ACM Computing Surveys. 1992. 24 (3). P. 219—291.
2. Cunha S., de Matos A., Pereira F. An automatic path planning system for autonomous robotic vehicles Pereira // Proc. of International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation (IECON '93). 1993. Vol. 3, Maui, HI, USA. P. 1442—1447.
3. Hassouna Sabry M., Alaa E. Abdel-Hakim, Aly A. Farag. PDE-based robust robotic navigation // Computer Vision and Image Processing Laboratory (CVIP), Department of Electrical and Computer Engineering, University of Louisville, Louisville, KY 40292, USA. 2007. P. 10—18.
4. Juan L., Gwon O. A Comparison of SIFT, PCA-SIFT and SURF // International Journal of Image Processing (IJIP). 2009. Vol. 3, No. 4. P. 143—152.
5. Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Van Gool L. Speeded-Up Robust Features (SURF) // Computer Vision and Image Understanding, June 2008. Vol. 110, Iss. 3. P. 346—359.
6. Ramisa A., Vasudevan S., Aldavert D., Toledo R., Lopez de Mantaras R. Evaluation of the SIFT Object Recognition Method in Mobile Robots. URL: http://www.iitaa.csic.es/~mantaras/sift_eval.pdf.
7. Носков В. П., Носков А. В. Навигация мобильных роботов по дальнометрическим изображениям // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 12. С. 16—21.
8. Mojtahedzadeh R. Robot Obstacle Avoidance using the Kinect. Master of Science Thesis Stockholm, Sweden, 2011. 61 p.
9. Murphy R. Introduction to AI Robotics. MIT press, 2000. 400 p.
10. Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Van Gool L. Path planning using lazy prm // Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 1997. P. 333—338.
11. Rao N. S. V., Hareti S., Shi W., Iyengar S. Robot navigation in unknown terrains: introductory survey of non-heuristic algorithms // Oak Ridge National Laboratory, Technical Report ORNL/TM-12410. 1993.

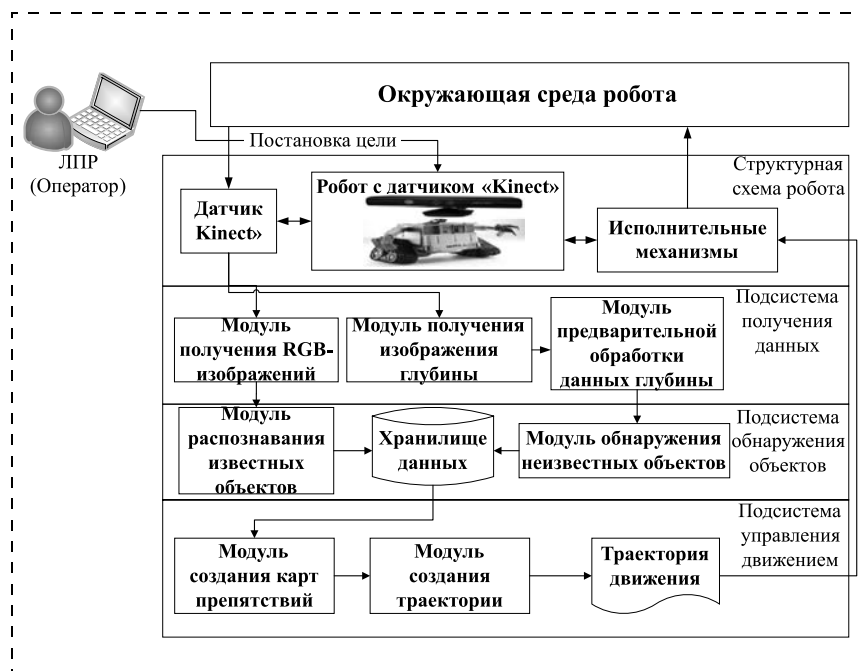


Рис. 11. Структурная схема системы управления роботом

12. Hoff K., Culver T., Keyser J., Lin M., Manocha D. Interactive motion planning using hardware-accelerated computation of generalized Voronoi diagrams // Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2000. P. 2931—2937.
13. Zhu D., Latombe J. New heuristic algorithms for efficient hierarchical path planning // IEEE Transaction on Robotics and Automation. 1991. 1 (1). P. 9—20.
14. Hwang Y. K., Ahuja N. Potential field approach to path planning // IEEE Transaction on Robotics and Automation. 1992. 8 (1). P. 23—32.
15. Navneet Dalai, Bill Triggs. Object Detection using Histograms of Oriented Gradients. URL: <http://www.webcitation.org/6DvoEuAvL>.
16. Нгуен Туан Зунг, Щербатов И. А. Распознавание объектов в системе технического зрения мобильного робота: использование библиотеки FLANN и алгоритма SURF // Прикаспийский журнал управление и высокие технологии. — 2014. № 4. С. 65—76.
17. Нгуен Туан Зунг, Щербатов И. А. Совместное распознавание подвижных и неподвижных объектов в системе технического зрения робота // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 7. С. 464—470.
18. Shcherbatov I. A., Nguyen Tuan Dung. Speed up algorithms for obstacles detection in the robot vision system using point cloud // Creativity in Intelligent Technologies and Data Science. 2015. P. 673—683. DOI: 10.1007/978-3-319-23766-4_53.
19. Chakraborty S., Nagwani N. K., Dey L. Performance Comparison of Incremental K-means and Incremental DBSCAN Algorithms // International Journal of Computer Applications (0975 — 8887). August 2011. Vol. 27, No. 11. P. 14—18.
20. Рассел С. Дж., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход / Пер. с англ. и ред. К. А. Птицына. М.: Вильямс, 2006. 1408 с.
21. Проталинский И. О., Елизаров Д. В., Кирилин С. А. Универсальная мобильная платформа для роботов, обслуживающих социальную и бытовую сферы // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2011. № 2. С. 49—54.

Mobile Robot Control System Based on a Modified 3D-Pointcloud Algorithm

Nguyen Tuan Dung, dunghvkt@yahoo.com, **I. A. Shcherbatov**, sherbatov2004@mail.ru✉, **O. M. Protalinskii**, protalinskiy@gmail.com, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, 414056, Russian Federation

Corresponding author: **Shcherbatov Ivan A.**, Ph. D., Associate Professor, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, 414056, Russian Federation e-mail: sherbatov2004@mail.ru

Received on January 20, 2016

Accepted on January 29, 2016

The control system of mobile robot (functioning in buildings and structures), based on the methods of trajectories construction using a depth gauge sensor Kinect. The general approach of the work is based on the sequential execution of three phases: obstacle detection, mapping and construction barriers trajectories. Recognition guidelines robot is implemented using an SURF algorithm and FLANN library. Their combined use provides effective recognition obstacle in the near zone of the mobile robot to the required accuracy in real time. Mapping obstacles (concave shells) and the estimate of the distance to the border barriers is based on getting the so-called acceptable points. For this purpose, using the algorithm implemented Pointcloud detection of different types of obstacles in the close range of the robot. Synthesized a modified 3D-pointcloud algorithm which provides a solution to the problem of the robot move without colliding with obstacles. These algorithms can be applied to any stereo cameras and rangefinders that return colored frames and image depth, as described algorithms use data on the distance of objects from the sensor and are resistant to the visible spectrum of light (can operate in total darkness, without requiring a backlight). Built three-level robot control system in buildings and structures on the basis of a modified algorithm of 3D-pointcloud. The results of experiments confirming the effectiveness of the above approach.

Keywords: kinect sensor, robot, SURF, 3D-point cloud, image recognition library FLANN, the control system, the trajectory of the robot, the robot collision avoidance, navigation

For citation:

Nguyen Tuan Dung, Shcherbatov I. A., Protalinskii O. M. Mobile Robot Control System Based on a Modified 3D-Pointcloud Algorithm, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 6, pp. 400–406.

DOI: 10.17587/mau.17.400-406

References

1. **Hwang Y., Ahuja N.** Gross motion planning — a survey, *ACM Computing Surveys*, 1992, 24 (3), pp. 219–291.
2. **Cunha S., de Matos A., Pereira F.** An automatic path planning system for autonomous robotic vehicles, *Proc. of International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation (IECON '93)*, Maui, HI, USA, 1993, vol. 3, pp. 1442–1447.
3. **Hassouna Sabry M., Alaa E. Abdel-Hakim, Aly A. Farag.** PDE-based robust robotic navigation, *Computer Vision and Image Processing Laboratory (CVIP)*, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Louisville, Louisville, KY 40292, USA, 2007, pp. 10–18.
4. **Juan L., Gwon O.** A Comparison of SIFT, PCA-SIFT and SURF, *International Journal of Image Processing (IJIP)*, 2009, vol. 3, no. 4, pp. 143–152.
5. **Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Van Gool L.** Speeded-Up Robust Features (SURF), *Computer Vision and Image Understanding*, June 2008, vol. 110, iss. 3, pp. 346–359.
6. **Ramisa A., Vasudevan S., Aldavert D., Toledo R., Lopez de Mantaras R.** Evaluation of the SIFT Object Recognition Method in Mobile Robots, available at: http://www.iia.csic.es/~mantaras/sift_eval.pdf.
7. **Noskov V. P., Noskov A. V.** Navigatsiya mobil'nykh robotov po dal'nometricheskim izobrazheniyam (Mobile Robot's Navigation by Means of 3-D Laser Images), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2005, no. 12, pp. 16–21 (in Russian).
8. **Mojtahedzadeh R.** Robot Obstacle Avoidance using the Kinect, Master of Science Thesis Stockholm, Sweden, 2011, 61 p.
9. **Murphy R.** Introduction to AI Robotics, MIT press, 2000, 400 p.
10. **Bohlin R., Kavraki L.** Path planning using lazy prm / R. Bohlin, *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 1997, pp. 333–338.
11. **Rao N. S. V., Hareti S., Shi W., Iyengar S.** Robot navigation in unknown terrains: introductory survey of non-heuristic algorithms, Oak Ridge National Laboratory, Technical Report ORNL/TM-12410, 1993.
12. **Hoff K., Culver T., Keyser J., Lin M., Manocha D.** Interactive motion planning using hardware-accelerated computation of generalized Voronoi diagrams, *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2000, pp. 2931–2937.
13. **Zhu D., Latombe J.** New heuristic algorithms for efficient hierarchical path planning, *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, 1991, 1 (1), pp. 9–20.
14. **Hwang Y. K., Ahuja N.** Potential field approach to path planning, *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, 1992, 8 (1), pp. 23–32.
15. **Navneet Dalal, Bill Triggs.** Object Detection using Histograms of Oriented Gradients, available at: <http://www.webcitation.org/6DvoEuAvL>.
16. **Nguyen Tuan Dung, Shcherbatov I. A.** Raspoznavanie ob'ektov v sisteme tekhnicheskogo zreniya mobil'nogo robota: ispol'zovanie biblioteki FLANN i algoritma SURF (Object recognition in machine vision system of mobile robot: the using of library FLANN and algorithm SURF), *Prikladnyy Zhurnal Upravlenie i Vysokie Tehnologii*, 2014, no. 4, pp. 65–76 (in Russian).
17. **Nguyen Tuan Dung, Shcherbatov I. A.** Sovmestnoe raspoznavanie podvizhnykh i nepodvizhnykh ob'ektov v sisteme tekhnicheskogo zreniya robota (Joint Recognition of the Moving and Stationary Objects in the Machine Vision Systems of Robots), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 7, pp. 464–470 (in Russian).
18. **Shcherbatov I. A., Nguyen Tuan Dung.** Speed up algorithms for obstacles detection in the robot vision system using point cloud, *Creativity in Intelligent Technologies & Data Science*, Volgograd State Technical University, Russia, Springer, September 15–17, 2015, pp. 673–683. DOI: 10.1007/978-3-319-23766-4_53.
19. **Chakraborty S., Nagwani N. K., Dey L.** Performance Comparison of Incremental K-means and Incremental DBSCAN Algorithms, *International Journal of Computer Applications* (0975 — 8887), August 2011, vol. 27, no. 11, pp. 14–18.
20. **Rassel S. Dzh., Norvig P.** Iskusstvennyi intellekt: sovremennyy podkhod (Artificial Intelligence: A Modern Approach), Trans. from English. and ed. K. A. Ptitsyna, Moscow, Vil'jams, 2006, 1408 p. (in Russian).
21. **Protalinskii I. O., Elizarov D. V., Kirilin S. A.** Universal'naya mobil'naya platform dlya robotov, obsluzhivayushchikh sotsial'nuyu i bytovuyu sfery (Universal mobile robotic platform for serving the social and domestic sphere), *Vestnik Astrahanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Seriya: Upravlenie, Vychislitel'naya Tekhnika i Informatika*, 2011, no. 2, pp. 49–54 (in Russian).

Ф. Н. Притыкин, д-р техн. наук, проф., **Д. И. Нефедов**, студент, 3demon@bk.ru,
Омский государственный технический университет

Исследование поверхностей, задающих границы области разрешенных конфигураций механизма мобильного манипулятора при наличии запретных зон

Предложен аналитический способ задания области в пространстве обобщенных координат, определяющей множество разрешенных конфигураций для механизма манипулятора мобильного робота с учетом различного расположения запретных зон. Исследованы поверхности, ограничивающие данную область. Результаты исследований позволяют сократить время расчета вектора обобщенных скоростей на этапе анализа виртуального взаимодействия механизма манипулятора с заранее известной окружающей средой.

Ключевые слова: виртуальное моделирование движений роботов, запретные зоны, синтез движений роботов

В настоящее время интенсивно ведутся работы, связанные с созданием интеллектуальных систем управления робототехническими системами. Данные исследования позволяют обеспечить автономное функционирование роботов при наличии запретных зон в рабочем пространстве [1—3]. Важной задачей является сокращение времени расчета, связанного с определением значения вектора приращений обобщенных координат при синтезе движений и наличии двигательной избыточности. Указанный вектор приращений вычисляют с учетом обеспечения заданного безопасного удаления исполнительного механизма манипулятора от запретных зон [4, 5]. В работах [6, 7] предложены алгоритмы синтеза движений механизмов манипуляторов, которые основаны на использовании анализа точек конфигурационного пространства, задающих разрешенные и запрещенные конфигурации. При этом конфигурационное пространство L_q задают осями системы координат, по направлению которых откладывают значения обобщенных координат q_i ($1 < i < n$), определяющих углы поворота в шарнирах (рис. 1, а, б). Единицами измерения по осям в этом случае принимаются градусы. Если конфигурация, определяющая положение кинематической цепи робота, удовлетворяет заданным требованиям, она считается разрешенной, в противном случае — неразрешенной. Исследованию области Λ конфигурационного пространства L_q , задающей точки множества разрешенных конфигураций для исполнительного механизма манипулятора мобильного робота "Варан", посвящены работы [8, 9]. Запретная зона при этом ограничивалась горизонтальной плоско-

стью, располагающейся сверху механизма манипулятора мобильного робота (для случая, когда движение осуществляется внутри туннеля). Однако предлагаемые математические модели в данных работах требуют некоторых дальнейших корректировок и уточнений. Необходимость аналитического способа задания замкнутой области Λ объясняется ее использованием при анализе взаимного положения механизма манипулятора и запретной зоны при виртуальном моделировании движений. Осо-

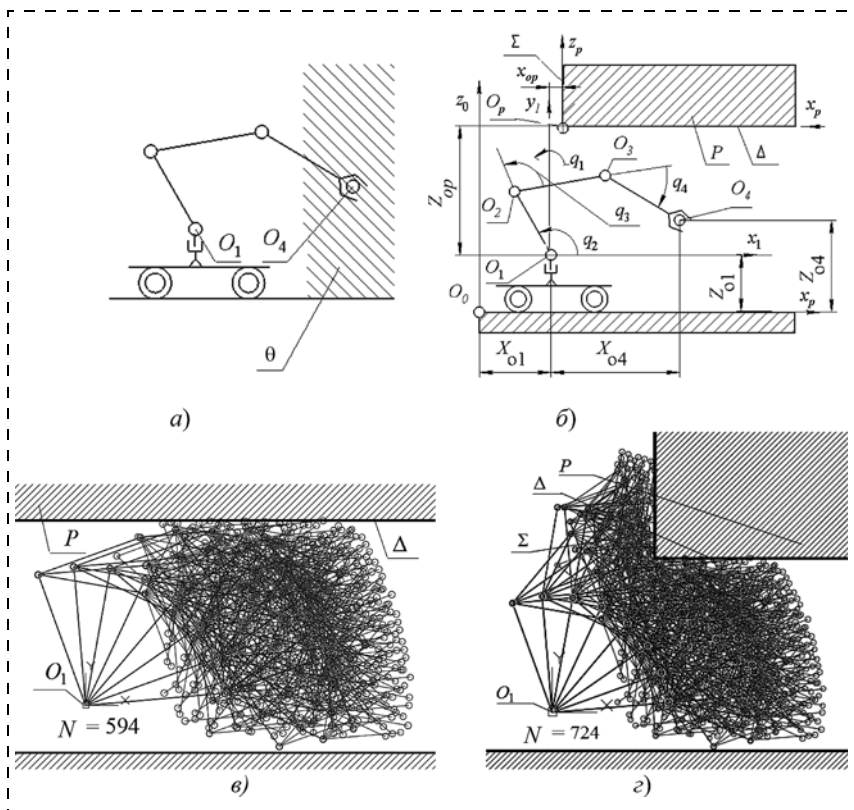


Рис. 1. Конфигурации механизма манипулятора мобильного робота:
a — изображение зоны $\bar{q}$; *б* — геометрические параметры, определяющие положения конфигураций и запретной зоны P ; *в*, *г* — изображения множества разрешенных конфигураций

бую актуальность имеют указанные исследования при наличии двигательной избыточности, когда число конфигураций в заданной точке рабочего пространства, удовлетворяющих заданной точности позиционирования, может достигать нескольких сотен. Предполагаемый подход позволяет свести задачу определения пересечения механизма манипулятора и запретной зоны, заданных совокупностью различных пространственных примитивов, к нахождению принадлежности точек пространства L_q области Λ . Это позволяет значительно сократить время расчета значений вектора обобщенных скоростей на каждой итерации при виртуальном моделировании движений.

Условимся положение механизма манипулятора, изображенного на рис. 1, *а, б*, задавать в пространстве L_q точкой. Исследуем область пространства L_q , которая определяет совокупность точек, задающих конфигурации, не пересекающие препятствие P , и координаты центра выходного звена которых принадлежат зоне θ , заданной неравенствами:

$$x_{o4} > 500 \text{ мм}, z_{o4} > 0. \quad (1)$$

Указанная зона θ изображена на рис. 1, *а* и представляет собой объединение двух зон, заданных неравенствами (1). Примем $q_1 = 0^\circ$, тогда размерность пространства конфигураций L_q будет равна трем. Точки пространства L_q при этом будем задавать в узлах сетки с шагом $\Delta q_i = 15^\circ$ (будем исследовать точки пространства L_g с шагом $\Delta q_i = 15^\circ$). На рис. 1, *б* показан геометрический смысл параметров x_{op} и z_{op} , характеризующих взаимное положение манипулятора и запретной зоны P . Положение манипулятора в инерциальной системе координат O_0 определяют координаты x_{o1} и z_{o1} , задающие начало системы $O_1x_1z_1$. Функционирование механизма манипулятора происходит в пределах ограниченной области Ω пространства L_q . Область Ω , в общем случае заданная гиперпараллелепипедом, имеет такой вид, что для любого значения вектора $\mathbf{q} = (0, q_2, q_3, q_4)$ выполняются неравенства

$$q_i^{\min} \leq q_i \leq q_i^{\max}, \quad i = 2, 3, 4, \quad (2)$$

где $q_i^{\min}$, $q_i^{\max}$ — нижние и верхние предельные значения обобщенных координат. Для рассматриваемого примера

$$q_i^{\min} = \begin{cases} 0^\circ, & i = 2; \\ -120^\circ, & i = 3; \\ -120^\circ, & i = 4; \end{cases} \quad q_i^{\max} = \begin{cases} 120^\circ, & i = 2; \\ 120^\circ, & i = 3; \\ 120^\circ, & i = 4. \end{cases}$$

Точки, не входящие в область Ω , называют запрещенными [6, 7]. Внутри области Ω могут также присутствовать точки, задающие запрещенные конфигурации, при которых происходит взаимное пересечение звеньев механизма. Данные точки необходимо вычесть из области Ω . Запрещенными являются также конфигурации, которые пересекаются с препятствиями. В условиях известной среды данные конфигурации могут быть заранее вычислены.

Исследуем положение и форму области Λ , когда запретная зона P ограничивается или одной или двумя плоскостями Σ и Δ , положения которых относительно механизма манипулятора определяются параметрами x_{op} и z_{op} (рис. 1, *б*). Длины звеньев механизма манипулятора примем равными следующим значениям: $O_1O_2 = 900$ мм, $O_2O_3 = 700$ мм и $O_3O_4 = 500$ мм. На рис. 1, *в* изображены множества разрешенных конфигураций при наличии запретной зоны, заданной горизонтальной плоскостью P при значении $z_{op} = 1200$ мм. На рис. 1, *г* положение запретной зоны определяется значениями $z_{op} = 1200$ мм и $x_{op} = 800$ мм. Параметр N на рис. 1, *в, г* задает число разрешенных конфигураций, которые не пересекают препятствие P при $\Delta q_i = 15^\circ$. При фиксированных значениях обобщенной координаты q_2 в пространстве L_q совокупность точек, задающих разрешенные конфигурации, будут задавать сечения области Λ в различных параллельных плоскостях, располагающихся на расстоянии 15° . На основе исследования формы и положения отдельных указанных сечений при различных значениях q_2 , существует возможность провести также анализ формы и положения в целом области Λ . В конечном итоге необходимо получить аналитическое описание области, позволяющее определять принадлежность различных точек пространства L_q области Λ .

На рис. 2 представлены различные сечения области Λ , определяющие точки разрешенных конфигураций при $q_2 = \text{const}$ для трех различных случаев. На рис. 2, *а* изображено одно из сечений области Λ при отсутствии запретной зоны P , соответствующее значению $q_2 = 30^\circ$. Сечения построены в системах координат $O_qq_3q_4$ при $q_2 = 0^\circ, 15^\circ, \dots, 120^\circ$. Для задания наружного контура сечения, изображенного на рис. 2, *а*, использованы несколько граничных линий, в качестве которых выступают три прямые и один эллипс. Среди различных кривых второго порядка эллипс наилучшим образом соприкасается на определенном месте контура с крайними точками сечения области Λ . В связи с этим данная кривая (эллипс) выбрана в качестве одного из фрагментов, задающих контур сечения. Анализ положения указанных четырех линий в различных параллельных плоскостях сечений области Λ пространства L_q (построенных с шагом 15°) позволил определить, что совокупность данных линий принадлежит трем плоскостям и поверхности эллиптического цилиндра. Образующей эллиптического цилиндра является эллипс d_1 , центр которого смещается вдоль заданной некоторой прямой l . Данные плоскости и поверхность в пространстве L_q ограничивают область Λ . Область Λ для этого случая можно определить на основе использования операций теории множеств [10]:

$$\Lambda \rightarrow (((\Omega \cap \Omega_1) \cap \Omega_2) \cap \Omega_3) \cap \Omega_4 \geq 0, \quad (3)$$

где Ω — область, определяемая параллелепипедом, заданным предельными значениями изменений обобщенных координат (2). Заметим, что области

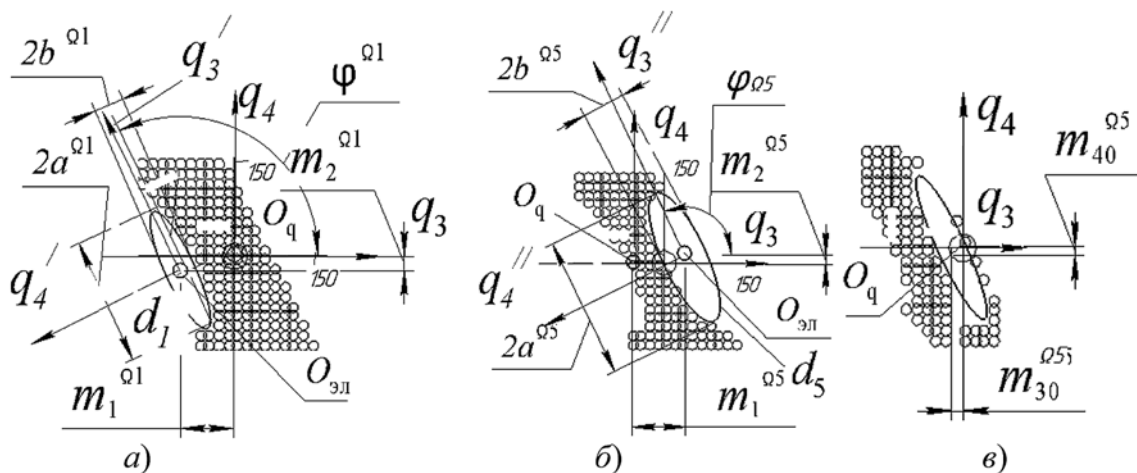


Рис. 2. Сечения области Λ :

a — сечения при $q_2 = 30^\circ$ и отсутствии запретной зоны P ; b — сечения при $q_2 = 30^\circ$ и наличии запретной зоны P , заданной в виде горизонтальной плоскости уровня $z_{op} = 800$ мм; v — сечения при $q_2 = 60^\circ$ и наличии запретной зоны P , заданной в виде прямоугольника $z_{op} = 800$ мм, $x_{op} = 500$ мм, $l_p = 400$ мм, $h_p = 50$ мм

$\Omega_1, \dots, \Omega_4$ в неравенстве (3) необходимо использовать при наложении условий (1). Ω_1 — область, заданная эллиптическим цилиндром, сечение d_1 которого изображено на рис. 2, a . В целях аналитического описания области Λ определим неравенства, задающие точки, принадлежащие отдельным областям $\Omega_1, \dots, \Omega_4$. Неравенство, определяющее точки, располагающиеся снаружи эллиптического цилиндра Ω_1 , имеет следующий вид:

$$\frac{(q_3 \sin \varphi^{\Omega_1} + q_4 \cos \varphi^{\Omega_1} + k_1^{\Omega_1}(q_2) + m_1^{\Omega_1})^2}{(a^{\Omega_1})^2} + \frac{(q_3 \cos \varphi^{\Omega_1} + q_4 \sin \varphi^{\Omega_1} + k_2^{\Omega_1}(q_2) + m_2^{\Omega_1})^2}{(b^{\Omega_1})^2} - 1 \geq 0, (4)$$

где $a^{\Omega_1}, b^{\Omega_1}, k_1^{\Omega_1}, k_2^{\Omega_1}, m_1^{\Omega_1}, m_2^{\Omega_1}, \varphi^{\Omega_1}$ — параметры, задающие положение и форму фрагмента контура сечения эллипса d_1 области Ω_1 (рис. 2, a). Центр эллипса смещается по заданной прямой l в пространстве L_q , если происходит непрерывное изменение обобщенной координаты q_2 . Положение прямой l определяется экспериментальным путем на основе исследования множества сечений области Λ . Параметры $k_1^{\Omega_1}, k_2^{\Omega_1}, m_1^{\Omega_1}, m_2^{\Omega_1}$ задают уравнения проекции прямой l на плоскостях, определяемых координатами q_2, q_3 и q_2, q_4 . Значения a^{Ω_1} и b^{Ω_1} задают размеры, соответственно, большой и малой полуосей эллипса d_1 . Заметим, что данные значения при $q_2 = \text{var}$ не изменяются. Параметр φ^{Ω_1} задает угол наклона большой полуоси эллипса d_1 (оси q_3') к оси q_3 (рис. 2, a). Неравенство (4) получают на основе ис-

пользования преобразований координат, определяющих переход от системы $O_{эл} q_3' q_4'$ (связанной с эллипсом) к системе $O_q q_3 q_4$:

$$\begin{aligned} q_3' &= q_3 \cos \varphi^{\Omega_1} - q_4 \sin \varphi^{\Omega_1} + k_1^{\Omega_1}(q_2) + m_1^{\Omega_1}; \\ q_4' &= q_3 \sin \varphi^{\Omega_1} + q_4 \cos \varphi^{\Omega_1} + k_2^{\Omega_1}(q_2) + m_2^{\Omega_1}. \end{aligned} \quad (5)$$

Области $\Omega_2, \Omega_3, \Omega_4$ задают полупространства, ограниченные тремя плоскостями, определяемые неравенствами

$$\sum_{l=2}^4 d_{l1} q_l \geq b_1, \dots, \sum_{l=2}^4 d_{lm} q_l \geq b_m, \quad (6)$$

где m — число плоскостей, ограничивающих область Λ (для рассматриваемого примера $m = 3$); $l = 3$ — параметр, определяющий размерность пространства конфигураций L_q при $q_1 = 0^\circ$; $d_{11}, d_{12}, \dots, d_{lm}, b_1, b_2, \dots, b_m$ — коэффициенты уравнений плоскостей, задаваемые координатами опорных точек, располагающихся на сечениях. Данные точки определяют на сечениях области Λ экспериментальным путем на основе исследования множества сечений. На рис. 3 изображена последовательность задания области Λ при отсутствии запретной зоны. Использование неравенства (3) позволяет определять принадлежность точек пространства L_q области Λ и находить разрешенные и запрещенные конфигурации механизма манипулятора при отсутствии запретной зоны. Для вычисления области Λ , заданной неравенством (3), используют операцию конъюнкции, которую определяют следующим выражением [10]:

$$X_1 \wedge X_2 = X_1 + X_2 - \sqrt{X_1^2 + X_2^2}, \quad (7)$$

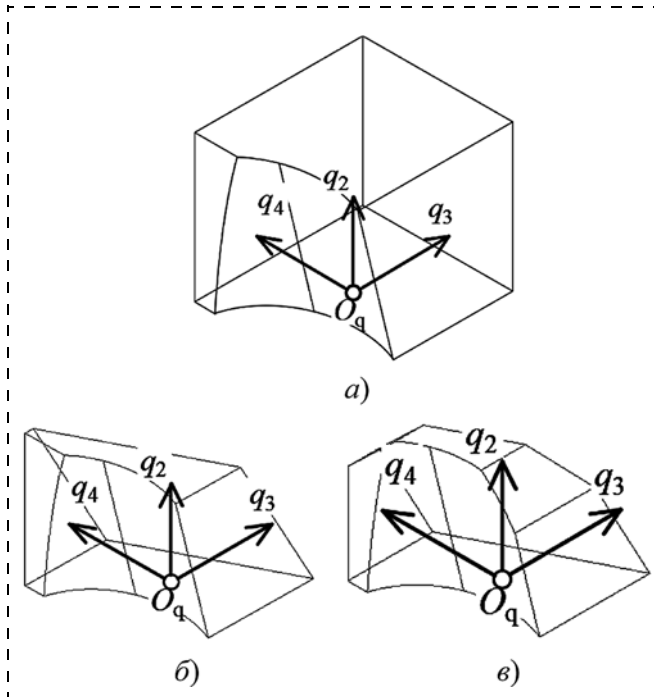


Рис. 3. Изображение области Λ в пространстве L_q с использованием неравенств (1)–(3), (4), (6):
 $a - \Omega \cap \Omega_1$; $\delta - ((\Omega \cap \Omega_1) \cap \Omega_2)$; $\epsilon - (((\Omega \cap \Omega_1) \cap \Omega_2) \cap \Omega_3) \cap \Omega_4$

где X_1 и X_2 являются аргументами R -функции, которые задаются неравенствами (4), (6). Подставляя вначале два неравенства (2) в уравнение (7), получаем пересечение двух полупространств, образующих область Ω' . Затем полученное неравенство области Ω' и третье неравенство (3) подставляем вновь в уравнение (7) и определяем уравнение области Ω'' . Получаем пересечение трех областей. В результате использования всех шести неравенств (3) имеем уравнение области Ω . Далее уравнение области Ω и уравнение (4) подставляем вновь в уравнение (7) и получаем область $\Omega \cap \Omega_1$. Затем поочередно используем три неравенства (6), при этом свободные члены этих неравенств переносим в правую часть. В конечном итоге получаем неравенство, задающее область Λ при отсутствии запретной зоны.

На рис. 2, б представлено сечение области Λ при наличии запретной области P , которая ограничивается горизонтальной плоскостью уровня. Данный случай отражает движение мобильного робота внутри тоннеля (см. рис. 1, в). Анализ сечений области Λ для этого случая показывает, что запрещенные конфигурации, которые пересекают запретную зону, в пространстве L_q определяются точками, принадлежащими другому эллиптическому цилиндру Ω_5 и параболическому цилиндру Ω_6 . В аналитическом виде в этом случае область Λ задается неравенствами на основе использования операций пересечения:

$$\Lambda \rightarrow ((((((\Omega \cap \Omega_1) \cap \Omega_2) \cap \Omega_3) \cap \Omega_4) \cap \Omega_5) \cap \Omega_6) \geq 0. (8)$$

Неравенство, определяющее точки, которые располагаются снаружи эллиптического цилиндра Ω_5 , имеет следующий вид:

$$\frac{(q_3 \sin \varphi^{\Omega_5} + q_4 \cos \varphi^{\Omega_5} + k_1^{\Omega_5}(q_2) + m_1^{\Omega_5})^2}{(a^{\Omega_5})^2} + \frac{(q_3 \cos \varphi^{\Omega_5} + q_4 \sin \varphi^{\Omega_5} + k_2^{\Omega_5}(q_2) + m_2^{\Omega_5})^2}{(b^{\Omega_5})^2} - 1 \geq 0, (9)$$

где a^{Ω_5} , b^{Ω_5} , $k_1^{\Omega_5}$, $k_2^{\Omega_5}$, $m_1^{\Omega_5}$, $m_2^{\Omega_5}$, φ^{Ω_5} — параметры, задающие положение и форму фрагмента контура сечения эллипса d_5 области Ω_5 (см. рис. 2, б). Эллипс d_5 наилучшим образом описывает часть контура сечения, форма которого принимает теперь другой вид. При аналитическом задании контура сечения в этом случае используют три прямые и два эллипса d_1 и d_5 . Параметры a^{Ω_5} , b^{Ω_5} определяют большую и малую полуоси эллипса d_5 , образующего поверхности эллиптического цилиндра Ω_5 . Анализ сечений показывает, что размеры данных полуосей при $q_2 = \text{var}$ также не изменяются. Параметры $k_1^{\Omega_5}$, $k_2^{\Omega_5}$, $m_1^{\Omega_5}$, $m_2^{\Omega_5}$ задают, соответственно, проекции прямой, по которой смещается центр эллипса d_5 . Угол φ^{Ω_5} определяет наклон большой оси эллипса d_5 (оси q_3'') к оси q_3 . Неравенство (6) получают на основе преобразований координат, задающих переход от системы $O_{\text{эл}} q_3'' q_4''$ к системе $O_q q_3 q_4$:

$$q_3'' = q_3 \cos \varphi^{\Omega_5} + q_4 \sin \varphi^{\Omega_5} + k_1^{\Omega_5}(q_2) + m_1^{\Omega_5};$$

$$q_4'' = q_3 \sin \varphi^{\Omega_5} + q_4 \cos \varphi^{\Omega_5} + k_2^{\Omega_5}(q_2) + m_2^{\Omega_5}. (10)$$

На рис. 4, а показано, что часть контура изображения области Λ наилучшим образом определяет кривая, являющаяся параболой l_6 . В связи с этим принято область Ω_6 определять параболическим цилиндром, образующие которого параллельны оси q_3 . Неравенство, задающее точки, которые располагаются снаружи области Ω_6 , имеет в этом случае следующий вид:

$$(q_2 \cos \varphi^{\Omega_6} + q_3 \sin \varphi^{\Omega_6} + m_2^{\Omega_6}) - 2p^{\Omega_6}(q_2 \sin \varphi^{\Omega_6} + q_3 \cos \varphi^{\Omega_6} + m_3^{\Omega_6}) \geq 0, (11)$$

где $m_2^{\Omega_6}$, $m_3^{\Omega_6}$, p^{Ω_6} определяют параметры формы и положения параболы, задающей точки, которые располагаются снаружи области Ω_6 . Параметры $m_2^{\Omega_6}$, $m_3^{\Omega_6}$ задают центр системы координат $O_q''' q_2''' q_3'''$, связанной с точкой параболы, имеющей

координату $q_2''' = 0$ (рис. 4, а). Параметр φ^{Ω_6} определяет угол наклона оси q_2''' (определяющей ориентацию параболы) к оси q_2 . Значение параметра p^{Ω_6} задает положение фокуса параболы. Изображение проекций фрагментов области Λ на плоскости проекций $O_q q_2 q_3$ и в прямоугольной изометрии представлены на рис. 4, а, б. На рис. 4, а параболический цилиндр проецируется в виде параболы l_6 . Неравенство (11) получают на основе преобразований координат, задающих переход от системы $O_{эл} q_2''' q_3'''$ к системе $O_q q_2 q_3$ (рис. 4, а):

$$\begin{aligned} q_2''' &= q_2 \cos \varphi^{\Omega_6} + q_3 \sin \varphi^{\Omega_6} + m_2^{\Omega_6}; \\ q_3''' &= q_2 \sin \varphi^{\Omega_6} + q_3 \cos \varphi^{\Omega_6} + m_3^{\Omega_6}. \end{aligned} \quad (12)$$

На рис. 5 представлены изображения, определяющие последовательность формирования области Λ в соответствии с неравенством (8). На этом рисунке изображена область при наличии запретной зоны, ограниченной горизонтальной плоскостью уровня.

Как видно из рис. 5, площадь сечений при увеличении значения q_2 уменьшается. На рис. 2, в представлено сечение области Λ , когда запретная зона P задана двумя плоскостями Λ и Σ (см. рис. 1, б). Анализ фрагментов контуров сечений области Λ в этом случае показывает, что запрещенные конфигурации задаются точками, располагающимися внутри области, определяемой кинематической поверхностью. В этом случае вместо области эллиптического цилиндра Ω_5 , задающей запрещенные конфигурации, будет выступать область, определяемая кинематической поверхностью. В связи с этим данную область будем также обозначать Ω_5 . При этом образующими кинематической поверхности являются эллипсы d_5 , которые теперь изменяют форму (размеры большой и малой полуосей a^{Ω_5} и b^{Ω_5}) при изменении значения обобщенной координаты q_2 . Начальные положения центров эллипсов и длины большой и малой полуосей при этом изменяются в зависимости от параметров x_{op} , z_{op} и q_2 . В работе [9] вычислены координаты $m_{30}^{\Omega_5}$ и $m_{40}^{\Omega_5}$ точек $O_{эл}$ указанных центров эллипсов в зависимости от значений x_{op} и z_{op} . В результате

построения множеств сечений области Λ определены также графики $m_{30}^{\Omega_5} = f_1(x_{op}, z_{op})$, $m_{40}^{\Omega_5} = f_2(x_{op}, z_{op})$. Анализ множества полученных сечений области Λ показывает, что в этом случае размеры большой a^{Ω_5} и малой b^{Ω_5} полуосей эллипсов зависят от обобщенной координаты q_2 и изменяются нелинейно.

Начальные численные значения большой и малой осей эллипсов определяют функции $a_o^{\Omega_5} = f_3(x_{op}, z_{op})$ и $b_o^{\Omega_5} = f_4(x_{op}, z_{op})$ [9]. Угол наклона большой оси эллипса φ^{Ω_5} по отношению к оси $O_q q_3$ для различных значений x_{op} , z_{op} и q_2 не изменяется и равен $\varphi^{\Omega_5} \approx 110^\circ$.

На основе анализа фрагментов контуров сечений (эллипсов d_5) было решено в этом случае значения

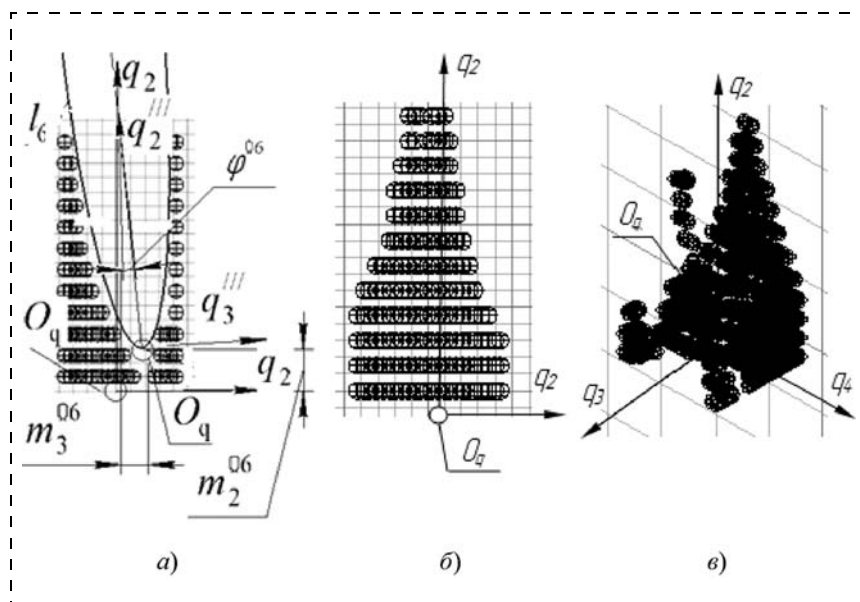


Рис. 4. Изображение области Λ при $y_{op} = 600$ мм:

а — на плоскости проекции $O_q q_2 q_3$; б — на плоскости проекции $O_q q_2 q_4$, в — изображение в прямоугольной изометрии

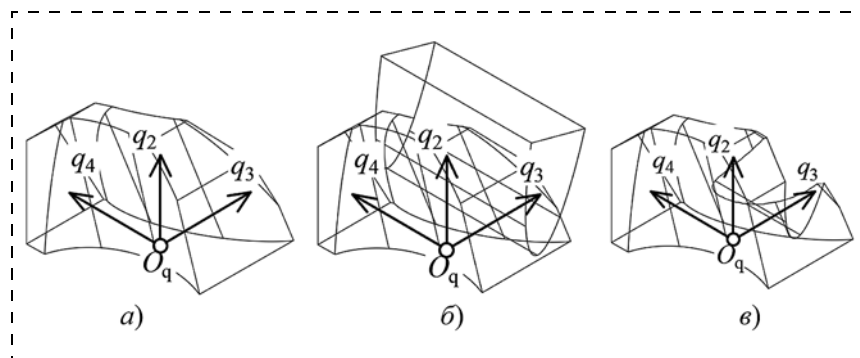


Рис. 5. Задание области Λ с помощью неравенств (8), (9), (11):

а — $(((((\Omega \cap \Omega_1) \cap \Omega_2) \cap \Omega_3) \cap \Omega_4) \cap \Omega_5)$; б — изображение областей Λ и Ω_6 ; в — $(((((\Omega \cap \Omega_1) \cap \Omega_2) \cap \Omega_3) \cap \Omega_4) \cap \Omega_5) \cap \Omega_6$

параметров $m_3^{\Omega_5}$, $m_4^{\Omega_5}$, a^{Ω_5} и b^{Ω_5} задавать функциями от параметра q_2 в виде полиномов третьей степени:

$$\begin{aligned} m_3^{\Omega_5} &= m_{33}^{\Omega_5} q_2^3 + m_{32}^{\Omega_5} q_2^2 + m_{31}^{\Omega_5} q_2 + m_{30}^{\Omega_5}; \\ m_4^{\Omega_5} &= m_{43}^{\Omega_5} q_2^3 + m_{42}^{\Omega_5} q_2^2 + m_{41}^{\Omega_5} q_2 + m_{40}^{\Omega_5}; \\ a^{\Omega_5} &= a_3^{\Omega_5} q_2^3 + a_2^{\Omega_5} q_2^2 + a_1^{\Omega_5} q_2 + a_0^{\Omega_5}; \\ b^{\Omega_5} &= b_3^{\Omega_5} q_2^3 + b_2^{\Omega_5} q_2^2 + b_1^{\Omega_5} q_2 + b_0^{\Omega_5}, \end{aligned} \quad (13)$$

где $m_{33}^{\Omega_5}$, $m_{32}^{\Omega_5}$, ..., $b_2^{\Omega_5}$, $b_1^{\Omega_5}$, $b_0^{\Omega_5}$ — коэффициенты полиномов (13), задающих область Ω_5 , определяемую кинематической поверхностью. Значения данных коэффициентов получены экспериментальным путем на основе получения множества сечений при различных значениях x_{op} , z_{op} и q_2 .

Неравенство, определяющее область Ω_5 , задающее запрещенные конфигурации для этого случая, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} &\frac{(q_3 \sin \varphi^{\Omega_5} + q_4 \cos \varphi^{\Omega_5} + (m_{33}^{\Omega_5} q_2^3 + m_{32}^{\Omega_5} q_2^2 + m_{31}^{\Omega_5} q_2 + m_{30}^{\Omega_5}))^2}{(a_3^{\Omega_5} q_2^3 + a_2^{\Omega_5} q_2^2 + a_1^{\Omega_5} q_2 + a_0^{\Omega_5})^2} + \\ &+ \frac{(q_3 \cos \varphi^{\Omega_5} + q_4 \sin \varphi^{\Omega_5} + (m_{43}^{\Omega_5} q_2^3 + m_{42}^{\Omega_5} q_2^2 + m_{41}^{\Omega_5} q_2 + m_{40}^{\Omega_5}))^2}{(b_3^{\Omega_5} q_2^3 + b_2^{\Omega_5} q_2^2 + b_1^{\Omega_5} q_2 + b_0^{\Omega_5})^2} - \\ &- 1 \geq 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Использование соотношений (1)–(14) позволяет вычислять в приближенном виде разрешенные конфигурации при нахождении механизма манипулятора мобильного робота в непосредственной близости от заранее известных запретных зон.

Расчет пересечений исполнительного механизма, заданного набором пространственных примитивов, и заранее известных запретных зон в реальном масштабе времени требует значительных затрат на время вычислений. Результаты исследований могут решить указанную проблему. Использование соотношений (1)–(14) позволяет значительно сократить указанное время вычислений. Это связано с тем, что определяется лишь принадлежность точек пространства L_q рассчитанным заранее областям Λ . Предлагаемый способ расчета разрешенных конфигураций требует на несколько порядков меньшего времени вычислений. При этом сравнение проводилось со способами, при которых необходимо на каждой итерации определять взаимное пресечение механизма манипулятора и запретных зон (заданных совокупностями трехмерных тел).

Отказ от использования аналитических зависимостей, используемых при определении пересечения звеньев и запретных зон в расчетной модели, может позволить высвободить ресурсы операционной системы реального времени, под управлением которой работает универсальный промышленный робот. Предлагаемый метод позволил также упростить математические модели манипулятора (манипулятор рассматривается в качестве отрезков прямых) и запретных зон, необходимые для определения их взаимного расположения.

Разработанное программное обеспечение и полученные аналитические зависимости могут быть использованы как составная часть интеллектуальных систем управления, которые позволяют планировать траектории перемещения манипуляторов в заранее известном сложно организованном пространстве для обеспечения автономного функционирования роботов.

Список литературы

1. Ющенко А. С. Интеллектуальное планирование в деятельности роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 3. С. 5–18.
2. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Евстигнеев Д. В., Семенов А. В. Интеллектуальные робототехнические системы: принципы построения и примеры реализации. Ч. 1 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 11. С. 14–23.
3. Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. Управление роботами. Основы управления манипуляционными робототехническими системами. М.: МВТУ, 2000. 400 с.
4. Isto P. A parallel motion planner for systems with many degrees of freedom // Proc. of the 10th Intemat. Conf. on Advanced Robotics (ICAR 2001), August 22–25, 2001, Hotel Mercure Buda, Budapest, Hungary. P. 339–344.
5. Притыкин Ф. Н. Виртуальное моделирование движений роботов, имеющих различную структуру кинематических цепей. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. 172 с.
6. Lopatin P. K. Algorithm of a manipulator movement amidst unknown obstacles // Proc. of the 10th International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2001). August 22–25. 2001. Hotel Mercure Buda, Budapest, Hungary. P. 327–331.
7. Егоров А. С., Лопатин П. К. Использование алгоритма полиномиальной аппроксимации в задаче управления манипулятором в среде с неизвестными препятствиями // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 3. С. 24–29.
8. Притыкин Ф. Н., Осадчий А. Ю. Исследование областей пространства конфигураций, задающих совокупность достижимых точек рабочей зоны манипулятора с учетом положения запретных зон // Омский научный вестник. 2014. № 3 (133). С. 70–74.
9. Притыкин Ф. Н., Нефедов Д. И., Рингельман А. В. Исследование областей, задающих множества разрешенных конфигураций при нахождении механизма мобильного манипулятора в близости от запретных зон // Инженерный вестник Дона. 2015. № 2. Ч. 2. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3007>
10. Рвачев В. Л. Методы алгебры логики в математической физике. Киев: 1974. 256 с.

Study of the Surfaces Defining the Area Boundaries of the Allowable Configurations of the Mobile Manipulator Mechanism with the Available Forbidden Zones

F. N. Pritykin, pritykin@mail.ru, D. E. Nefedov, 3demon@bk.ru✉,
Omsk State Technical University, Omsk, 644050, Russian Federation

Corresponding author: Nefedov Dmitry E., Postgraduate, Omsk State Technical University,
Omsk, 644050, Russian Federation, e-mail: 3demon@bk.ru

Received on December 25, 2015

Accepted on January 12, 2016

In this work the authors propose a method for analyzing information about the mechanism of the manipulator's positions and use of the restricted area in the field to set permissions in the configuration space of the generalized coordinates. Permissions' configuration reflects a model of the environment and is used in a system, which autonomously generates a robot's movement in accordance with the job description. Features of the manipulator are associated with the execution of the tasks in advance and on the eve of implementation of a virtually simulated movement. If the desired job is virtually modeled, it is executed as a sequence of operations with the use of the force-torque control algorithm and sensitizing system. At the same time, virtual modeling avoids unjustified and unnecessary movement of the manipulator in the presence of a motor redundancy. An approximate method for setting the resolved configurations is used in the collection of the planes and surfaces of the second order, limiting this area. The developed mathematical model of the area made feasible the configurations based on the use of the sets of inequalities and the unit of R-functions. Analysis of the relative position of the manipulator's motion paths and the field configurations admitted in the space of the generalized coordinates, allows predicting deadlocks, in which an arm can move. The results of the computational experiments and studies prove a reduction of the calculation time of the generalized vector of velocity and the trajectory of the manipulator motion in the phase of analysis of the mechanism of virtual manipulator interaction with the known environment. The analytical dependencies can be used in the intelligent control systems for the robots operating autonomously in the presence of the forbidden zones.

Keywords: virtual simulation of the robot motions, forbidden zones, robot motion synthesis

For citation:

Pritykin F. N., Nefedov D. E. Study of the Surfaces Defining the Area Boundaries of the Allowable Configurations of the Mobile Manipulator Mechanism with the Available Forbidden Zones, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 6, pp. 407–413.

DOI: 10.17587/mau.17.407-413

References

1. Yushchenko, A. S. *Intellektual'noe planirovanie v deyatel'nosti robotov* (Intelligent planning in robots activities), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2005, no. 3, pp. 5–18 (in Russian).
2. Makarov I. M., Lohin V. M., Man'ko S. V., Romanov M. P., Evstigneev D. V., Semenov A. V. *Intellektual'nye robototekhnicheskie sistemy: principy postroeniya i primery realizatsii. Chast' I* (Intelligent Robotic Systems: principles and examples of implementation. Part 1), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2004, no. 11, pp. 14–23 (in Russian).
3. Zenkevich S. L., Yushchenko A. S. *Upravlenie robotami. Osnovy upravleniya manipulyatsionnymi robototekhnicheskimi sistemami* (Managing robots. Fundamentals of management manipulation robotic systems), Moscow, Publishing house of MVTU, 2000, 400 p. (in Russian).
4. Isto P. A parallel motion planner for systems with many degrees of freedom, *Proc. of the 10th Internal Conf. on Advanced Robotics (ICAR 2001)*, August 22–25, 2001, Budapest, Hungary, pp. 339–344.
5. Pritykin F. N. *Virtual'noe modelirovanie dvizhenij robotov, imeyushchih razlichnuyu strukturu kinematicheskikh cepej* (Virtual modeling

of movements of robots with different structures kinematic chains), Omsk, Publishing house of OmGTU, 2014, 172 p. (in Russian).

6. Lopatin P. K. Algorithm of a manipulator movement amidst unknown obstacles, *Proc. of the 10th International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2001)*, August 22–25, 2001, Budapest, Hungary, pp. 327–331.

7. Egorov A. S., Lopatin P. K. *Ispol'zovanie algoritma polinomial'noj approksimatsii v zadache upravleniya manipulyatorom v srede s neizvestnymi prepyatstviyami* (Using the algorithm in polynomial approximation of the manipulator control problem in an environment with unknown obstacles), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2013, no. 3, pp. 24–29 (in Russian).

8. Pritykin F. N., Osadchij A. Y. *Issledovanie oblastej prostranstva konfiguratsij, zadayushchih sovokupnost' dostizhimykh tochek rabochej zony manipulyatora s uchetom polozeniya zapretnykh zon* (The research areas of space configurations, defining a set of achievable points manipulator working area, taking into account the situation of exclusion zones), *Omskij Nauchnyy Vestnik*, 2014, no. 3 (133), pp. 70–74 (in Russian).

9. Pritykin F. N., Nefedov D. I., Ringel'man A. V. *Issledovanie oblastej, zadayushchih mnozhestva razreshennykh konfiguratsij pri nahozhdenii mekhanizma mobU'hogo manipulyatora v blizosti ot zapretnykh zon* (Research areas that define a plurality of allowed configurations when the mobile arm mechanism in the vicinity of the exclusion zones), *Inzhenernyy Vestnik Dona*, 2015, no. 2, part 2, available at: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3007>

10. Rvachev V. L. *Metody algebry logiki v matematicheskoy fizike* (Methods of algebra of logic in mathematical physics), Kiev, 1974, 256 p. (in Russian).

В. И. Воротников, д-р физ.-мат. наук, проф., vorot@ntiustu.ru,

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург,

Ю. Г. Мартышенко, канд. физ.-мат. наук, доц., j-mart@mail.ru,

Российский государственный университет нефти и газа, г. Москва

К задаче переориентации трехроторного гиростата при неконтролируемых внешних помехах

Решается задача трехосной переориентации асимметричного твердого тела посредством управляющих моментов внутренних сил, создаваемых двигателями-маховиками. Учитываются внешние неконтролируемые помехи, статистическое описание которых отсутствует. Указана оценка допустимых уровней помех в зависимости от заданных ограничений на управляющие моменты.

Ключевые слова: переориентация трехроторного гиростата, неконтролируемые помехи

Введение

Решается задача трехосной переориентации асимметричного твердого тела посредством управляющих моментов внутренних сил, создаваемых двигателями-маховиками. На управляющие моменты накладываются заданные геометрические ограничения. В процессе переориентации учитываются внешние неконтролируемые помехи, статистическое описание которых отсутствует.

Рассматриваемый процесс управления моделируется нелинейной конфликтно-управляемой системой обыкновенных дифференциальных уравнений, включающей уравнения движения основного тела (динамические уравнения Эйлера и кинематические уравнения в переменных Родрига—Гамильтона), а также уравнения вращения маховиков. Для этой системы ставится соответствующая игровая задача управления по части переменных (по переменным, определяющим состояние основного тела) — задача гарантированного перевода системы из одного состояния равновесия в другое за конечное время при любых допустимых реализациях помех. Реализации управляющих моментов и помех считаются измеримыми функциями. Решения рассматриваемых систем дифференциальных уравнений понимаются в смысле А. Ф. Филиппова [8].

Управляющие моменты формируются по принципу обратной связи как нелинейные функции (разрывные) фазовых переменных рассматриваемой конфликтно-управляемой системы. Выбор таких функций определяется следующими обстоятельствами:

1) решение исходной нелинейной задачи переориентации можно свести к решению линейных

игровых задач (линейных игровых антагонистических задач с нефиксированным временем окончания);

2) при отсутствии помех управляющие моменты являются субоптимальными по быстродействию;

3) переориентация достигается одним пространственным разворотом без дополнительных ограничений на характер результирующего движения (типа плоского поворота и др.).

Указана оценка допустимых уровней внешних неконтролируемых помех в зависимости от заданных ограничений на управляющие моменты. Данная оценка является достаточным условием, при котором обеспечивается гарантированное решение рассматриваемой задачи переориентации за конечное время посредством предложенной конструкции управляющих моментов. Дается итерационный алгоритм нахождения гарантированного времени переориентации.

Полученные результаты являются развитием результатов работ [1, 2]: 1) обоснована возможность использования указанного подхода для произвольного начального и конечного положения тела; 2) улучшена полученная в работе [2] оценка допустимых уровней неконтролируемых помех.

В случае управления посредством моментов внешних сил данный подход предложен в работе [3]. По поводу задач управления по части переменных см. работы [4, 5].

1. Постановка задачи

Пусть имеем асимметричное твердое тело, вдоль главных центральных осей инерции которого за-

креплены оси вращения однородных симметричных маховиков. Вращательное движение этой системы (гиростата) вокруг центра масс описывается дифференциальными уравнениями [6]

$$\begin{aligned}(A_1 - J_1)x'_1 &= \\ &= (A_2 - A_3)x_2x_3 + J_2x_3\varphi'_2 - J_3x_2\varphi'_3 - u_1 + v_1; \\ (A_2 - J_2)x'_2 &= \\ &= (A_3 - A_1)x_1x_3 + J_3x_1\varphi'_3 - J_1x_3\varphi'_1 - u_2 + v_2; \\ (A_3 - J_3)x'_3 &= \\ &= (A_1 - A_2)x_1x_2 + J_1x_2\varphi'_1 - J_2x_1\varphi'_2 - u_3 + v_3; \\ J_i(\varphi''_i + x'_i) &= u_i,\end{aligned}\quad (1.1)$$

в которых A_i — главные центральные моменты инерции гиростата; x_i — проекции вектора угловой скорости основного тела на главные центральные оси $\mathbf{k}_i$ эллипсоида инерции гиростата; J_i, φ_i — осевые моменты инерции и углы поворота маховиков (роторов), оси вращения которых неподвижно закреплены вдоль осей $\mathbf{k}_i$. Управляющие моменты u_i (моменты внутренних сил) приложены к маховикам и создаются специальными двигателями. Моменты v_i характеризуют внешние силы и внешние неконтролируемые возмущения, действующие на основное тело.

Обозначим $\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{v}, \boldsymbol{\varphi}'$ — векторы, состоящие соответственно из $x_i, u_i, v_i, \varphi'_i$. Здесь и далее $i = \overline{1, 3}$.

Наряду с уравнениями (1.1) рассмотрим кинематические уравнения в переменных Родрига—Гамильтона [7]

$$\begin{aligned}2\eta'_1 &= \eta_4x_1 + \eta_2x_3 - \eta_3x_2, \\ 2\eta'_2 &= \eta_4x_2 + \eta_3x_1 - \eta_1x_3, \\ 2\eta'_3 &= \eta_4x_3 + \eta_1x_2 - \eta_2x_1, \\ \eta_1^2 + \eta_2^2 + \eta_3^2 + \eta_4^2 &= 1.\end{aligned}\quad (1.2)$$

Обозначим $\boldsymbol{\eta}$ вектор, состоящий из η_i и η_4 (в указанном порядке).

Управляющие моменты $u_i = u_i(\mathbf{x}, \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\varphi}')$ ищутся по принципу обратной связи в классе K разрывных по $\mathbf{x}, \boldsymbol{\eta}$ функций. Реализации $u_i[t]$ являются измеримыми функциями, удовлетворяющими заданным ограничениям

$$|u_i| \leq \alpha_i = \text{const} > 0. \quad (1.3)$$

Помехи $v_i \in K_1$ могут реализовываться в виде любых измеримых функций $v_i = v_i[t]$ в рамках ограничений

$$|v_i| \leq \beta_i = \text{const} > 0. \quad (1.4)$$

Для любой допустимой реализации помех $v_i[t]$ решения системы (1.1), (1.2) при $u_i \in K$ понимаются в смысле А. Ф. Филиппова [8] — как абсолютно непрерывные функции $\mathbf{x}[t], \boldsymbol{\eta}[t]$, удовлетворяющие

при почти всех t соответствующей системе дифференциальных включений.

Задача. Требуется найти приложенные к маховикам управляющие моменты $u_i \in K$ при любых допустимых $v_i \in K_1$, переводящие твердое тело за конечное время из произвольного начального положения $\boldsymbol{\eta}(t_0) = \boldsymbol{\eta}_0$ в заданное $\boldsymbol{\eta}(t_1) = \boldsymbol{\eta}_1$. Оба состояния являются состояниями покоя $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}(t_1) = \mathbf{0}$. Кроме того, $\boldsymbol{\varphi}'(t_0) = \mathbf{0}$. Момент времени $t_1 > t_0$ не фиксируется.

Далее, не нарушая общности, считаем $\boldsymbol{\eta}(t_1) = (0, 0, 0, 1)$. Случай произвольного начального и конечного положения тела будет рассмотрен при описании алгоритма решения поставленной задачи управления.

2. Вспомогательная линейная конфликтно-управляемая система

Рассмотрим нелинейные управляющие моменты вида (выписано только выражение для u_1 ; выражения для u_2 и u_3 получаются из u_1 циклической перестановкой индексов $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$)

$$\begin{aligned}u_1 &= -\frac{2(A_1 - J_1)}{\eta_4} [u_1^*(\eta_1^2 + \eta_4^2) + u_2^*(\eta_1\eta_2 + \eta_3\eta_4) + \\ &+ u_3(\eta_1\eta_3 - \eta_2\eta_4) + 1/4\eta_1(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2)] + \\ &+ (A_2x_2 + J_2\varphi'_2)x_3 - (A_3x_3 + J_3\varphi'_3)x_2 \\ &\quad (1 \rightarrow 2 \rightarrow 3),\end{aligned}\quad (2.1)$$

в которых u_i^* — некоторые вспомогательные управления, которыми распорядимся позже.

Управляющие моменты (2.1) позволяют выделить из замкнутой нелинейной конфликтно-управляемой системы (1.1), (1.2), (2.1) линейную конфликтно-управляемую систему дифференциальных уравнений

$$\boldsymbol{\eta}''_i = \mathbf{u}^*_i + \mathbf{v}^*_i. \quad (2.2)$$

"Помехи" $\mathbf{v}^*_i$ в системе (2.2) имеют вид

$$\begin{aligned}\mathbf{v}^*_1 &= 1/2[\eta_4v_1/(A_1 - J_1) + \eta_2v_3/(A_3 - J_3) - \\ &- \eta_3v_2/(A_2 - J_2)] \quad (1 \rightarrow 2 \rightarrow 3).\end{aligned}$$

Уровни $\mathbf{v}^*_i$ можно оценить, используя неравенство Коши—Буняковского и неравенства (1.4):

$$|\mathbf{v}^*_i| \leq \beta^*, \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned}\beta^* &= 1/2[(\beta_1/(A_1 - J_1))^2 + (\beta_3/(A_3 - J_3))^2 + \\ &+ (\beta_2/(A_2 - J_2))^2]^{1/2}.\end{aligned}$$

Для системы (2.2) решим задачу управления о быстрейшем приведении в положение

$$\eta_i = \eta'_i = 0. \quad (2.4)$$

Управление осуществляется посредством u_i^* при любых допустимых реализациях $\mathbf{v}^*_i$, удовлетворяющих неравенствам (2.3).

Для решения данной игровой задачи управления допустимые уровни u_i^* должны быть выше уровней v_i^* . Соответствующие ограничения примем в виде

$$|u_i^*| \leq \alpha_i^*, |v_i^*| \leq \beta^* = \rho_i \alpha_i^*, 0 < \rho_i < 1. \quad (2.5)$$

Процедура назначения уровней α_i^* рассматривается ниже. Здесь считаем их заданными, так что выполняются условия (2.5).

Решение указанной линейной игровой задачи для системы (2.2) использует решение задачи оптимального быстрогодействия для системы [9]

$$\eta_i'' = (1 - \rho_i) u_i^*. \quad (2.6)$$

Краевые условия те же, что и для системы (2.2).

Решение задачи оптимального быстрогодействия для систем типа (2.6) имеет вид [10]

$$u_i^*(\eta_i, \eta_i') = \begin{cases} \alpha_i^* \operatorname{sgn} \psi_i^p(\eta_i, \eta_i'), & \psi_i^p \neq 0; \\ \alpha_i^* \operatorname{sgn} \eta_i = -\alpha_i^* \operatorname{sgn} \eta_i', & \psi_i^p = 0, \end{cases} \quad (2.7)$$

где $\psi_i^p(\eta_i, \eta_i') = -\eta_i - [2(1 - \rho_i) \alpha_i^*]^{-1} \eta_i' |\eta_i'|$ — функции переключений.

При $v_i^* \neq -\rho_i u_i^*$ движения системы (2.2), (2.7) на фазовых плоскостях переменных η_i, η_i' будут сначала происходить (до достижения кривых переключений) между дуг парабол, являющихся траекториями систем $\eta_i'' = (1 \pm \rho_i) u_i^*$ при u_i^* вида (2.7). Далее, попав на кривые переключений $\psi_i^p(\eta_i, \eta_i') = 0$, движения будут происходить вдоль них в скользящем режиме до достижения требуемых конечных значений $\eta_i = \eta_i' = 0$. На участках решений, соответствующих скользящим режимам, вспомогательные управления u_i^* принимают значения $\pm \alpha_i^*$ с бесконечно частыми сменами знака.

Величина

$$\tau = \max \tau_i, \tau_i = 2\{|\eta_{i0}|(1 - \rho_i) \alpha_i^*\}^{-1/2} \quad (2.8)$$

определяет минимальное гарантированное время τ достижения положения $\eta_i = \eta_i' = 0$ во вспомогательной линейной игровой задаче.

Отметим, что те подсистемы системы (2.2), которые придут в требуемое положение раньше, чем последняя из них, будут оставаться в этом положении. При этом соответствующее управление u_i^* в этих подсистемах будут парировать "помехи" v_i^* .

3. Алгоритм решения задачи трехосной переориентации

Решая уравнения системы (1.2) как алгебраические относительно x_i , получаем равенства

$$x_1 = \frac{2}{\eta_4} [\eta_1'(\eta_1^2 + \eta_4^2) + \eta_2'(\eta_1\eta_2 + \eta_3\eta_4) + \eta_3'(\eta_1\eta_3 - \eta_2\eta_4)], (1 \rightarrow 2 \rightarrow 3). \quad (3.1)$$

Поэтому решение рассмотренной линейной игровой задачи о быстрейшем приведении в положение $\eta_i = \eta_i' = 0$ означает решение исходной нелинейной задачи переориентации посредством управляющих моментов (2.1). Число τ определяет гарантированное время переориентации.

Итерационный алгоритм решения поставленной нелинейной задачи переориентации включает четыре этапа.

1. Выбор конструкции (2.1) управляющих моментов u_i с u_i^* вида (2.7). Конструкция (2.1) включает множитель $1/\eta_4$, который формально ведет к "особенности". Однако анализ фазового портрета системы (2.2), (2.7) показывает, что в случае $\eta(t_1) = (0, 0, 0, 1)$ в процессе управления имеет место соотношение $|\eta_4|, 1$. Следовательно, указанной "особенности" не возникает.

Пусть $\eta(t_1) \neq (0, 0, 0, 1)$. Для того чтобы избежать "особенности", в данном случае достаточно перейти к управляющим моментам, получающимся из выражения (2.1) перестановкой индексов (или к комбинации таких управляющих моментов), т. е. необходимо наряду с конструкцией (2.1) рассматривать конструкции управляющих моментов вида

$$u_i = \eta_s^{-1} f_i^{(s)}(x, \eta, \phi', u^*) \quad (s = \overline{1, 4}). \quad (3.2)$$

Конструкции (3.2) позволяют при определенном выборе функций $f_i^{(s)}$ выбрать вспомогательные линейные конфликтно-управляемые системы вида (2.2) из замкнутой системы дифференциальных уравнений (1.1), (1.2), (3.2). В этом случае множество индексов i в системе типа (2.2) будет зависеть от индекса s переменной η в знаменателе выражений (3.2). Так, индексу $s = 4$ соответствуют $i = 1, 2, 3$, индексу $s = 1$ соответствуют $i = 2, 3, 4$, и т. д.

2. Оценка уровня β^* "вспомогательных помех" v_i^* по формулам (2.3).

3. "Назначение" уровней α_i^* вспомогательных управлений u_i^* . При этом числа α_i^*, β^* предопределяют соответствующее значение $\tau = t_1 - t_0$ гарантированного времени переориентации твердого тела.

4. Проверка выполнимости заданных ограничений (1.3) для управляющих моментов u_i . При учете равенств (3.1) эту проверку можно осуществить на множестве возможных состояний вспомогательной линейной системы дифференциальных уравнений (2.2), (2.7), а также используя оценки выражений $A_i x_i + J_i \phi_i'$.

Если оценки (1.3) не выполняются или, наоборот, есть "резерв" в их выполнении, необходимо продолжить поиск подходящих чисел α_i^* . В противном случае переориентация осуществляется за время τ .

Оценки выражений $A_i x_i + J_i \phi_i'$ можно получить, используя функцию

$$M^2(t) = \sum [A_i x_i(t) + J_i \phi_i'(t)]^2.$$

При вычислении ее производной в силу системы (1.1), используя неравенство Коши—Буняковского и неравенства (1.4), получаем

$$M'(t) \leq \sqrt{\beta_1^2 + \beta_2^2 + \beta_3^2}.$$

В результате искомые оценки имеют вид

$$|A_i x_i(t) + J_i \varphi_i'(t)| \leq t \sqrt{\beta_1^2 + \beta_2^2 + \beta_3^2}. \quad (3.3)$$

4. Оценка допустимых уровней помех

Укажем прямую оценку допустимых уровней помех v_i , определяющих возможности решения исходной нелинейной задачи переориентации посредством приложенных к маховикам управляющих моментов (2.1). Данная оценка уточняет оценку допустимых уровней помех, полученную в работе [2], и является менее ограничительной.

Теорема. Если область помех определяется неравенством

$$\begin{aligned} & \sqrt{3} (A_1 - J_1) (1 + \eta_{10}^2 / \eta_{40}^2)^{1/2} [\sum (\beta_i^2 / (A_i - J_i))]^{1/2} + \\ & + 4\sqrt{2} [2 + (\eta_{20}^2 + \eta_{30}^2) / \eta_{40}^2]^{1/2} (1 - \eta_{40}^2)^{1/2} [\sum \beta_i^2]^{1/2} < \alpha_1 \\ & (1 \rightarrow 2 \rightarrow 3), \end{aligned}$$

то задача переориентации может быть решена посредством управляющих моментов (2.1), (2.7), удовлетворяющих заданным ограничениям (1.3).

Доказательство. Условия разрешимости рассмотренной вспомогательной линейной игровой задачи определяются неравенствами

$$\beta_i^* < \alpha_i^*. \quad (4.1)$$

Положим $\alpha_i^* - \beta_i^* = \varepsilon > 0$ (где ε — достаточно малое число). Для удобства представим выражения (2.1) для моментов u_i в виде суммы двух слагаемых: $u_i = u_i^{(1)} + u_i^{(2)}$; при этом полагаем

$$u_i^{(2)} = -\frac{2(A_1 - J_1)}{\eta_4} [1/4 \eta_1 (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2)].$$

На основе анализа фазового портрета заключаем, что на множестве Ω состояний системы (2.2), (2.7) имеют место неравенства

$$\eta_i^2 \leq \eta_{i0}^2, \quad \eta_{40}^2 \leq \eta_4^2, \quad (4.2)$$

$$\max(\eta_i')^2 = |\eta_{i0}|[(\alpha_i^*)^2 - (\beta_i^*)^2](1/\alpha_i^*).$$

Учитывая оценку (3.3), а также значения (2.8) для τ_i , с учетом фазового портрета системы (2.2), (2.7), используя неравенство Коши—Буняковского, получаем соотношения

$$\begin{aligned} |(A_2 x_2 + J_2 \varphi_2') x_3| & \leq \frac{2}{|\eta_4|} [\sum \beta_i^2]^{1/2} |\tau_3 \eta_3' (\eta_3^2 + \eta_4^2) + \\ & + \tau_1 \eta_1' (\eta_3 \eta_1 + \eta_2 \eta_4) + \tau_2 \eta_2' (\eta_3 \eta_2 - \eta_1 \eta_4)| \leq \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \leq \frac{2}{|\eta_4|} (\eta_3^2 + \eta_4^2)^{1/2} [\sum \beta_i^2]^{1/2} [\sum (\tau_i \eta_i')^2]^{1/2} \leq \\ & \leq 4(1 + \eta_{30}^2 / \eta_{40}^2)^{1/2} ((\alpha_3^* + \beta^*) \eta_{30}^2 / \alpha_3^* + \\ & + (\alpha_1^* + \beta^*) \eta_{10}^2 / \alpha_1^* + \\ & + (\alpha_2^* + \beta^*) \eta_{20}^2 / \alpha_2^*)^{1/2} [\sum \beta_i^2]^{1/2} [\sum (\eta_{i0}^2)]^{1/2} \leq \\ & \leq 4\sqrt{2} (1 + \eta_{30}^2 / \eta_{40}^2)^{1/2} (1 - \eta_{40}^2)^{1/2} [\sum \beta_i^2]^{1/2} \\ & (1 \rightarrow 2 \rightarrow 3). \end{aligned}$$

Тогда, учитывая неравенства (4.1), (4.2), а также неравенство Коши—Буняковского, имеем следующую цепочку неравенств:

$$\begin{aligned} |u_1^{(1)}| & \leq \frac{2(A_1 - J_1)}{|\eta_{40}|} (\eta_1^2 + \eta_4^2)^{1/2} [\sum (\alpha_i^{*2})]^{1/2} + \\ & + |(A_2 x_2 + J_2 \varphi_2') x_3 - (A_3 x_3 + J_3 \varphi_3') x_2| \leq \\ & \leq 2(A_1 - J_1) (1 + \eta_{10}^2 / \eta_{40}^2)^{1/2} [\sum (\alpha_i^{*2})]^{1/2} + \\ & + 4\sqrt{2} [1 + (\eta_{20}^2 + \eta_{30}^2) / \eta_{40}^2]^{1/2} (1 - \eta_{40}^2)^{1/2} [\sum \beta_i^2]^{1/2} \\ & (1 \rightarrow 2 \rightarrow 3). \end{aligned}$$

При достаточно малом $\varepsilon > 0$ значения $|u_i^{(2)}|$ также будут достаточно малыми. В результате, на основании условий (1.3), (4.1), получаем соотношения

$$\begin{aligned} & \sqrt{3} (A_1 - J_1) (1 + \eta_{10}^2 / \eta_{40}^2)^{1/2} \beta^* + \\ & + 4\sqrt{2} [1 + (\eta_{20}^2 + \eta_{30}^2) / \eta_{40}^2]^{1/2} (1 - \eta_{40}^2)^{1/2} [\sum \beta_i^2]^{1/2} \leq \alpha_1 \\ & (1 \rightarrow 2 \rightarrow 3), \end{aligned}$$

из которых, при учете неравенств (2.3), получаем требуемую оценку допустимых уровней помех.

Выводы

Дано решение нелинейной задачи трехосной переориентации асимметричного твердого тела посредством моментов внутренних сил, приложенных к связанным с ним маховикам, для произвольного начального и конечного положения тела в пространстве. Уточнена ранее полученная в работе [2] оценка допустимых уровней помех в зависимости от ограничений на управляющие моменты. Данная оценка является достаточным условием, при котором обеспечивается гарантированное решение рассматриваемой задачи переориентации за конечное время посредством предложенной конструкции управляющих моментов, и является менее ограничительной.

Предложенная конструкция управляющих моментов может быть эффективно использована в случаях, когда начальные возмущения угловой скорости тела (начальные значения переменных x_i) являются достаточно малыми, в то время как начальное угловое отклонение связанных с телом осей от заданного направления в пространстве может быть достаточно большим. В связи с этим заметим, что

требуемого значения начальной угловой скорости тела всегда можно добиться за счет ее предварительного снижения.

Ряд других подходов к решению задач переориентации твердого тела при неконтролируемых внешних возмущениях можно найти, например, в работах [11–13].

Список литературы

1. **Воротников В. И., Мартышенко Ю. Г.** К нелинейной задаче одноосной переориентации трехроторного гиростата при игровой модели помех // Автоматика и телемеханика. 2012. № 9. С. 35–48.
2. **Воротников В. И., Мартышенко Ю. Г.** К нелинейной задаче трехосной переориентации трехроторного гиростата при игровой модели помех // Космические исследования. 2013. Т. 51. Вып. 5. С. 412–418.
3. **Воротников В. И.** Об управлении угловым движением твердого тела при помехах. Игровой подход // Прикладная математика и механика. 1994. Т. 58. Вып. 3. С. 82–103.

4. **Vorotnikov V. I.** Partial Stability and Control, Boston, Birkhauser, 1998.
5. **Воротников В. И.** Частичная устойчивость и управление: состояние проблемы и перспективы развития // Автоматика и телемеханика. 2005. № 4. С. 3–59.
6. **Зубов В. И.** Лекции по теории управления. М.: Наука, 1975.
7. **Лурье А. И.** Аналитическая механика. М.: Физматлит, 1961.
8. **Филиппов А. Ф.** Дифференциальные уравнения с разрывной правой частью. М.: Наука, 1985.
9. **Красовский Н. Н.** Игровые задачи о встрече движений. М.: Наука, 1970.
10. **Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф.** Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1983.
11. **Park Y.** Robust and optimal attitude stabilization of spacecraft with external disturbances // Aerospace Science and Technology. 2005. Vol. 9. № 3. P. 253–259.
12. **Ding S. H., Li S. H.** Stabilization of the attitude of a rigid spacecraft with external disturbances using finite-time control techniques // Aerospace Science and Technology. 2009. Vol. 13. № 4–5. P. 256–265.
13. **Xia Y. Q., Zhu Z., Fu M. Y., Wang S.** Attitude tracking of rigid spacecraft with bounded disturbances // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2011. Vol. 58. № 2. P. 647–659.

To Problem of Three-Rotor Gyrostat Reorientation under Uncotrolled External Disturbances

V. I. Vorotnikov, vorot@ntiustu.ru✉,

Ural Federal University, Ekaterinburg, 620002, Russian Federation,

Yu. G. Martysenko, j-mart@mail.ru,

Russian State University of Oil and Gas, Moscow, 119991, Russian Federation

Corresponding author: **Vorotnikov Vladimir I.**, D. Sc. (Phys.&Math.), Professor,
Ural Federal University, Ekaterinburg, 620002, Russian Federation,
Phone: (3435) 25-67-22 (office), e-mail: vorot@ntiustu.ru

Received on January 15, 2016

Accepted on January 22, 2016

The article studies the problem of three-axis reorientation of a rigid spacecraft. Three reaction wheels are employed to produce necessary torque in the axes of the spacecraft. External uncontrolled disturbances, that have no statistical description, are taken into consideration in the process of reorientation. Such a statement of the problem is characteristic for game theory. The controlling moments, applied to flywheels, are offered to be generated by means of a feedback inform of nonlinear functions of phase variables of a considered conflict-controlled system of differential equations, including dynamic Euler equations and kinematic equations in Rodrigues-Hamilton variables (in terms of the quaternion). As a result, the solution of the original nonlinear game problem is narrowed down to solving the elementary linear game problems. Since the exact solution of nonlinear game problems is very difficult, the proposed method seems to be effective. We stress the fact that the linearization used in this case does not neglect nonlinear phenomena of the problem. Indeed, the converse passage from auxiliary control moments to initial ones, as well as the verification of constraints on control moments, requires the account of essentially nonlinear relations. The obtained control moments ensure the exact reorientation of the solid at a finite time. The reorientation being achieved by one spatial turn without causing additional constraints to the character of the resulting motion. The estimates of the accepted level of external disturbances, depending on the constraints on controlling moments and the initial location of the solid are found. These estimates are convenient at the first stage of a solution process, when the possibility is determined of using the proposed construction of control moments in order to ensure the required reorientation. If aforementioned estimates hold with a "reserve", then (at the second stage of the solution) a particular value of the guaranteed time of reorientation can be found by a special iteration algorithm.

Keywords: three-rotor gyrostat reorientation, external uncontrolled disturbances

For citation:

Vorotnikov V. I., Martysenko Yu. G. To Problem of Three-Rotor Gyrostat Reorientation under Uncontrolled External Disturbances, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 6, pp. 414–419.

DOI: 10.17587/mau.17.414-419

References

1. **Vorotnikov V. I., Martysenko Yu. G.** On the Nonlinear Uniaxial Reorientation Problem for a Three-Rotor Gyrostat in the Game Noise Model, *Automation and Remote Control*, 2012, vol. 73, no. 9, pp. 1469–1480.

2. **Vorotnikov V. I., Martysenko Yu. G.** On the Nonlinear Problem of Three-Axis Reorientation of a Three-Rotor Gyrostat in the Game Noise Model, *Cosmic Research*, 2013, vol. 51, no. 5, pp. 372–378.
3. **Vorotnikov V. I.** The Control of the Angular Motion of a Solid with Interference. A Game-Theoretic Approach, *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 2013, vol. 58, no. 3, pp. 457–476.
4. **Vorotnikov V. I.** Partial Stability and Control, Boston, Birkhauser, 1998.
5. **Vorotnikov V. I.** Partial Stability and Control: the State of the Art and Developing Prospects, *Automation and Remote Control*, 2005, vol. 66, no. 4, pp. 511–561.

6. Zubov V. I. Theorie de la Commande, Moscow, Mir, 1978 (in Russian).
 7. Lurie A. I. Analytical Mechanics, Berlin, Springer-Verlag, 2002.
 8. Filippov A. F. Differential Equations with Discontinuous Righthand Sides, Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1988.
 9. Krasovskii N. N. Rendezvous Game Problems, JPRS Publ., 1971.
 10. Pontryagin L. S. Boltyanskii V. G., Gamkrelidze R. V., Mishchenko E. F. The Mathematical Theory of Optimal Processes. New York: Interscience, 1962.

11. Park Y. Robust and optimal attitude stabilization of spacecraft with external disturbances, *Aerospace Science and Technology*, 2005, vol. 9, no. 3, pp. 253–259.
 12. Ding S. H., Li S. H. Stabilization of the attitude of a rigid spacecraft with external disturbances using finite-time control techniques, *Aerospace Science and Technology*, 2009, vol. 13, no. 4–5, pp. 256–265.
 13. Xia Y. Q., Zhu Z., Fu M. Y., Wang S. Attitude tracking of rigid spacecraft with bounded disturbances, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, vol. 58, no. 2, pp. 647–659.

УДК 004.896

DOI: 10.17587/mau.17.419-425

В. А. Нестеров, д-р техн. наук, проф., **Я. Р. Кадыров**, аспирант, yankadyrov@yandex.ru
 Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Управление группой беспилотных летательных аппаратов в режиме радиомолчания

Рассматривается задача нанесения максимального ущерба противнику группой беспилотных летательных аппаратов в условиях отсутствия прямого обмена информацией между ее участниками. Предложены принципы организации и метод управления группой без использования средств обмена информацией. Получена оценка групповой эффективности в случае применения предлагаемого метода.

Ключевые слова: оптимальное целераспределение, групповое управление, режим радиомолчания, виртуальная цель, групповая эффективность

Введение

Разработка алгоритмов группового применения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) актуальна для дальнейшего развития военной науки и техники. На сегодняшний день вопросы применения одиночного БЛА хорошо изучены, как и меры противодействия БЛА на различных этапах боевой операции. Большое число разрабатываемых концепций группового применения БЛА для нанесения ударов по наземным целям противника говорит об актуальности и востребованности подобного направления исследований. Речь идет в первую очередь о задаче подавления средств противовоздушной обороны (ПВО) противника [1]. Групповое применение БЛА по аналогии с использованием пилотируемых ЛА целесообразно прежде всего для создания большой плотности ракетно-бомбового удара.

На рис. 1 (см. третью сторону обложки) приведено дерево поиска оптимальной конфигурации системы подавления ПВО.

В ходе анализа боевого применения БЛА выделен следующий перечень преимуществ применения БЛА по сравнению с пилотируемыми ЛА: более высокая живучесть БЛА (вследствие меньшей заметности в радиолокационном, инфракрасном, оптическом и акустическом диапазонах); большая продолжительность полета (исчисляется на сегодня уже сутками); меньшая вероятность обнаружения и поражения средствами ПВО противника; способность осуществлять контролируемый безопасный

полет на предельно малых высотах (порой недоступных для пилотируемых ЛА); возможность нахождения в высокой степени боевой (оперативной) готовности практически неограниченное время, а также существенно меньшая стоимость разработки, серийного производства и войсковой эксплуатации БЛА и подготовки операторов наземных или иных командных пунктов (КП).

В настоящее время все больше создается мобильных комплексов ПВО, трудно обнаруживаемых, неразличимых на фоне местности для систем распознавания БЛА, что, в свою очередь, предполагает решение задачи поиска. На сегодняшний день основным путем решения задачи группового поиска принято считать разработку алгоритмов децентрализованного управления, основанных на обмене информацией между участниками группы [3]. Однако современные средства радиоэлектронного противодействия (РЭП) успешно создают помехи каналам связи и управления группой и в ряде случаев сводят боевую эффективность группы БЛА к нулю. Таким образом, направление исследований в области организации групповых действий БЛА без прямого обмена информацией между участниками группы, т. е. в режиме радиомолчания, на сегодняшний день крайне актуально (радиомолчание — запрет работы радиотехнических средств на передачу в целях сокрытия от радиоразведки противника местонахождения и действий своих сил).

Современное состояние области группового управления в режиме радиомолчания

Управление децентрализованной группой в режиме радиомолчания предполагает достижение максимальной эффективности действий при условии, что участники группы не связаны друг с другом радиообменом. Отсутствие радиообмена, как указывает И. А. Каляев в работе [4], свойственно стайной стратегии группового управления.

Примерами стайной стратегии в природе являются кооперация муравьев для перемещения тяжелых объектов, работа пчел-строителей при создании улья, поведение стаи волков на охоте и т. п. Алгоритмы стайной стратегии основываются на теории адаптивного управления, применимы для большого числа малогабаритных роботов малого радиуса действия, степень удельного воздействия которых на цель крайне мала.

Опыт локальных войн показал целесообразность маловысотного полета группы ЛА при преодолении зоны ПВО, а также эффективность применения высокоточного оружия (ВТО) по сравнению с неуправляемыми авиационными средствами поражения (АСП). Так, из существующего ряда АСП в рассматриваемом случае наиболее целесообразно применение управляемой авиационной бомбы (УАБ), управление которой осуществляется с борта БЛА-носителя. Маловысотный полет определяет условия применения УАБ [5], а именно, непосредственную близость траектории атаки БЛА к атакуемой цели. Таким образом, при решении задачи подавления ПВО представляется эффективным использование малой группы БЛА многократного применения, оснащенных УАБ, среднего радиуса действия, большого удельного воздействия на цель. Следовательно, стайные алгоритмы принципиально не подходят для управления группой БЛА в режиме радиомолчания.

Для подавления современных комплексов ПВО группой автономных БЛА необходимо, чтобы каждый БЛА обладал высокоинтеллектуальной системой, обеспечивающей идентификацию целей, учет возможных вариантов противодействия со стороны противника, вычисление оптимального варианта группового целераспределения.

Вопросами группового управления БЛА активно занимается группа ученых индийского Аэрокосмического инженерного института. П. Б. Сужит, А. Синга, используя ряд условий и допущений в постановке задачи применительно к режиму радиомолчания, предложили использовать теорию коллективного управления при разработке алгоритма группового целераспределения [6]. Групповое управление достигнуто за счет независимых решений каждого БЛА на основе информации о целях и других участниках группы в пределах собственной зоны обнаружения. Для доказательства эффективности разработанного алгоритма групповое поведение БЛА моделировалось в виртуальной среде,

а полученные результаты сравнивались с результатами моделирования поведения группы в режиме радиообмена. Сравнение показало, что в ряде случаев групповое управление в режиме радиомолчания может быть эффективней алгоритмов, реализованных в режиме радиообмена.

Анализ принятых авторами допущений позволил сформулировать ряд нерешенных технических проблем, к которым относятся:

- проблема неоднозначной идентификации целей участниками группы БЛА. В общем случае вероятность распознавания зависит от времени суток, состояния атмосферы, ракурса обзора, положения цели и ее контрастности и, не в последнюю очередь, возможностей бортовой аппаратуры идентификации;
- проблема неоднозначности выбора цели для атаки. Приоритетность цели может назначаться по ряду несводимых друг к другу критериев: степени потенциальной угрозы, удобства атаки, затрат времени для атаки. Следует учитывать, что в зависимости от поставленной групповой цели боевой операции каждая цель может иметь тот или иной приоритет;
- проблема неоднородности целей. В зависимости от конфигурации цели и от состояния среды тип и число АСП, целесообразных для уничтожения цели, могут сильно различаться;
- проблема идентификации других БЛА посредством бортовых средств локации, работающих в оптическом диапазоне. Измерение координат других БЛА необходимо для реализации алгоритма целераспределения, в том числе и для предотвращения дублирования атаки несколькими БЛА одной цели и столкновений в воздухе, так как между участниками группы отсутствует обмен информацией.

Решение всех вышеобозначенных проблем управления группой БЛА в режиме радиомолчания выходит далеко за рамки данной работы. Рассмотрим задачу оптимального целераспределения с учетом динамики БЛА при следующих допущениях:

- характеристика цели (его положение и приоритетность), которая находится в зоне обнаружения нескольких БЛА, однозначно идентифицируется этими БЛА;
- БЛА идентифицирует параметры полета других БЛА в зоне обнаружения с необходимой точностью;
- БЛА полностью идентичны, в том числе по типам АСП на борту;
- один БЛА атакует в каждый момент времени одну цель;
- для уничтожения одной цели достаточно одной атаки;
- траектория полета БЛА проходит над выбранной для атаки целью;
- полет всех БЛА проходит в одной плоскости;
- полет всех БЛА проходит на постоянной скорости V на протяжении всей операции.

Таким образом, из постановки задачи следует бесполезность оснащения БЛА бортовой радиолокационной станцией (БРЛС). Задача идентификации целей решается посредством использования оптико-локационной станции (ОЛС). Для решения задачи идентификации БЛА целесообразно использовать тепловизор и лазерный дальномер того же ОЛС [7], что существенно удешевляет стоимость производства БЛА в целом.

В качестве расчетной боевой задачи рассматривается нанесение авиационного удара по групповой неоднородной рассредоточенной наземной цели, защищенной системой ПВО ближнего действия. К такой цели относится, например, рассредоточенная танковая рота, состоящая из танков, боевых машин пехоты (БМП), бронетранспортеров (БТР) и специальных автомобилей со средствами связи, управления и технического обеспечения. Система ПВО имеет в своем составе средства постановки активных радиопомех, станции радиоразведки. Огневое противодействие со стороны противника в данной работе не рассматривается.

Группу БЛА предлагается рассматривать как средство нанесения ущерба противнику за отведенный для операции ограниченный интервал времени $[t_0, t_f]$. Ущерб пропорционален приоритетности уничтоженных целей, их числу и обратно пропорционален временным затратам на проведение атаки цели. О задаче поиска оптимального решения при наличии различных несводимых друг к другу критериев оптимальности, если такого рода задачи решаются методами математического программирования, говорят как о задаче многокритериальной оптимизации. Одним из известных методов решения задач многокритериальной оптимизации является сведение многих критериев к одному путем введения экспертных весовых коэффициентов для каждого из критериев таким образом, что более важный критерий получает более высокий вес [8].

Формулирование математической задачи нанесения максимального ущерба противнику

Очевидно, что для задачи группового управления в условиях нестационарной среды в зоне боевых действий необходимо, чтобы управление было найдено за достаточно малое время δt , за которое состояние среды существенным образом не изменится. Обозначим t_1 — время, потребное для идентификации других БЛА в зоне обнаружения, t_2 — время, необходимое для нахождения оптимального решения задачи целераспределения в зоне обнаружения. Параметрами идентификации БЛА как объекта измерения являются текущие координаты и вектор скорости. Предполагается, что наземные цели, попавшие в зону обнаружения, однозначно распознаются БЛА за время, меньшее чем t_1 , зона обнаружения целей и зона обнаружения БЛА эквивалентны и равны R_{rec} , тогда время поиска оптимального управления равно $\delta t = t_1 + t_2$.

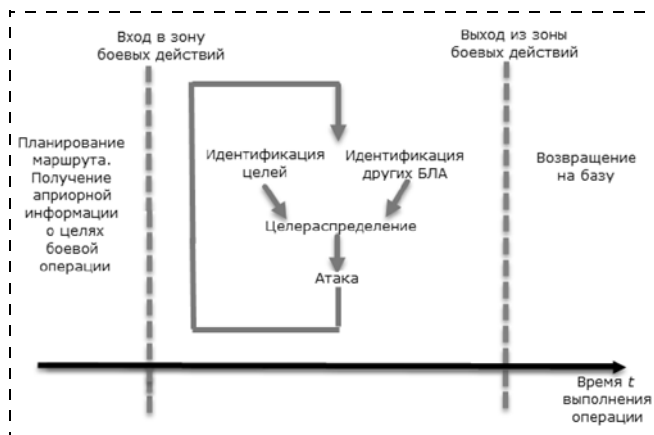


Рис. 2. Алгоритм действий БЛА в составе группы в режиме радиомолчания

На рис. 2 схематично представлена последовательность действий алгоритма БЛА при решении задачи нанесения авиаудара.

Цикл повторяется с определенным интервалом времени $\Delta t \geq \delta t + t_{упр}$, где $t_{упр}$ — время, необходимое для изменения текущей динамики БЛА. Пусть в момент времени $\hat{t} \in [t_0, t_f - \Delta t]$ в зоне обнаружения выбранного БЛА находится M членов группы, включая его самого. Тогда каждый БЛА U_j ($j \in [1, M]$) может выбирать для атаки одну цель T_l из m целей, выявленных в рассматриваемой зоне обнаружения. Критерий оптимальности, выражающий оценку нанесенного противнику группового ущерба за отведенное время, обозначим Y .

Так как нет никакого обмена информацией между участниками группы, каждый БЛА должен самостоятельно исследовать весь район предполагаемого расположения целей. Местоположение целей определяется в процессе выполнения задачи поиска. Алгоритм поиска определяет модель поведения БЛА U_j при отсутствии целей или в случае, если атака цели данным БЛА влечет за собой отказ от атаки цели БЛА U_h ($h \in [1, M]$, $h \neq j$) с более выгодным показателем эффективности атаки цели. Поиск реализуется посредством назначения для каждого БЛА из числа M координат случайной точки на карте в качестве виртуальной цели с малым приоритетом. Тогда общее число целей составляет $k = m + M$, а выбор цели T_l ($l \in [1, k]$) БЛА U_j дает приращение целевого функционала:

$$\Delta Y_{l,j} = I_{T_l} k_i - C_{l,j} k_c,$$

где I_{T_l} — приоритетность цели T_l ; $C_{l,j}$ — затраты, возникающие при атаке БЛА U_j цели T_l ; k_i , k_c — весовые коэффициенты критерия приоритетности цели и критерия временных затрат соответственно. Значения весовых коэффициентов подчиняются условию нормировки $k_i + k_c = 1$ и вычисляются на основе экспертных оценок. Далее будем рассматривать случай $k_i = k_c = 1/2$, т. е. приоритетность це-

ли так же важна, как и затрачиваемое время на ее уничтожение.

На основе экспертных оценок каждому типу цели назначена степень приоритетности в диапазоне от 0 до 1. Типы целей и их приоритетность приведены в таблице.

Типы целей и их приоритетность

Тип цели	Приоритетность
Танк	0,9
БТР	0,7
Средства связи	0,5
Автомобиль технического обеспечения	0,3
Виртуальная цель	0,2

Оценка затрат при атаке цели $C_{l,j}$ может включать как затраты времени, так и экономические затраты (расход топлива). В дальнейшем будем рассматривать отношение времени $t_{l,j}$ реализации атаки цели T_l к отведенному интервалу времени выполнения боевой операции $t_f - t_0$ в качестве безразмерной оценки затрат $C_{l,j} = \frac{t_{l,j}}{t_f - t_0}$.

Обозначим $x_{l,j}$ — принимаемое решение БЛА U_j по атаке цели T_l , которое может принимать значение либо 0 (цель T_l не выбрана) либо 1 (цель T_l выбрана). Задача, решаемая БЛА U_j , сводится к распределению целей T_l ($l \in [1, k]$) между группой БЛА из M в зоне обнаружения БЛА U_j таким образом, чтобы

$$Y = \sum_{j=1}^M \sum_{l=1}^k \Delta Y_{l,j} x_{l,j} \rightarrow \max,$$

при условии, что $\sum_{l=1}^k x_{l,j} = 1$ (БЛА из числа M может

выбирать только одну цель) и $\sum_{j=1}^M x_{l,j} \leq 1$ (цель может

быть выбрана только одним БЛА или не выбрана вовсе). Заметим, что выбор БЛА U_j виртуальной цели предполагает реализацию им задачи поиска.

Таким образом, задача коллективного распределения целей сводится к оптимизационной задаче, решаемой методом целочисленного линейного программирования.

Задав Земную систему координат OXY так, что ось OY сонаправлена вектору скорости V_j БЛА U_j , обозначим $J(x_j, y_j)$ — текущие координаты БЛА U_j . Так как рассматривается плоская задача, координаты цели T_l тождественны координатам проекции цели на плоскости полета $T_l(x_l, y_l)$. Время выполнения атаки цели T_l БЛА U_j может быть представ-

лено в виде функции $t_{l,j} = f(x_j, y_j; x_l, y_l; V_j)$. Атака цели сведена к задаче перемещения БЛА в координаты точки проекции цели. При постоянной скорости БЛА U_j имеет фиксированный радиус разворота R , а кратчайшую траекторию полета БЛА до цели аналогично работе [9] будем представлять в виде комбинации участков полета по прямой и на вираже. Вираз — разворот самолета с креном в горизонтальной плоскости. Далее будет рассматриваться правильный вираз, т. е. такой разворот, при выполнении которого не изменяются модуль скорости и крен и отсутствует скольжение.

Согласно работе [10] уравнения, описывающие динамику БЛА при выполнении правильного виража по трем осям, выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} m j_x &= \frac{G}{g} \frac{dV_j}{dt} = P - Q; \\ m j_y &= 0 = Y \cos \gamma - G; \\ m j_z &= \frac{G}{g} \frac{V_j^2}{R} = Y \sin \gamma, \end{aligned} \quad (1)$$

где G — вес БЛА; P — сила тяги; Q — сила лобового сопротивления; g — ускорение свободного падения; Y — подъемная сила; γ — угол крена.

Разрешая второе уравнение системы (1) относительно G , получаем $G = Y \cos \gamma$, далее в силу определения вертикальной (нормальной) перегрузки $n_y = \frac{Y}{G}$ получаем $\cos \gamma = \frac{1}{n_y}$, т. е. чем больше допус-

тимые значения потребной перегрузки n_y , тем больше угол крена γ и тем меньше радиус разворота R .

Продольная скорость полета на вираже остается постоянной: $P = Q$.

Радиус виража вычисляется по формуле $R = \frac{V^2}{g \sqrt{n_y^2 - 1}}$, а время разворота на угол ϕ равно

$$t_{\text{разв}} = \frac{\phi}{360} \cdot 0,64 \cdot \frac{V}{\text{tg} \gamma}.$$

Обозначим $B(x_b, y_b)$ точку касания отрезка $[BT_l]$ с дугой окружности $[JB]$. Уравнения окружности радиуса R с центром в точке $O_1(x_{O1}, y_{O1})$, проходящей через точки $B(x_b, y_b)$ и $J(x_j, y_j)$, и уравнения прямой, проходящей через точки $B(x_b, y_b)$ и $T_l(x_l, y_l)$, составляют следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} (x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 &= R^2; \\ y &= kx + b; \\ y_l &= kx_l + b. \end{aligned} \quad (2)$$

Отсюда

$$\begin{aligned} (1 + k^2)x^2 - 2(x_j + k(kx_l - y_l - y_j))x + \\ + (kx_l - y_l - y_j)^2 + x_j - R^2 = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Единственность решения квадратного уравнения (2) подразумевает условие $D = 0$. Из уравнения

$$(x_j + k(kx_l - y_l - y_j))^2 - (1 + k^2)((kx_l - y_l - y_j)^2 + x_j - R^2) = 0$$

находим k_1, k_2 . Находим значение k из следующих соображений:

если $|x_{01} - x_j| \leq |x_b - x_j|$, то $k = \max(k_1, k_2)$;

если $|x_{01} - x_j| > |x_b - x_j|$, то $k = \min(k_1, k_2)$;

далее последовательно находим

$$x_b = \frac{(x_j + k(kx_l - y_l - y_j))}{2(1 + k^2)}, y_b.$$

Отрезок пути $[BT_l] = \sqrt{(x_l - x_b)^2 + (y_l - y_b)^2}$. Тогда полет по отрезку пути $[BT_l]$ займет время

$$t_{[BT_l]} = \frac{[BT_l]}{V_j}, \text{ а полет по дуге окружности } [JB] -$$

$$\text{время } t_{[JB]} = \frac{[JB]}{V_j}.$$

Время на проведение атаки цели $t_{l,j} = t_{[JB]} + t_{[BT_l]}$.

Имитационное моделирование выполнения задачи группой БЛА в режиме радиомолчания

Было проведено имитационное моделирование ударной операции в среде MATLAB для четырех БЛА с ограниченными зонами обнаружения. Для сравнения также было проведено моделирование поведения группы БЛА, связанных между собой радиообменом. Групповое управление БЛА в режиме радиообмена реализовывалось на основе описанного выше алгоритма при условии, что каждому участнику группы БЛА доступна информация обо всех объектах, попавших в зону обнаружения БЛА группы. В каждый момент времени в рассматриваемом пространстве находятся четыре цели с различной степенью приоритетности. По мере уничтожения целей в случайном месте появляются новые цели.

На рис. 3 (см. третью сторону обложки) показан этап выполнения сценария ударной операции. Стрелками выделены векторы скорости БЛА, звездочками — цели, пунктирными окружностями красного цвета — зона обнаружения. Цветными линиями выделены траектории до обнаруженных целей, пунктирными — траектории до виртуальных целей, жирным выделены выбранные траектории до целей в соответствии с оптимальным целераспределением с учетом динамики самих БЛА, стрелками указаны направления текущих векторов скорости БЛА.

Так как группа работает в заранее неизвестной среде, управление группой БЛА реализуется в тече-

ние ближайшего отрезка времени Δt , в течение которого БЛА следует по траектории в соответствии с оптимальным планом целераспределения. По истечении времени Δt БЛА группы занимают новое положение, зона обнаружения при этом изменяется, цикл вычисления оптимального управления повторяется, по результатам чего либо принятая цель для атаки подтверждается, либо назначается новая цель.

Показателем эффективности является значение функции вида

$$Y_l = \sum_{l=1}^n I_{T_l},$$

где n — число уничтоженных целей за рассматриваемый период времени. В случае радиообмена между участниками группы решение оптимального целераспределения охватывает все цели, находящиеся в контролируемой группой БЛА области. Однако помимо увеличения объема вычислений в связи с обработкой гораздо большего объема информации, задержками связи главным недостатком стратегий управления, основывающихся на обмене информацией, является уязвимость перед РЭП. Эффективность режима радиомолчания как одного из факторов, составляющих успех боевой операции, зависит от типа ПВО противника, его возможностей по распознаванию, перехвату радиоканалов, созданию помех. Если ПВО противника не располагает средствами радиоразведки и постановщиками помех, радиомолчание — недостаток, а не преимущество. Но в случае активного РЭП преимущество применения алгоритмов управления по сути автономных БЛА очевидно.

Результаты моделирования, представленные на рис. 4, показали, что режим радиомолчания, обладая явным преимуществом в скрытности и надежности работы по сравнению с режимом радиообмена, лишь незначительно уступает ему в эффективности.

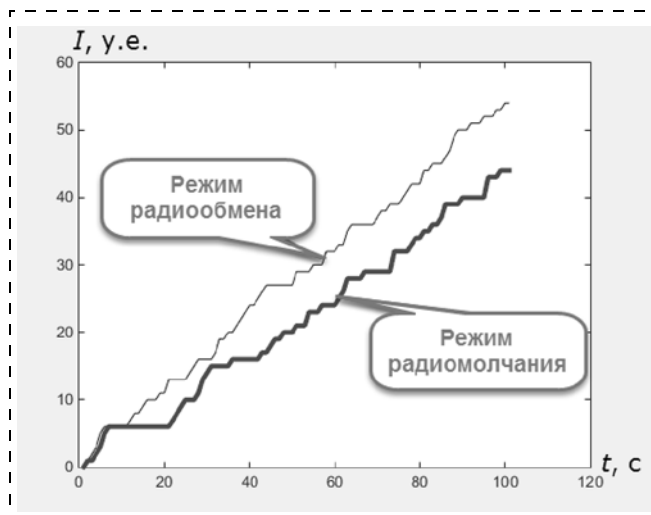


Рис. 4. Графики эффективности группы БЛА, функционирующей в режиме радиообмена и в режиме радиомолчания

Заклучение

Разработанный алгоритм позволяет решать задачу нанесения авиаудара группой БЛА, функционирующих в режиме радиомолчания.

Режим радиомолчания имеет преимущество в скрытности, автономности и надежности выполнения боевой задачи по сравнению с режимом радиобмена, незначительно уступая ему в эффективности, что подтверждено результатами моделирования.

В дальнейшем планируется рассмотреть вопросы влияния значений приоритетности виртуальных целей и их расположения на эффективность группового управления, а также исследовать способы идентификации других участников группы БЛА, необходимые для реализации предлагаемого алгоритма.

Список литературы

1. **DARPA** атакует врагов армией беспилотников // Популярная механика: интернет-журнал 2.04.2015. URL: <http://www.popmech.ru/weapon/57107-darpa-atakuet-vragov-armiy-bes-pilotnikov/> (дата обращения 10.09.2015).

2. **Авиация ВВС России и научно-технический прогресс.** Боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра / Под ред. Е. А. Федосова. М.: Дрофа, 2005. 734 с.

3. **Min-Hyuk Kim, Hyeoncheol Baik, Seokcheon Lee.** Response Threshold Model Based UAV Search Planning and Task Allocation // J. Intell. Robot. Syst. — 2014. — DOI 10.1007/s 10846-013-9887-6 — Springer Science+Business Media Dordrecht 2013. № 75. P. 625—640.

4. **Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г.** Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: Физматлит, 2009. С. 44—45.

5. **Нестеров В. А., Куприков М. Ю., Обносов Б. В., Семенов И. М., Тихонов К. М., Трусов В. Н.** Механика авиационных робототехнических систем. М.: ИТК "Дашков и К", 2014. 464 с.

6. **Sujit P. B., Sinha A., Goes D.** Multi-UAV Task Allocation using Team Theory. Indian Institute of science, 2005.

7. **Нестеров В. А., Правидло М. Н., Обносов Б. В., Трусов В. Н.** Конструирование и проектирование установок ракетного вооружения летательных аппаратов. М.: ИТК "Дашков и К", 2014. 928 с.

8. **Обносов Б. В., Нестеров В. А., Правидло М. Н.** Теоретические основы формирования рационального облика авиационных управляемых ракет и их систем отделения при создании перспективных авиационных боевых комплексов. М.: ИТК "Дашков и К", 2013. С. 78—79.

9. **Joel G. Manathara, P. B. Sujit, Randal W. Beard** Multiple UAV Coalitions for a Search and Prosecute Mission // J Intell Robot Syst. 2011. Springer Science+Business Media B.V. 2010. № 62. P. 125—158. DOI 10.1007/s10846-010-9439-2.

10. **Вотяков А. А., Каюнов Н. Т.** Аэродинамика и динамика полета самолета: учеб. пособие. М.: ДОСААФ, 1975. С. 238—249.

The Group Management of Unmanned Aerial Vehicles in the Radio Silence Mode

V. A. Nesterov, J. R. Kadyrov, yankadyrov@yandex.ru

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation

Corresponding author: **Kadyrov Jan R.**, Postgraduate, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russian Federation, e-mail: yankadyrov@yandex.ru

Received on February 25, 2016

Accepted on March 04, 2016

Today due to the modern electronic countermeasures (ECM) progress for opening and interception of radio traffic channels, the group control task of unmanned aerial vehicles (UA V) in the radio silence mode is relevant as ever before. The aim of this work is to develop a UAV group control algorithm in radio silence. Group management refers to the optimization problem of actions of all group participants to achieve maximum group efficiency. In the case of lack of communication every UAV due to the onboard sensors identifies goals and other UA Vs in the detection area and operates according to its own optimum plan of target distribution, based on the available information. The optimality criterion considered as a function of two factors: the losses inflicted on the enemy when attacking the target, and the time spent to attack the target. Aviation blow to the group heterogeneous distributed ground targets is considered as subject. Fire resistance from the enemy in this work is not considered. Each target in the UAV detection area is given the value of the optimality criterion, based on the expert assessments. The search task for each UA V interpreted as goal attack virtual non-existent target, which has stochastic coordinates. For all targets and group members in the detection area, the UAV has a lot of plans of target distribution and acts in accordance with the preferred option. To estimate the effectiveness of the algorithm the simulation of shock operations in Matlab was performed for a UA V group that has been operating in the radio silence mode, and for a UAV group united by a common channel for the information exchange. The comparison of the simulation results showed the feasibility of applying the proposed algorithm.

Keywords: the optimal target distribution, group management, radio silence, group efficiency, virtual target

For citation:

Nesterov V. A., Kadyrov J. R. The Group Management of Unmanned Aerial Vehicles in the Radio Silence Mode, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 6, pp. 419—425.

DOI: 10.17587/mau.17.419-425

References

1. **DARPA atakuets vragov armiej bespilotnikov** (DARPA attacks enemies with armed drones), *Populjarnaja Mehanika: Internet-Maga-*

zine. 2.04.2015, available at: <http://www.popmech.ru/weapon/57107-darpa-atakuet-vragov-armiy-bes-pilotnikov/> (date of access 10.09.2015).

2. **Fedosov E. A.** ed. *Aviatsiya VVS Rossii i nauchno-tehnicheskij progress. Boevye komplekсы i sistemy vchera, segodnja, zavtra* (The air forces of Russia and scientific-technical progress. Combat systems and system yesterday, today and tomorrow), Moscow, Drofa, 2005, 734 p. (in Russian).

3. **Min-Hyuk Kim, Hyeoncheol Baik, Seokcheon Lee.** Response Threshold Model Based UAV Search Planning and Task Allocation, *J. Intell. Robot Syst.*, 2014, Springer Science + Business Media Dordrecht 2013, no. 75, pp. 625—640, DOI 10.1007/s10846-013-9887-6.

4. Kaljaev I. A., Gajduk A. R., Kapustjan S. G. *Modeli i algoritmy kolektivnogo upravlenija v gruppah robotov* (Models and algorithms of collective control in groups of robots), Moscow, Fizmatlit, 2009, pp. 44–45 (in Russian).

5. Nesterov V. A., Kuprikov M. Ju., Obnosov B. V., Semenov I. M., Tihonov K. M., Trusov V. N. *Mehanika aviacionnyh robototekhnicheskikh sistem* (Mechanics aviation robotic systems), Manual, Moscow, Publishing House "Dashkov & K'", 2014, 464 p. (in Russian).

6. Sujit P. B., Sinha A., Goes D. Multi-UAV Task Allocation using Team Theory, Indian Institute of science, 2005.

7. Nesterov V. A., Pravidlo M. N., Obnosov B. V., Trusov V. N. *Konstruirovaniye i projektirovaniye ustanovok raketnogo vooruzheniya letatel'nyh apparatov* (The construction and design of rocket armament of aircrafts), Manual, Moscow, Publishing House "Dashkov & K'", 2014, 928 p. (in Russian).

8. Obnosov B. V., Nesterov V. A., Pravidlo M. N. *Teoreticheskie osnovy formirovaniya racional'nogo oblika aviacionnyh upravlyaemykh raket i ih sistem otdeleniya pri sozdaniy perspektivnykh aviacionnykh boevykh kompleksov* (The theoretical basis for the formation of a reasonable appearance of aircraft guided missiles and their systems department in the creation of advanced aviation weapons systems), Moscow, Publishing House "Dashkov & K'". 2013, pp. 78–79 (in Russian).

9. Joel G. Manathara, P. B. Sujit, Randal W. Beard Multiple UAV Coalitions for a Search and Prosecute Mission, *J. Intell. Robot Syst.*, 2011, Springer Science+Business Media B. V., 2010, no. 62, pp. 125–158, DOI 10.1007/s10846-010-9439-2.

10. Votjakov A. A., Kajunov N. T. *Ajerodinamika i dinamika poleta samoleta* (Aerodynamics and flight dynamics of aircraft), tutorial, Moscow, "DOSAAF", 1975, pp. 238–249 (in Russian).

УДК 533.65.013.622

DOI: 10.17587/mau.17.425-432

С. З. Свердлов, канд. техн. наук, доц., проф., c3c@uni-vologda.ac.ru,

Вологодский государственный университет

Скороподъемность электрического мультикоптера

Получена зависимость скорости вертикального подъема электрического многороторного вертолета от высоты с учетом тяговооруженности, характеристики электродвигателя и силы лобового сопротивления. Получена формула для потолка висения. Приведены аппроксимированные аэродинамические характеристики пропеллеров, используемых в мультикоптерах. Предложен метод расчета скороподъемности и потолка висения при изменении напряжения питания.

Ключевые слова: беспилотный многороторный электрический вертолет, мультикоптер, скороподъемность, потолок висения, тяговооруженность, бесколлекторный электромотор

Целью исследования является изучение зависимости скорости вертикального подъема электрического многороторного вертолета (мультикоптера) от высоты. Скорость подъема вычисляется при работе электропривода летательного аппарата (ЛА) при 100 % газа. Определяются скороподъемность у поверхности Земли и потолок висения.

Принимаются во внимание следующие обстоятельства:

1. На мультикоптере используются электрические бесколлекторные (вентильные) электродвигатели, работа которых (но не работа винтомоторной группы) не зависит от плотности воздуха и высоты.

2. Используются несущие винты (пропеллеры) фиксированной геометрии.

3. Масса ЛА в течение полета остается неизменной.

4. Напряжение (ЭДС) аккумуляторной батареи снижается по мере расходования ее заряда.

5. Если не рассматривать момент старта, силы инерции не играют существенной роли при вертикальном полете ЛА рассматриваемого класса при 100 % газа. Как показывает расчет, ускорение (замедление) в этом случае не превышает $0,05 \text{ м/с}^2$, т. е. $0,5 \%$ ускорения свободного падения.

6. Уменьшением веса ЛА (ускорения свободного падения) с высотой можно пренебречь. На высоте 10 км это уменьшение составляет лишь $0,3 \%$.

Тяговооруженность мультикоптера

Ключевым фактором, определяющим скорость вертикального полета, является тяговооруженность — отношение максимальной тяги к весу мультикоптера у поверхности Земли:

$$k_T = \frac{T_{\max}}{G}, \quad (1)$$

где k_T — коэффициент запаса тяги (тяговооруженность); $T_{\max}$ — максимальная тяга; G — вес летательного аппарата. Характерные значения тяговооруженности мультикоптеров 1,2...2,5.

Запас тяги существующего мультикоптера может быть определен экспериментально измерением тяги ЛА или отдельной винтомоторной группы. Для расчета тяговооруженности при проектировании нового ЛА нужно знать параметры электромотора, определяющие его механическую характеристику (зависимость угловой скорости от крутящего момента), и аэродинамические коэффициенты пропеллера. Производители бесколлекторных моторов публикуют данные испытаний двигателей с различными пропеллерами, в которых присутствуют сведения о тяге и оборотах двигателя при 100 % газа, позволяющие определить тяговооруженность.

Будем считать, что значение тяги $T_{\max} = T_{100}$ и частота вращения мотора n_{100} (об/с) при 100 % газа известны.

Уравнение равновесия

Пренебрегая силами инерции, условие равновесия мультикоптера при полете вверх можно записать в виде

$$T = G + Y, \quad (2)$$

где T — тяга, создаваемая несущими винтами; G — вес ЛА; Y — сила лобового сопротивления при полете вверх.

Вес ЛА остается неизменным. Для вычисления силы лобового сопротивления используем понятие эквивалентной круглой пластины, площадь которой можно оценить, зная компоновку мультикоптера. Сила лобового сопротивления Y вычисляется по формуле

$$Y = C_x \rho S \frac{V^2}{2}, \quad (3)$$

где C_x — коэффициент лобового сопротивления эквивалентной круглой пластины (хотя речь идет о движении по вертикали, будем использовать традиционный индекс x для коэффициента лобового сопротивления), $C_x = 1,16$ [1]; ρ — плотность воздуха; S — площадь эквивалентной пластины; V — вертикальная скорость ЛА.

Можно также считать, что приведенные соотношения относятся к весу, тяге, силе сопротивления и площади эквивалентной пластины, приходящимся на одну винтомоторную группу.

Аэродинамические характеристики пропеллеров мультикоптеров

Будем использовать "французскую систему винтовых коэффициентов" [1–3]. Относительная поступь пропеллера (число Струхали, коэффициент скорости) λ характеризует скорость набегающего потока (вертикальную скорость мультикоптера):

$$\lambda = \frac{V}{nD}, \quad (4)$$

где D — диаметр пропеллера; n — частота вращения пропеллера (c^{-1}).

Безразмерный коэффициент тяги $\alpha(\lambda)$ используется для расчета силы тяги, создаваемой винтом:

$$T = \alpha(\lambda) \rho D^4 n^2. \quad (5)$$

Коэффициент $\alpha(\lambda)$ зависит от формы винта и относительной поступи. Зависимость $\alpha(\lambda)$ существенным образом определяет баланс сил при вертикальном полете мультикоптера.

Безразмерный коэффициент мощности $\beta(\lambda)$ входит в формулу расчета мощности N , необходимой для вращения винта:

$$N = \beta(\lambda) \rho D^5 n^3. \quad (6)$$

Коэффициент $\beta(\lambda)$ определяет и крутящий момент $M_{кр}$, необходимый для вращения пропеллера. Действительно,

$$N = M_{кр} \Omega = M_{кр} \cdot 2\pi n, \quad (7)$$

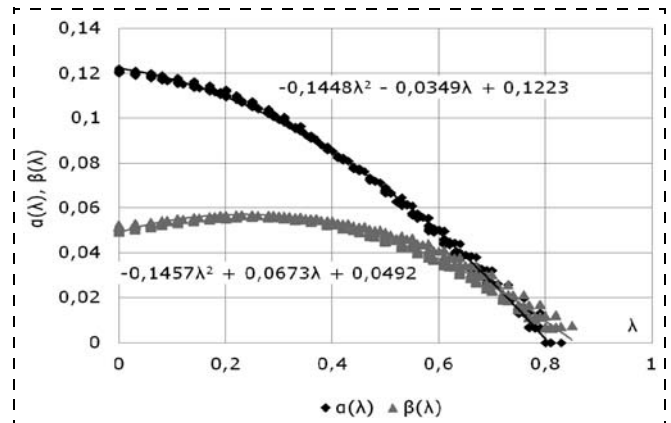


Рис. 1. Зависимость коэффициентов тяги и мощности от относительной поступи (пропеллер APC 8x45MR)

где Ω — угловая скорость пропеллера. Из соотношений (6) и (7) следует:

$$M_{кр} = \frac{N}{2\pi n} = \frac{\beta(\lambda) \rho D^5 n^3}{2\pi n} = \frac{\beta(\lambda)}{2\pi} \rho D^5 n^2. \quad (8)$$

На рис. 1 приведен пример зависимости коэффициентов α и β от относительной поступи λ для одного из пропеллеров серии MR, выпускаемых компанией Landing Products Inc. (США) под торговой маркой APC [5]. Серия пропеллеров APC MR специально предназначена для мультироторных ЛА (MR — MultiRotor). Данные, представленные Landing Products Inc., получены вычислительными методами на основе вихревой теории. Они хорошо согласуются с экспериментальными результатами, приведенными в работах [6, 7].

Для использования в аналитических расчетах зависимости $\alpha(\lambda)$ и $\beta(\lambda)$ можно аппроксимировать. Многочлен второй степени дает хорошее соответствие фактическим данным:

$$\alpha(\lambda) \approx \alpha_0 + \alpha_1 \lambda + \alpha_2 \lambda^2; \quad (9)$$

$$\beta(\lambda) \approx \beta_0 + \beta_1 \lambda + \beta_2 \lambda^2. \quad (10)$$

На рис. 1 сплошными линиями показаны аппроксимирующие зависимости. В табл. 1 приведены коэффициенты аппроксимации $\alpha(\lambda)$ и $\beta(\lambda)$ для пропеллеров APC MR.

Величины α_0 и β_0 представляют собой значения коэффициентов тяги и мощности при работе пропеллера на месте. Значения α_1 и α_2 отрицательны, что говорит о монотонном убывании $\alpha(\lambda)$. Напротив, $\beta_1 > 0$, $\beta_2 < 0$, это свидетельствует о том, что $\beta(\lambda)$ при малых значениях λ возрастает.

В табл. 1 даны также нормированные значения коэффициентов аппроксимации тяги и мощности, которые будут использованы в дальнейшем:

$$\bar{\alpha}_1 = \alpha_1/\alpha_0; \bar{\alpha}_2 = \alpha_2/\alpha_0; \bar{\beta}_1 = \beta_1/\beta_0; \bar{\beta}_2 = \beta_2/\beta_0;$$

$$\bar{\alpha}(\lambda) = 1 + \bar{\alpha}_1 \lambda + \bar{\alpha}_2 \lambda^2;$$

$$\bar{\beta}(\lambda) = 1 + \bar{\beta}_1 \lambda + \bar{\beta}_2 \lambda^2. \quad (11)$$

Аппроксимация коэффициентов тяги и мощности

Пропеллер	Коэффициент тяги					Коэффициент мощности					$\lambda_{\max}$
	α_0	α_1	α_2	$\bar{\alpha}_1$	$\bar{\alpha}_2$	β_0	β_1	β_2	$\bar{\beta}_1$	$\bar{\beta}_2$	
APC 8x45MR	0,1223	-0,0349	-0,1448	-0,2854	-1,1840	0,0492	0,0673	-0,1457	1,3679	-2,9614	0,80638
APC 9x45MR	0,1187	-0,0569	-0,1405	-0,4794	-1,1837	0,0459	0,0513	-0,1387	1,1176	-3,0218	0,73870
APC 10x45MR	0,1140	-0,0763	-0,1291	-0,6693	-1,1325	0,0429	0,0355	-0,1248	0,8275	-2,9091	0,68956
APC 10x55MR	0,1230	-0,0416	-0,1414	-0,3382	-1,1496	0,0511	0,0542	-0,1343	1,0607	-2,6282	0,79710
APC 11x45MR	0,1055	-0,0823	-0,1254	-0,7801	-1,1886	0,0379	0,0292	-0,1182	0,7704	-3,1187	0,64601
APC 12x45MR	0,1006	-0,0915	-0,1196	-0,9095	-1,1889	0,0351	0,0227	-0,1123	0,6467	-3,1994	0,61119
APC 12x55MR	0,1117	-0,0693	-0,1299	-0,6204	-1,1629	0,0428	0,0320	-0,1179	0,7477	-2,7547	0,69816
APC 13x55MR	0,1020	-0,0738	-0,1223	-0,7235	-1,1990	0,0373	0,0225	-0,1104	0,6032	-2,9609	0,66008
APC 14x55MR	0,0983	-0,0829	-0,1172	-0,8433	-1,1923	0,0345	0,0186	-0,1008	0,5391	-2,9217	0,62807
APC 16x55MR	0,0908	-0,0918	-0,1128	-1,0110	-1,2423	0,0300	0,0177	-0,1020	0,5900	-3,4000	0,57825
APC 18x55MR	0,0847	-0,0961	-0,1134	-1,1346	-1,3388	0,0267	0,0144	-0,0986	0,5393	-3,6929	0,53880

Приведены также значения коэффициента скорости $\lambda_{\max}$, при котором коэффициент тяги становится равным нулю.

Характеристика винтомоторной группы

Механическая характеристика бесколлекторного мотора в осях "крутящий момент — частота вращения" представляет собой прямую линию [8, 9] (рис. 2). Характеристика пропеллера — парабола: крутящий момент пропорционален квадрату частоты вращения.

Частота холостого хода мотора n_0 может быть вычислена по значениям питающего напряжения U_0 и постоянной скорости мотора K_V , которая является его паспортной характеристикой:

$$n_0 = U_0 K_V. \quad (12)$$

Точка A на рис. 2 соответствует режиму максимальной тяги у поверхности Земли при работе на месте. Координаты этой точки известны. Уравнение характеристики двигателя — прямой, проходящей через две точки, — можно записать в виде

$$n = n_0 - \frac{n_0 - n_{100}}{M_{100}} M. \quad (13)$$

Из соотношений (5) и (8) следует, что

$$M = \frac{\beta(\lambda) D T}{2\pi\alpha(\lambda)}. \quad (14)$$

В частности, для точки A на рис. 2:

$$M_{100} = \frac{\beta(0) D T_{100}}{2\pi\alpha(0)}. \quad (15)$$

Подставляя выражения (14) и (15) в соотношение (13), получим

$$n = n_0 - \frac{(n_0 - n_{100})\alpha(0)\beta(\lambda)T}{T_{100}\alpha(\lambda)\beta(0)}. \quad (16)$$

Учитывая соотношения (11), поделив обе части формулы (16) на n_0 и выразив максимальную тягу через тяговооруженность и вес ЛА из формулы (1),

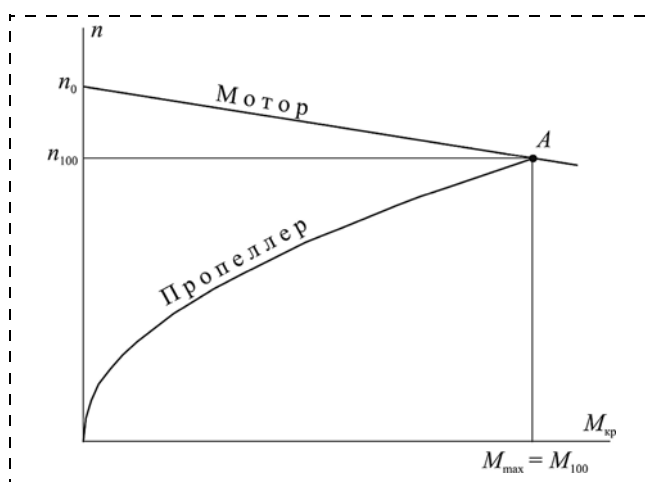


Рис. 2. Характеристика винтомоторной группы

получим уравнение механической характеристики мотора в относительных единицах:

$$\bar{n}(\lambda) = 1 - \frac{(1 - \eta_{100})\bar{\beta}(\lambda)}{k_T G \bar{\alpha}(\lambda)} T, \quad (17)$$

где $\bar{n}(\lambda)$ — относительная частота вращения, а коэффициент $\eta \leq 1$ характеризует жесткость характеристики двигателя:

$$\eta_{100} = \frac{n_{100}}{n_0}. \quad (18)$$

Соотношение (17) определяет относительную частоту вращения как функцию коэффициента скорости λ . Поэтому здесь и далее будем использовать обозначение $\bar{n}(\lambda)$. Величина η_{100} приближенно равна коэффициенту полезного действия двигателя под нагрузкой, создаваемой моментом M_{100} .

Лобовое сопротивление

На заданной высоте мультикоптер при подъеме вверх обладает скоростью, соответствующей определенному значению λ . Плотность воздуха ρ и высота в стандартной атмосфере связаны взаимно однозначной зависимостью. Задача о скороподъемно-

сти может быть сведена к определению зависимости $\rho(\lambda)$, т. е. такой плотности воздуха, которая при данном значении λ обеспечивает баланс сил в соответствии с формулой (2). Введем в рассмотрение относительную плотность воздуха $\bar{\rho}(\lambda)$:

$$\bar{\rho}(\lambda) = \frac{\rho(\lambda)}{\rho_0}, \quad (19)$$

где ρ_0 — плотность воздуха у поверхности Земли. Скорость подъема V выражается через относительную поступь λ из формулы (4) следующим образом:

$$V = \lambda n(\lambda) D. \quad (20)$$

Поделив обе части соотношения (20) на $n_0 D$, получим выражение для безразмерной относительной скорости $\bar{v}(\lambda)$:

$$\bar{v}(\lambda) = \frac{V}{n_0 D} = \lambda \bar{n}(\lambda). \quad (21)$$

Учитывая выражения (19) и (21), преобразуем формулу (3):

$$Y = \frac{C_x \rho_0 S n_0^2 D^2}{2} \bar{\rho}(\lambda) \bar{v}^2(\lambda). \quad (22)$$

Введем в рассмотрение безразмерный коэффициент

$$K_x = \frac{C_x \rho_0 S n_0^2 D^2}{2 G}. \quad (23)$$

Значение K_x равно отношению силы лобового сопротивления к весу при скорости набегающего потока $n_0 D$ и плотности воздуха ρ_0 . Величина $n_0 D$, в свою очередь, пропорциональна скорости на конце лопасти пропеллера при оборотах холостого хода. Диапазон изменения K_x как величины относительной может быть меньше, чем диапазон изменения соответствующих абсолютных величин, что упрощает исследование. Формула (22) теперь запишется в виде

$$Y = G K_x \bar{\rho}(\lambda) \lambda^2 \bar{n}^2(\lambda). \quad (24)$$

Связь плотности воздуха и коэффициента скорости

Запишем выражение (5) для тяги пропеллера, учитывая, что в рассматриваемой задаче не только коэффициент тяги, но также частота вращения и плотность воздуха, при которой достигается заданная скорость подъема, зависят от коэффициента скорости λ :

$$T = \alpha(\lambda) \rho(\lambda) D^4 n^2(\lambda). \quad (25)$$

При работе пропеллера на месте при 100 % газа имеет место соотношение

$$G k_T = \alpha(0) \rho_0 D^4 n_{100}^2. \quad (26)$$

Чтобы перейти к относительным величинам, разделим выражение (25) на (26):

$$\frac{T}{G k_T} = \frac{\alpha(\lambda) \rho(\lambda) n^2(\lambda)}{\alpha(0) \rho_0 n_{100}^2} = \frac{\bar{\alpha}(\lambda) \bar{\rho}(\lambda) \bar{n}^2(\lambda)}{\bar{n}_{100}^2}. \quad (27)$$

Разделив числитель и знаменатель правой части соотношения (27) на n_{100}^2 , получим

$$\frac{T}{G k_T} = \frac{\bar{\alpha}(\lambda) \bar{\rho}(\lambda) \bar{n}^2(\lambda)}{\bar{n}_{100}^2}, \quad (28)$$

откуда

$$T = G k_T \frac{\bar{\alpha}(\lambda) \bar{\rho}(\lambda) \bar{n}^2(\lambda)}{\bar{n}_{100}^2}. \quad (29)$$

Подставляя выражения для тяги (29) и лобового сопротивления (24) в уравнение равновесия (2) и выполняя сокращения, получаем

$$k_T \frac{\bar{\alpha}(\lambda) \bar{\rho}(\lambda) \bar{n}^2(\lambda)}{\bar{n}_{100}^2} = 1 + K_x \bar{\rho}(\lambda) \lambda^2 \bar{n}^2(\lambda). \quad (30)$$

Из выражения (30) можно найти зависимость относительной плотности воздуха от коэффициента скорости:

$$\bar{\rho}(\lambda) = \frac{\bar{n}_{100}^2}{[k_T \bar{\alpha}(\lambda) - \eta_{100}^2 K_x \lambda^2] \bar{n}^2(\lambda)}. \quad (31)$$

Частота вращения пропеллера

В формулу (31) входит неизвестная величина относительной частоты вращения пропеллера $\bar{n}(\lambda)$. Для ее определения подставим выражение для тяги (2) в уравнение механической характеристики двигателя (17). С учетом (24) получим

$$\bar{n}(\lambda) = 1 - \frac{(1 - \eta_{100}) \bar{\beta}(\lambda)}{k_T \bar{\alpha}(\lambda)} [1 + K_x \bar{\rho}(\lambda) \lambda^2 \bar{n}^2(\lambda)]. \quad (32)$$

Формула (32) не может использоваться непосредственно для вычисления $\bar{n}(\lambda)$, однако из (31) можно найти выражение $\bar{\rho}(\lambda) \bar{n}^2(\lambda)$:

$$\bar{\rho}(\lambda) \bar{n}^2(\lambda) = \frac{\bar{n}_{100}^2}{k_T \bar{\alpha}(\lambda) - \eta_{100}^2 K_x \lambda^2}. \quad (33)$$

Подставляя правую часть формулы (33) в правую часть (32) вместо $\bar{\rho}(\lambda) \bar{n}^2(\lambda)$, получим

$$\bar{n}(\lambda) = 1 - \frac{(1 - \eta_{100}) \bar{\beta}(\lambda)}{k_T \bar{\alpha}(\lambda)} \left[1 + \frac{\eta_{100}^2 K_x \lambda^2}{k_T \bar{\alpha}(\lambda) - \eta_{100}^2 K_x \lambda^2} \right]. \quad (34)$$

Зависимость скорости от высоты

Полученные формулы позволяют найти зависимость скорости подъема мультикоптера V от высоты H (назовем ее скороподъемностью) в виде параметрически заданной функции. Роль параметра при этом исполняет коэффициент скорости λ . Изменение λ от 0 до значения, при котором $\bar{\rho}(\lambda) = 1$, соответствует изменению скорости от нуля до скорости вертикального подъема у поверхности Земли, а высоты — от потолка висения до нуля.

Высота в метрах в зависимости от относительной плотности воздуха в стандартной атмосфере вычисляется по формуле В. Бьеркнеса [10]:

$$H(\lambda) = 44\,300(1 - \bar{\rho}^{1/4,256}(\lambda)), \quad (35)$$

скорость — по формуле, которая следует из соотношения (21):

$$V(\lambda) = \lambda \bar{n}(\lambda) D n_0. \quad (36)$$

Относительная частота вращения $\bar{n}(\lambda)$, входящая в выражение (36), определяется по формуле (34), а относительная плотность воздуха $\bar{\rho}(\lambda)$, из выражения (35) — по формуле (31). Данные для вычисления относительных коэффициентов тяги $\bar{\alpha}(\lambda)$ и мощности $\bar{\beta}(\lambda)$ по формулам (11) приведены в табл. 1.

Вместо $V(\lambda)$ можно рассматривать относительную безразмерную скорость $\bar{v}(\lambda)$, определенную в соответствии с формулой (21). Это позволит при анализе скороподъемности уменьшить число обсуждаемых вариантов.

Пример расчета

Выполним расчет скороподъемности для построенного автором квадрокоптера [11] со следующими параметрами: полетная масса 2,7 кг, четыре мотора T-Motor 3506, $K_V = 650 \text{ мин}^{-1} \cdot \text{В}^{-1}$, пропеллеры APC 12x45MR диаметром 12 дюймов, $D = 0,30 \text{ м}$, максимальная тяга одной ВМГ $1,17 \cdot 10^{-2} \text{ Н}$ при 6255 мин^{-1} и напряжении питания $U_0 = 14,8 \text{ В}$. Тяговооруженность $k_T = 1,17 \cdot 4/2,7 = 1,73$. Диаметр эквивалентной по лобовому сопротивлению круглой пластины оценивается в 0,15 м, безразмерный коэффициент лобового сопротивления в этих условиях $K_X = 1,13$. Обороты холостого хода $n_0 = 650 \cdot 14,8 = 9620 \text{ мин}^{-1} = 160,3 \text{ с}^{-1}$, коэффициент жесткости характеристики двигателя $\eta_{100} = 6255/9620 = 0,65$. Рассчитанный по этим данным график зависимости скорости вертикального подъема и высоты показан на рис. 3.

Максимальная скорость подъема на уровне Земли 10,95 м/с, максимальная высота (потолок висения) 8926 м.

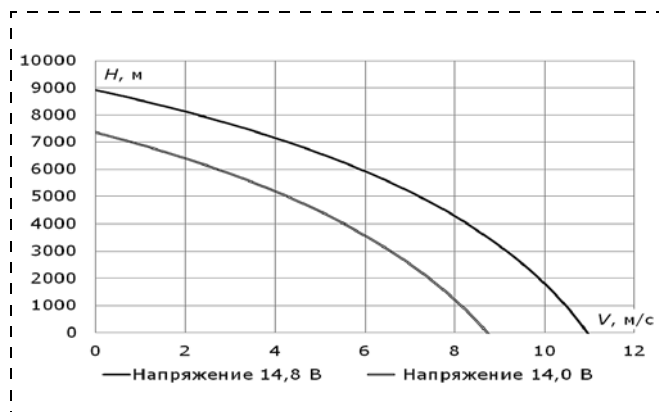


Рис. 3. Диаграмма скороподъемности мультикоптера

Потолок висения

Полученные результаты позволяют вычислить потолок висения мультикоптера. Для этого достаточно подставить в соответствующие формулы $\lambda = 0$. Учитывая, что $\bar{\alpha}(0) = 1$ и $\bar{\beta}(0) = 1$, из соотношения (34) получаем

$$\bar{n}(0) = 1 - \frac{(1 - \eta_{100})}{k_T}. \quad (37)$$

Из формулы (31) с учетом выражения (37) следует

$$\bar{\rho}(0) = \left(\frac{\eta_{100} \sqrt{k_T}}{k_T + \eta_{100} - 1} \right)^2. \quad (38)$$

Потолок висения в метрах выражается формулой

$$H_{\text{вис}} = 44\,300 \cdot \left[1 - \left(\frac{\eta_{100} \sqrt{k_T}}{k_T + \eta_{100} - 1} \right)^{2/4,256} \right]. \quad (39)$$

Зависимость от характеристик пропеллера

Как видно из формулы (39), потолок висения не зависит от аэродинамических характеристик пропеллера. Однако в формулы, определяющие скороподъемность на меньших высотах, входят коэффициенты тяги $\bar{\alpha}(\lambda)$ и мощности $\bar{\beta}(\lambda)$. Чтобы при изучении влияния параметров мультикоптера на скорость подъема не рассматривать каждый пропеллер в отдельности, можно попытаться унифицировать характеристики пропеллеров.

Значения нормированных коэффициентов тяги $\bar{\alpha}(\lambda)$ и мощности $\bar{\beta}(\lambda)$ при $\lambda = 0$ равны 1. Значения же коэффициента скорости, при которых коэффициент тяги становится равным нулю (обозначим λ_{max}), для различных пропеллеров существенно отличаются. Чтобы найти эти значения, нужно решить квадратное уравнение $\alpha_0 + \alpha_1 \lambda + \alpha_2 \lambda^2 = 0$. Вычисленные таким образом значения λ_{max} приведены в табл. 1.

На рис. 4 показана диаграмма скороподъемности, рассчитанная для трех пропеллеров: APC 8x45MR, APC 12x45MR и APC 18x55MR. При этом по оси абсцисс отложены значения $\bar{v}/\lambda_{\text{max}}$, т. е. относительная скорость, нормированная значениями λ_{max} .

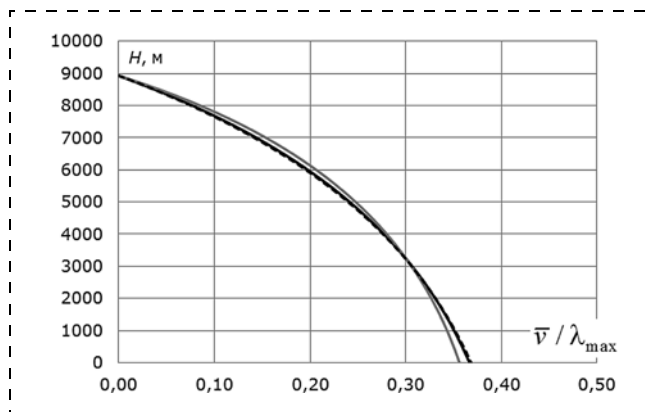


Рис. 4. Нормированные диаграммы скороподъемности

Как видно, отличия в ходе кривых невелики. Поэтому в дальнейших расчетах будем использовать характеристики пропеллера APC 12x45MR. Чтобы получить приближенные значения относительной скорости подъема для другого пропеллера, можно воспользоваться формулой

$$\bar{v} = \bar{v}^* \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\max}^*}, \quad (40)$$

где звездочкой обозначены данные пропеллера APC 12x45MR.

Скороподъемность у поверхности Земли

Чтобы определить максимальную скорость вертикального подъема у поверхности Земли, нужно найти значение коэффициента скорости λ , при котором относительная плотность воздуха $\bar{\rho}(\lambda)$ равна 1, т. е. решить относительно λ уравнение (31) с левой частью, равной 1. Затем по формулам (34) и (21) вычисляются относительная частота вращения и относительная безразмерная скорость подъема.

В табл. 2 приведены рассчитанные таким способом значения относительной безразмерной скорости $\bar{v}$ для различных значений тяговооруженности, коэффициента лобового сопротивления K_x и коэффициента жесткости характеристики двигателя η_{100} . Расчет выполнен с использованием нормированных аэродинамических коэффициентов пропеллера APC 12x45MR.

Данные табл. 2 можно использовать для определения скороподъемности при других значениях параметров путем интерполяции табличных значений.

В табл. 3 для примера даются значения абсолютной скорости подъема у поверхности Земли для квадрокоптера из приведенного выше примера: пропеллер диаметром 12 дюймов ($D = 0,30$ м), обороты холостого хода 9620 мин^{-1} ($n_0 = 160,3 \text{ с}^{-1}$).

Зависимость от напряжения питания

Напряжение аккумуляторной батареи (АКБ) уменьшается по мере расходования ее заряда. Поэтому, например, зависимость, показанную на графике на рис. 3, нельзя использовать для расчета времени подъема ЛА на заданную высоту. Этот график лишь показывает, с какой скоростью может подниматься ЛА на заданной высоте при том же напряжении питания, при котором определялся запас тяги. В рассмотренном выше примере это 14,8 В — номинальное напряжение батареи из четырех литий-полимерных аккумуляторов.

Чтобы не увеличивать число параметров задачи при учете изменения напряжения АКБ, можно вычислить значения тяговооруженности и коэффициента жесткости механической характеристики двигателя для винтомоторной группы (ВМГ), работающей при изменившемся напряжении. Для этого нужно определить координаты точки A' (рис. 5) на характеристике ВМГ по известным координатам точки A .

Таблица 2

Относительная скороподъемность у поверхности Земли

K_x	η_{100}	Тяговооруженность k_T					
		1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50
		Относительная скорость $\bar{v}$					
0,0	1,0	0,1783	0,2707	0,3294	0,3704	0,4008	0,4243
	0,8	0,1399	0,2273	0,2859	0,3277	0,3590	0,3832
	0,6	0,1032	0,1787	0,2328	0,2725	0,3026	0,3261
1,0	1,0	0,1623	0,2445	0,2986	0,3378	0,3678	0,3917
	0,8	0,1306	0,2088	0,2621	0,3013	0,3315	0,3556
	0,6	0,0988	0,1679	0,2176	0,2546	0,2834	0,3063
2,0	1,0	0,1505	0,2255	0,2760	0,3134	0,3426	0,3663
	0,8	0,1233	0,1948	0,2443	0,2813	0,3103	0,3339
	0,6	0,0952	0,1593	0,2055	0,2405	0,2680	0,2903

Таблица 3

Скороподъемность у поверхности Земли

K_x	η_{100}	Тяговооруженность k_T					
		1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50
		Скорость, м/с					
0,0	1,0	8,7	13,2	16,1	18,1	19,6	20,7
	0,8	6,8	11,1	14,0	16,0	17,5	18,7
	0,6	5,0	8,7	11,4	13,3	14,8	15,9
1,0	1,0	7,9	11,9	14,6	16,5	18,0	19,1
	0,8	6,4	10,2	12,8	14,7	16,2	17,4
	0,6	4,8	8,2	10,6	12,4	13,8	15,0
2,0	1,0	7,4	11,0	13,5	15,3	16,7	17,9
	0,8	6,0	9,5	11,9	13,7	15,2	16,3
	0,6	4,7	7,8	10,0	11,8	13,1	14,2

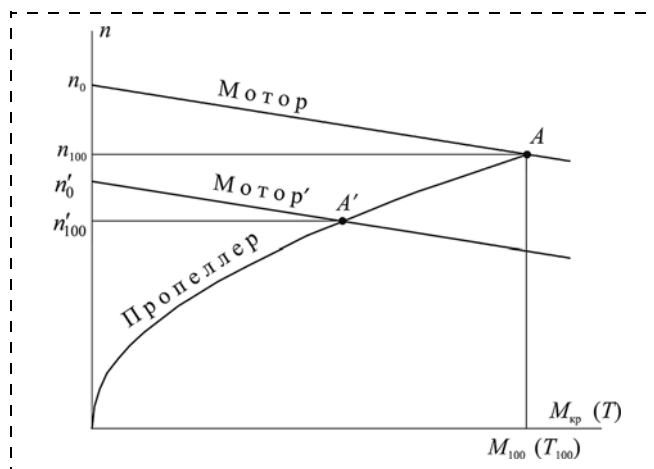


Рис. 5. Характеристика ВМГ при изменении напряжения питания

На рис. 5 штрихом отмечены параметры мотора, работающего при напряжении U'_0 , отличном от U_0 . Обозначим коэффициент изменения напряжения

$$u = \frac{U'_0}{U_0}. \quad (41)$$

Характеристики двигателя при различном напряжении питания представляют собой параллельные линии. При этом

$$n'_0 = U'_0 K_V = u n_0. \quad (42)$$

Из уравнения характеристики двигателя (16) при $\lambda = 0$ (тяговооруженность определяется при работе на месте) получаем

$$n = n_0 - \frac{(n_0 - n_{100})}{T_{100}} T. \quad (43)$$

Наклон характеристики не меняется при изменении напряжения. Учитывая, что $T_{100} = G k_T$, а $T'_{100} = G k'_T$, можно записать:

$$\begin{aligned} n'_{100} &= n'_0 - \frac{(n_0 - n_{100})}{T_{100}} T'_{100} = \\ &= n'_0 - \frac{(n_0 - n_{100})}{k_T} k'_T. \end{aligned} \quad (44)$$

Уравнение характеристики пропеллера:

$$n = n_{10} \sqrt{\frac{T}{T_{100}}}, \quad (45)$$

для точки A' :

$$n'_{100} = n_{100} \sqrt{\frac{T'_{100}}{T_{100}}} = n_{100} \sqrt{\frac{k'_T}{k_T}}. \quad (46)$$

Подставляя n'_{100} из формулы (46) в соотношение (44), получим уравнение для нахождения k'_T — коэффициента тяговооруженности при измененном напряжении:

$$n_{100} \sqrt{\frac{k'_T}{k_T}} = n'_0 - \frac{(n_0 - n_{100})}{k_T} k'_T. \quad (47)$$

Разделим выражение (47) на n_0 . Получим

$$\eta_{100} \sqrt{\frac{k'_T}{k_T}} = u - \frac{(1 - \eta_{100})}{k_T} k'_T. \quad (48)$$

Обозначим $x = \sqrt{k'_T}$, соответственно, $k'_T = x^2$. Тогда из соотношения (48) получаем уравнение:

$$(1 - \eta_{100})x^2 + \sqrt{k_T} \eta_{100} x - k_T u = 0. \quad (49)$$

При $\eta_{100} = 1$ его решением является

$$x = \sqrt{k_T} u; \quad k'_T = k_T u^2. \quad (50)$$

При $\eta_{100} < 1$ решением будет один из корней квадратного уравнения (49):

$$\begin{aligned} x &= \sqrt{k_T} \frac{\sqrt{\eta_{100}^2 + 4u(1 - \eta_{100})} - \eta_{100}}{2(1 - \eta_{100})}; \\ k'_T &= k_T \left[\frac{\sqrt{\eta_{100}^2 + 4u(1 - \eta_{100})} - \eta_{100}}{2(1 - \eta_{100})} \right]^2. \end{aligned} \quad (51)$$

Обозначим коэффициент пересчета тяговооруженности $\bar{k}_T$:

$$\bar{k}_T = \begin{cases} u_2 \text{ при } \eta_{100} = 1; \\ \left[\frac{\sqrt{\eta_{100}^2 + 4u(1 - \eta_{100})} - \eta_{100}}{2(1 - \eta_{100})} \right]^2 \text{ при } \eta_{100} < 1; \end{cases} \quad (52)$$

$$k'_T = \bar{k}_T k_T. \quad (53)$$

Для нахождения коэффициента жесткости характеристики двигателя при измененном напряжении разделим левую и правую части уравнения (44) на n'_0 , а затем числитель и знаменатель дроби в правой части разделим еще и на n_0 :

$$\eta'_{100} = 1 - \frac{(n_0 - n_{100})}{n'_0} \frac{k'_T}{k_T} = 1 - \frac{1 - \eta_{100}}{u} \bar{k}_T. \quad (54)$$

Формулы (52), (53) и (54) с учетом (41) и (42) позволяют для расчета скорости подъема и потолка висения при напряжении, отличном от того, при котором определялась тяговооруженность, воспользоваться приведенными выше результатами, полученными без учета изменения напряжения.

На рис. 3 показана диаграмма скороподъемности мультикоптера при напряжении, пониженном до 14,0 В. Расчет выполнен по следующим параметрам: коэффициент изменения напряжения $u = 14,0/14,8 = 0,946$; коэффициент пересчета тяговооруженности $\bar{k}_T = 0,921$ по формуле (52) при $\eta_{100} = 0,65$; измененный коэффициент тяговооруженности $k'_T = \bar{k}_T k_T = 0,921 \cdot 1,73 = 1,59$; измененный коэффициент жесткости характеристики двигателя по формуле (54) $\eta'_{100} = 0,659$; обороты холостого хода $n'_0 = u n_0 = 0,946 \cdot 160,3 = 151,7 \text{ с}^{-1}$.

Список литературы

1. **Справочник** авиаконструктора. Т. 1. Аэродинамика самолета. М.: Изд. ЦАГИ, 1937. 512 с.
2. **Юрьев Б. Н.** Аэродинамический расчет вертолетов. М.: Оборонгиз, 1956.
3. **Прицкер Д. М., Сахаров Г. И.** Аэродинамика. М: Машиностроение, 1968.
4. **Обуховский А. Д.** Аэродинамика воздушного винта: учеб. пособ. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. 80 с.
5. **Landing Products Inc.** APC Propeller Performance Data. URL: <http://www.apcprop.com/Articles.asp?ID=270>
6. **Brandt J. B., Selig M. S.** Propeller Performance Data at Low Reynolds Number // 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA Paper. 2011-1255, Orlando, FL, January 2011.
7. **Brandt J. B., Deters R. W., Ananda G. K., Selig M. S.** UIUC Propeller Database, University of Illinois at Urbana-Champaign. URL: <http://m-selig.ae.illinois.edu/props/propDB.html>
8. **Овчинников И. Е.** Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность) / Курс лекций. СПб.: Корона-Век, 2006. 336 с.
9. **Xia Chang-Hang.** Permanent magnet brushless DC motor drives and controls. John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2012.
10. **Фабрикант Н. Я.** Аэродинамика. Общий курс. М.: Наука, 1964. 815 с.
11. **Свердлов С.** Квадрокоптер. URL: <http://forum.rcdesign.ru/blogs/174358/blog18011.html>

Rate of Climb of Electric Multicopter

S. Z. Sverdlov, c3c@uni-vologda.ac.ru✉,
Vologda State University, Vologda, 160000, Russian Federation

Corresponding author: **Sverdlov Sergei Z.**, PhD, Associate Professor,
Vologda State University, Vologda, 160000, Russian Federation,
e-mail: c3c@uni-vologda.ac.ru

Received on January 25, 2016
Accepted on February 04, 2016

The aim of the research is to study the dependence of the ascensional rate of electric multicopter from the height. Ascent rate is calculated for the operation of electric drive with 100 % of the throttle. The following facts are considered: brushless electric motors, which functioning does not depend on the air density and height, are used; fixed geometry rotors are used; the weight of the aircraft during the flight remains unchanged; the battery voltage decreases as its charge runs down; except for the time of start, the inertial forces do not play a significant role in a vertical flight. Rate of climb on the ground and hovering ceiling are determined. The dependence of the multicopter vertical velocity on the altitude was discovered. The calculation takes into account thrust-weight ratio, electric motor characteristics and drag force. Dependence is defined as a parametric function with advance ratio as a parameter. The formula of the hovering ceiling is proposed. Approximated aerodynamic characteristics of propellers used in multicopters are provided. The dependence of the rate of climb of the aerodynamic characteristics of the propeller is examined. A method of adaptation of the results for different propellers is proposed. The calculation of the rate of climb on the ground requires a numerical solution of the equation with advance ratio as the unknown. Solution results for several parameters values are presented as a table. These data can be used for calculation of climb as an interpolation of table values. The method of calculation of the rate of climb and hovering ceiling with changing supply voltage is proposed. Instead of increasing the dimension of the problem, it's proposed to perform the calculation of the thrust-weight coefficients and inflexibility of the engine characteristics for altered supply voltage. Examples of calculation per the method proposed are provided for a quadcopter built by the author.

Keywords: electric multicopter, rate of climb, hovering ceiling, thrust-to-weight ratio, BLDC-motor

For citation:

Sverdlov S. Z. Rate of Climb of Electric Multicopter, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 6, pp. 425–432.

DOI: 10.17587/mau.17.425-432

References

1. **Spravochnik aviakonstruktora. V. I. Ajerodinamika samoleta** (Aircraft designer handbook. The aerodynamics of the aircraft), Moscow, CAGI Publishing, 1937, 512 p.
2. **Jur'ev B. N. Ajerodinamicheskij raschet vertoletov** (Aerodynamic calculation of helicopters), Moscow, Oborongiz, 1956.
3. **Pricker D. M., Saharov G. I. Ajerodinamika** (Aerodynamics), Moscow, Mashinostroenie, 1968.
4. **Obuhovskij A. D. Ajerodinamika vozdušnogo vinta** (Propeller aerodynamics), Novosibirsk, NGTU Publishing, 2009, 80 p.
5. **Landing Products Inc. APC Propeller Performance Data**, available at: <http://www.apcprop.com/Articles.asp?ID=270>
6. **Brandt J. B., Selig M. S. Propeller Performance Data at Low Reynolds Numbers**, 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA Paper 2011–1255, Orlando, FL, January 2011.
7. **Brandt J. B., Deters R. W., Ananda G. K., Selig M. S. UIUC Propeller Database**, University of Illinois at Urbana-Champaign, available at: <http://m-selig.ae.illinois.edu/props/propDB.html>
8. **Ovchinnikov I. E. Ventil'nye jelektricheskie dvigateli i privod na ih osnove** (malaja i srednjaja moshhnost') (BLDC electric motors and drive based on them (small and average power)), Kurs lekcij, SPb., Korona-Vek, 2006, 336 p.
9. **Xia Chang-Hang. Permanent magnet brushless DC motor drives and controls**, John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2012.
10. **Fabrikant N. Ja. Ajerodinamika** (Aerodynamics), Moscow, Nauka, 1964, 815 p.
11. **Sverdlov S. Kvadroljot** (Quadcopter), available at: <http://forum.rcdesign.ru/blogs/174358/blog18011.html>

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: (499) 269-5397, тел./факс: (499) 269-5510

Технический редактор *Е. В. Конова*. Корректор *Т. В. Пчелкина*.

Сдано в набор 31.03.2016. Подписано в печать 12.05.2016. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН616. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.