

С. А. Кабанов, д-р техн. наук, проф., kaba-sa@mail.ru,
 Д. С. Кабанов, канд. техн. наук, науч. сотр., kabanovds@mail.ru,
 Ф. В. Митин, канд. техн. наук, доц., fedor28@list.ru,

Балтийский государственный технический университет "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург

Оптимизация курсового движения беспилотного автомобиля при наличии препятствий и возмущений*

Рассматривается оптимизация процесса управления беспилотным автомобилем. В настоящее время идет активная разработка и использование беспилотного транспорта. Существует практика применения беспилотных шаттлов на закрытых площадках (конференциях, форумах и пр.). Тестируется применение автомобилей с автоматизированным управлением в городских условиях и на пересеченной местности. В связи с этим важной является разработка алгоритмов управления, позволяющих решать задачи контроля автомобиля в режиме реального времени при действии возмущений и наличии препятствий. С развитием технологий и увеличением вычислительных мощностей появляется возможность использовать алгоритмы оптимального управления, которые позволяют добиться лучших результатов при выполнении терминальных условий, минимизации энергетических затрат. В данной работе показано решение задачи оптимального управления беспилотным автомобилем при наличии штрафной функции, шумов измерений и возмущений по неполным данным с использованием принципа разделения. Решена задача оптимального управления в детерминированной и стохастической постановках с использованием алгоритма с прогнозирующей моделью с функционалом обобщенной работы. Показана эффективность применения фильтра Калмана в зависимости от разной интенсивности шумов измерений и различной скорости движения автомобиля. Приведены результаты численного моделирования, показывающие возможность использования предложенного алгоритма для осуществления управления беспилотным автомобилем при различных начальных и конечных условиях. Разработанный алгоритм успешно применен для объезда движущегося объекта.

Ключевые слова: математическая модель, беспилотный автомобиль, управление, оптимизация

Введение

В настоящее время активно идет процесс информатизации и внедрения цифровой инфраструктуры во все сферы жизни общества. Одним из направлений информатизации является автоматизация и роботизация. Развитие микропроцессорной техники делает данные направления быстроразвивающимися. Эти процессы также влияют и на внедрение беспилотных подвижных аппаратов, в частности беспилотных автомобилей [1–3].

Беспилотный автомобиль (Unmanned Ground Vehicle — беспилотный наземный аппарат) — транспортное средство, передвигающееся по земле без участия человека или с неполным его участием, оборудованное автоматической системой управления.

Управление беспилотным автомобилем осуществляется посредством датчиков и программного обеспечения, которое обеспечивает работу всех систем автомобиля: рулевого управ-

ления, коробки передач, тормозной системы и др. Датчики получают информацию об окружающей обстановке и передают эту информацию для управления. Наиболее распространенными датчиками являются лидары — дальномеры оптического распознавания, радары, системы глобального позиционирования, датчики одометрии и гиростабилизаторы [4–7].

Основные принципы работы беспилотных автомобилей построены на решении следующих задач:

- перемещение автомобиля из одного заданного пункта в другой самым оптимальным путем с учетом данных карты;

- распознавание препятствий, знаков, светофоров, четкое построение пути при разных погодных условиях;

- самостоятельная регуляция скорости на опасных участках и поворотах, а также при объезде препятствий.

Беспилотные автомобили применяются в различных областях: в сельском хозяйстве, для помощи людям с особыми потребностями, в перевозке грузов в опасных зонах или на большие расстояния. Изучают и разрабатывают беспилотные автомобили для доставки грузов множество компаний как в РФ, так и за рубежом [8, 9].

Для решения задачи управления интересно рассмотреть алгоритмы оптимального управления, которые позволят самостоятельно про-

*Работа выполнена в организации ФГБОУ ВО БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (доп. соглашение от 09.06.2020 № 075-03-2020-045/2 на выполнение базовой части государственного задания "Разработка фундаментальных основ создания и управления группировками высокоскоростных беспилотных аппаратов космического и воздушного базирования и группами робототехнических комплексов наземного базирования")

кладывать маршрут до заданной точки при наличии подвижных препятствий, возмущений и шумов измерений [11].

Математическая модель

Рассматривается задача оптимального управления траекторией движения автомобиля в горизонтальной плоскости. В работе [10] на основе уравнения Лагранжа II-го рода получена система дифференциальных уравнений, описывающая динамику курсового движения автомобиля. В работе [12] для исследований курсового движения эти уравнения сведены к системе обыкновенных дифференциальных уравнений пятого порядка.

При составлении данных уравнений приняты следующие допущения:

1. Кузов автомобиля — твердое тело, имеющее продольную плоскость симметрии, т. е. не учитывается деформация рамы на кручение и изгиб.

2. Центр тяжести кузова все время находится в продольной плоскости и движется так, что проекция его скорости на горизонтальную плоскость дороги остается постоянной.

3. Отсутствует влияние продольных и поперечных реакций дороги на колебания масс автомобиля.

4. Оси мостов движутся в плоскостях, перпендикулярных к плоскости рамы; траектории движения центров масс — прямые, нормальные к плоскости рамы.

5. Моменты инерции мостов относительно осей вращения колес равны нулю.

6. Неуравновешенность и гироскопические моменты вращающихся масс трансмиссии и двигателя равны нулю.

7. Колебания масс автомобиля малы.

8. Контакт шин с дорогой точечный.

Данная схема применима для расчета движения автомобиля в определенном коридоре (дороге), внутри которого должен находиться автомобиль. Поэтому при построении сложного маршрута необходимо разбивать его на участки с более простыми маневрами. Расчетная схема, приведенная ниже, является классическим объектом исследования в теории автомобиля. Ее можно применять для качественного изучения простейших случаев курсового движения автомобиля по горизонтальной ровной поверхности без учета поперечного крена кузова при воздействии внешних активных сил. Применение та-

кой схемы допустимо, когда можно пренебречь нелинейностью характеристик подвески и шин. В противном случае потребуется применять для исследования движения автомобиля уравнения, описывающие самый общий случай движения, и соответствующую модель качения колеса.

В данной статье в качестве математической модели использована следующая система дифференциальных уравнений:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}(\mathbf{X}, \mathbf{u}, t) + \xi_x,$$

где $\mathbf{X} = (V_z \ \omega_y \ z \ \psi \ x)^T$ — вектор состояния; $\xi_x = [\xi_{x1} \ \xi_{x2} \ \xi_{x3} \ \xi_{x4} \ \xi_{x5}]^T$ — возмущения с интенсивностью $\mathbf{B}_x = \text{diag}(B_{x1} \ B_{x2} \ B_{x3} \ B_{x4} \ B_{x5})$; $\mathbf{u} = (u_\theta \ u_V \ u_t)^T$ — вектор управления; t — время; V_z — боковая составляющая скорости; x и z — продольная и боковая дальности; ω_y — проекция абсолютной угловой скорости на вертикальную ось (угловая скорость рыскания); ψ — угол поворота по курсу (рыскания). В поэлементном виде система представляется следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{V}_z &= -\frac{2(k_{y1} + k_{y2})}{mV} V_z + \\ &+ \left(\frac{2(k_{y2}b - k_{y1}a)}{mV} - V \right) \omega_y + \frac{2k_{y1}}{m} \theta + \xi_{x1}; \\ \dot{\omega}_y &= \frac{2(k_{y2}b - k_{y1}a)}{I_y V} V_z - \\ &- \left(\frac{2(k_{y1}a^2 + k_{y2}b^2)}{I_y V} \right) \omega_y + \frac{2k_{y1}}{I_y} \theta + \xi_{x2}; \quad (1) \\ \dot{z} &= V_z + V_x \psi + \xi_{x3}; \\ \dot{\psi} &= \omega_y - V_x k_r + \xi_{x4}; \\ \dot{x} &= V_x + \xi_{x5}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} k_r &= \sqrt{\frac{(x'^2 + z'^2)(x''^2 + z''^2) - (x'x'' + z'z'')}{(x'^2 + z'^2)^3}}; \\ \dot{\theta} &= u_\theta; \dot{V}_x = u_V; \dot{t}_f = u_t; \text{sign} k_r = \text{sign} z''; \\ x' &= \frac{x_1 - x_0}{\Delta t}; x'' = \frac{x_2 - 2x_1 + x_0}{\Delta t^2}; \\ z' &= \frac{z_1 - z_0}{\Delta t}; z'' = \frac{z_2 - 2z_1 + z_0}{\Delta t^2}; \\ V &= \sqrt{V_z^2 + V_x^2}; \end{aligned}$$

V_x — продольная составляющая скорости; m — масса автомобиля; a и b — расстояния от центра тяжести до переднего и заднего мостов; k_{y1} и

k_{y2} — коэффициенты сопротивления уводу шин передней и задней осей; k_r — кривизна средней линии траектории; θ — угол поворота передних колес; u_θ — управление углом поворота колес; u_t — управление интервалом оптимизации; u_v — управление скоростью; t_f — момент окончания процесса оптимизации. Приняв автомобиль за прямоугольной параллелепипед, момент инерции определяем как $I_y = 1/12m(a^2 + b^2)$.

Примем, что измерению доступны угловая скорость рыскания ω_z , координаты x и z . Для этого предполагается использовать датчик 4GNSS OC-213 [13]. Для задачи курсового движения автомобиля уравнения наблюдения рассмотрим в виде

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(x, y) + \xi_z, \quad (2)$$

где $\mathbf{z} = [0 \ z_2 \ z_3 \ 0 \ z_5]^T$, $\mathbf{h} = [0 \ \omega_z \ y \ 0 \ x]^T$, $\xi_z = [\xi_{z1} \ \xi_{z2} \ \xi_{z3} \ \xi_{z4} \ \xi_{z5}]^T$ — случайные процессы типа белого шума с интенсивностью $\mathbf{B}_z = \text{diag}(B_{z1}, B_{z2}, B_{z3}, B_{z4}, B_{z5})$.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{z}} &= \hat{V}_z - V_x \hat{\psi} + R_{32} B_{z2}^{-1} (z_2 - \hat{\omega}_y) + \\ &+ R_{33} B_{z3}^{-1} (z_3 - \hat{z}) + R_{35} B_{z5}^{-1} (z_5 - \hat{x}); \\ \dot{\hat{\psi}} &= \hat{\omega}_y - V_x k_r + R_{42} B_{z2}^{-1} (z_2 - \hat{\omega}_y) + \\ &+ R_{43} B_{z3}^{-1} (z_3 - \hat{z}) + R_{45} B_{z5}^{-1} (z_5 - \hat{x}); \\ \dot{\hat{x}} &= V_x + R_{52} B_{z2}^{-1} (z_2 - \hat{\omega}_y) + \\ &+ R_{53} B_{z3}^{-1} (z_3 - \hat{z}) + R_{55} B_{z5}^{-1} (z_5 - \hat{x}). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{R}} &= \mathbf{f}_x \mathbf{R} + \mathbf{R} \mathbf{f}_x^T - \mathbf{R} \mathbf{h}_x^T \mathbf{B}_z^{-1} \mathbf{h}_x \mathbf{R} + \mathbf{B}_x, \\ \mathbf{R}(t_0) &= \mathbf{R}_0. \end{aligned}$$

Здесь

$$\mathbf{f}_x = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial x}; \quad \mathbf{h}_x = \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial x}; \quad \mathbf{h}_x = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{f}_x = \begin{bmatrix} \frac{2V_z^2(k_{y1} + k_{y2})}{m(V_x^2 + V_z^2)^{3/2}} - \frac{2(k_{y1} + k_{y2})}{m(V_x^2 + V_z^2)^{1/2}} - \omega_y \left(\frac{V_z}{(V_x^2 + V_z^2)^{1/2}} - \frac{2V_z(k_{y2}b - k_{y1}a)}{m(V_x^2 + V_z^2)^{3/2}} \right) & -(V_x^2 + V_z^2)^{1/2} - \frac{2(k_{y2}b - k_{y1}a)}{m(V_x^2 + V_z^2)^{1/2}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2(k_{y2}b - k_{y1}a)}{I_y(V_x^2 + V_z^2)^{1/2}} - \frac{2V_z^2(k_{y2}b - k_{y1}a)}{I_y(V_x^2 + V_z^2)^{3/2}} + \frac{2V_z\omega_y(k_{y2}b - k_{y1}a)}{I_y(V_x^2 + V_z^2)^{3/2}} & -\frac{2(k_{y1}a^2 + k_{y2}b^2)}{I_y(V_x^2 + V_z^2)^{1/2}} & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & V_x & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

Задача управления

В соответствии с принципом разделения задаче управления предшествует задача оценивания вектора состояния по неполным данным, заданным уравнением (1). Оптимальную оценку можно получить с помощью фильтра Калмана, уравнения которого для данной задачи будут иметь вид

$$\begin{aligned} \dot{\hat{V}}_z &= -\frac{2(k_{y1} + k_{y2})}{mV} \hat{V}_z + \left(\frac{2(k_{y2}b - k_{y1}a)}{mV} - V \right) \hat{\omega}_y + \\ &+ \frac{2k_{y1}}{m} \theta + R_{12} B_{z2}^{-1} (z_2 - \hat{\omega}_y) + \\ &+ R_{13} B_{z3}^{-1} (z_3 - \hat{z}) + R_{15} B_{z5}^{-1} (z_5 - \hat{x}); \\ \dot{\hat{\omega}}_y &= \frac{2(k_{y2}b - k_{y1}a)}{I_y V} \hat{V}_z - \left(\frac{2(k_{y1}a^2 + k_{y2}b^2)}{I_y V} \right) \hat{\omega}_y + \\ &+ \frac{2k_{y1}}{I_y} \theta + R_{22} B_{z2}^{-1} (z_2 - \hat{\omega}_y) + \\ &+ R_{23} B_{z3}^{-1} (z_3 - \hat{z}) + R_{25} B_{z5}^{-1} (z_5 - \hat{x}); \end{aligned}$$

$R_{ii}(t_0) = R_0$, $i = \overline{1, n}$, остальные элементы матрицы начальных ковариаций ошибок оценивания принимались равными нулю.

Главная с инженерной точки зрения задача, возникающая при синтезе фильтра, — задать математические модели шумов. Согласно работе [10] шумы системы "автомобиль—водитель" могут быть заданы в виде белого шума со спектральной плотностью мощности, равной единице.

Требуется перевести автомобиль из начального положения $\mathbf{X}(0)$ в конечное $\mathbf{X}(t_f)$ с учетом объезда препятствий при наличии внешних возмущений ξ_x и шумов измерений ξ_z .

Критерий оптимальности выбран в виде функционала А. А. Красовского [14, 15]

$$I = V_f(x, t_f) + \int_{t_0}^{t_f} Q(x, t) dt + 0,5 \int_{t_0}^{t_f} (\mathbf{u}^T \mathbf{k}^{-2} \mathbf{u} + \mathbf{u}_0^T \mathbf{k}^{-2} \mathbf{u}_0) dt,$$

где $V_f = 0,5\rho_1[x(t_f) - x_f]^2 + 0,5\rho_2[z(t_f) - z_f]^2$; $\rho_1, \rho_2, \mathbf{k} = \text{diag}(k_\theta, k_v, k_d)$ — заданные коэффициенты; \mathbf{u}_0 — оптимальные значения \mathbf{u} ; $Q(x, y)$ —

функция штрафа, ограничивающая маневры автомобиля при наличии препятствий по пути следования:

$$Q(x, t) = \begin{cases} 0, 5\Delta^T \beta \Delta, & |\Delta x| < q_x, |\Delta z| < q_z; \\ 0, & \end{cases}$$

где $\Delta = (\Delta x \ \Delta z)^T$, $\beta = \text{diag}(\beta_1, \beta_2)$, Δx , Δz — запретная область движения автомобиля; β_1 , β_2 — заданные коэффициенты; q_x , q_z — заданные размеры штрафной области.

Общепринятая на практике постановка задачи совмещенного синтеза оптимального управления системами опирается на теорему разделения. Согласно этой теореме оптимальная система управления состоит из оптимального фильтра, формирующего оценки вектора состояния системы, и оптимального регулятора, определяющего управление уже в детерминированной постановке в предположении, что вектор состояния известен точно. Результат этой теоремы, доказанной для линейных систем, вполне обоснованно при малых ошибках оценивания переносится на нелинейные системы [14, 16, 17]. В противном случае и без того сложная и трудоемкая задача резко усложняется. В этом случае можно, например, в силу двойственности задач оптимального управления и оценивания применить подход к совмещенному синтезу управления с рассмотрением функционала обобщенной работы. В данной статье для построения управления применяется линеаризованный фильтр Калмана и алгоритм с прогнозирующей моделью [15].

Гамильтониан задачи имеет вид

$$H = p_V \dot{V}_z + p_\omega \dot{\omega}_y + p_z \dot{z} + p_\psi \dot{\psi} + p_x \dot{x} + p_\theta \dot{\theta} + p_{V_x} \dot{V}_x + p_t \dot{t} + Q + 0, 5 \mathbf{u}^T \mathbf{k}^{-2} \mathbf{u}_0,$$

где уравнения для сопряженных переменных имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{p}_V = & p_V \left[\omega_y \left(\frac{V_z}{V} + \frac{2(k_{y2}b - k_{y1}a)V_z}{mV^3} \right) + \right. \\ & \left. + \frac{2(k_{y1} + k_{y2})}{mV} - \frac{2(k_{y1} + k_{y2})V_z^2}{mV^3} \right] + \\ & - p_z - p_\omega \left[\frac{2(k_{y2}b - k_{y1}a)}{I_y V} - \frac{2(k_{y2}b - k_{y1}a)V_z^2}{I_y V^3} + \right. \\ & \left. + \frac{2(k_{y1}a^2 + k_{y2}b^2)V_z \omega_y}{I_y V^3} \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{p}_\omega = & p_V \left[V - \frac{2(k_{y2}b - k_{y1}a)}{mV} \right] - \\ & - p_\psi + p_\omega \left[\frac{2(k_{y1}a^2 + k_{y2}b^2)}{I_y V} \right]; \end{aligned}$$

$$\dot{p}_z = 0;$$

$$\dot{p}_\psi = -p_z V_x;$$

$$\dot{p}_x = 0;$$

$$p_t = H_m(X, p, t_f); H_m = H|_{u=0};$$

$$p_\theta = -p_V \left(\frac{2k_{y1}}{m} \right) - p_\omega \left(\frac{2ak_{y1}}{I_y} \right);$$

$$\begin{aligned} p_{V_x} = & p_V \left[\omega_y \left(\frac{V_x}{V} + \frac{2(k_{y2}b - k_{y1}a)V_x}{mV^3} \right) - \right. \\ & - \left(\frac{2(k_{y1} + k_{y2})V_z V_x}{mV^3} \right) \left. \right] + p_\omega \left[\frac{2(k_{y2}b - k_{y1}a)V_x}{I_y V^3} - \right. \\ & \left. - \frac{2(k_{y1}a^2 + k_{y2}b^2)\omega_y V_x}{I_y V^3} \right] - p_z \psi + p_\psi k_r - p_x. \end{aligned}$$

Управления формируются согласно уравнениям

$$u_\theta = -k_\theta^2 p_\theta; u_V = -k_V^2 p_V; u_t = -k_t^2 p_t,$$

где u_θ , u_V , u_t — составляющие вектора управления \mathbf{u} ; k_θ , k_V , k_t — заданные коэффициенты.

Результаты расчетов

В качестве автомобиля был выбран УАЗ-3159. Коэффициенты увода колес рассчитываются в соответствии с графиком [18]. В таблице приведены данные для моделирования движения.

Примем, что с помощью БПЛА ведется разведка местности (квадрат 10×10 км); по результатам наблюдений происходит формирование 3D-модели местности; для наземного аппарата ставится цель достигнуть заданной точки в данной местности исходя из возможности проходимости аппарата и минимизации энергетических затрат.

Обозначение, принимаемое в расчетах, ед. изм.	Значение параметра	Описание
m , кг	2000	Масса автомобиля
a , м	0,92	Расстояние от центра масс до передней оси
b , м	1,84	Расстояние от центра масс до задней оси
$k_{y1} = k_{y2}$	3500	Коэффициент сопротивления уводу шин

Вначале решалась задача управления при переводе автомобиля из начального положения $x, z = (0, 0)$ в заданное положение $(x, z) = (10000, 10000)$ при наличии штрафной зоны с центром в точке с координатами $(x, z) = (2000; 3000)$ и радиусом штрафной зоны 1000 м. При значениях $\beta_1 = \beta_2 = 10$, $\rho_1 = \rho_2 = 0,504$; $k_\theta = 0,00025$; $k_V = 0,0016$; $k_t = 0,002$ удалось добиться решения поставленной задачи. При этом за счет управления u_t конечное время моделирования t_f увеличилось с 16 с до 183 с.

Для отработки предлагаемого алгоритма управления требуется решение задачи на более коротком участке траектории. Поскольку в случае достижения точки $(x, z) = (10000, 10000)$ алгоритм активно работает только в зоне функции штрафа, в дальнейшем беспилотный автомобиль движется по прямой при небольшом изменении управления. При построении оптимальной траектории в зависимости от поступающей текущей информации о местоположении автомобиля и появлении препятствий целесообразно формировать управление на относительно небольших прогнозируемых интервалах времени. Если расстояние до штрафной зоны больше ее линейного размера примерно в 2 раза, то данную зону можно не учитывать, так как она не оказывает влияния на полученное управление.

Рассмотрим применение алгоритма последовательной оптимизации при переводе автомобиля из начального положения $(x, z) = (0, 5)$ в заданное положение $(x, z) = (250, 0)$ при наличии штрафной зоны с центром в точке с координатами $(x, z) = (175, 3)$, радиусом штрафной зоны $R_z = 0,2$ м, $R_x = 20$ м (кривая 3, рис. 1) и при ее отсутствии (рис. 1).

При значениях $\rho_1 = 7$; $\rho_2 = 0,02$; $k_\theta = 0,008$; $k_V = 0,003$; $k_t = 0,1$ удалось добиться решения

поставленной задачи при отсутствии штрафной зоны (кривая 1, рис. 1). При этом скорость V_x и время моделирования t_f не изменились и остались равны своим начальным значениям $V_x(0) = 16,7$ м/с и $t_f(0) = 15$ с соответственно.

При значениях $\beta_1 = 10$, $\beta_2 = 100$, $\rho_1 = 1,03$; $\rho_2 = 1,05$; $k_\theta = 0,008$; $k_V = 0,003$; $k_t = 0,1$ удалось добиться решения поставленной задачи при наличии штрафной зоны (кривая 2, рис. 1). В данном случае время моделирования t_f составило 14,5 с при увеличении скорости V_x до 17,35 м/с. Изменение управления u_θ наиболее выражено с 5 по 10 с в момент обхода штрафной зоны (рис. 2).

При увеличении коэффициентов управления можно добиться более быстрого изменения управления. Решение вышерассмотренной задачи при изменении штрафной зоны и определении ее с центром в точке с координатами $(x, z) = (155, 3)$ и значениях $\beta_1 = 1000$, $\beta_2 = 100$, $\rho_1 = 1$; $\rho_2 = 1,1$; $k_\theta = 0,02$; $k_V = 0,01$; $k_t = 0,1$ достигается за $t_f = 5$ с с увеличением скорости V_x до 55 м/с. Разгон от начальной скорости движения автомобиля 16,7 м/с происходит за 2 с. Данное решение показывает гибкость применения алгоритма и необходимость учета ограничений, накладываемых на векторы управления и состояния.

Рассмотрим применение алгоритма последовательной оптимизации при переводе автомобиля из начального положения $(x, z) = (0, 5)$ в заданное положение $(x, z) = (250, 0)$ при наличии нескольких штрафных зон. Например, актуальной является задача имитирования переезда беспилотным автомобилем по узкому мосту. Для этого зададим две штрафные зоны (индекс 1 и 2 у соответствующих параметров), первую — с центром в точке с координатами $(x, z) = (50, 3)$, радиусом штрафной зоны $R_{z1} = 0,2$ м, $R_{x1} = 40$ м, вторую — с цен-

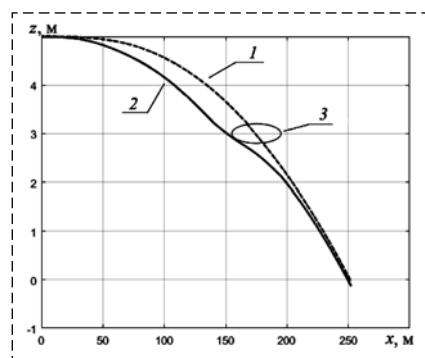


Рис. 1. Результаты моделирования $x(z)$
Fig. 1. Simulation results $x(z)$

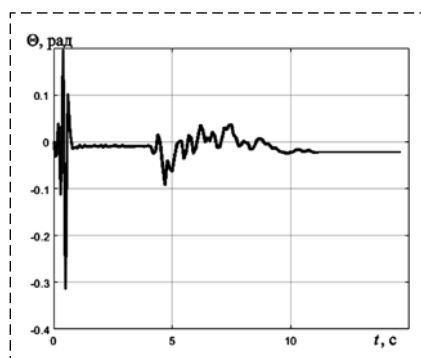


Рис. 2. Результаты моделирования $\Theta(t)$
Fig. 2. Simulation results $\Theta(t)$

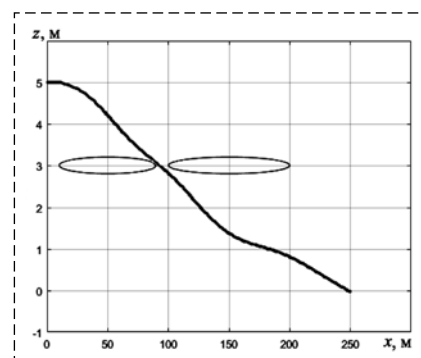


Рис. 3. Результаты моделирования $x(z)$ при наличии нескольких штрафных зон
Fig. 3. Simulation results $x(z)$ in the presence of several penalty zones

тром в точке с координатами $(x,z) = (150,3)$, радиусом штрафной зоны $R_{z2} = 0,2$ м, $R_{x2} = 50$ м. При значениях $\beta_{11} = 10$, $\beta_{21} = 10$, $\beta_{12} = 10$, $\beta_{22} = 10$, $\rho_1 = 1$; $\rho_2 = 1$; $k_0 = 0,008577$; $k_V = 0,003$; $k_t = 0,1$ происходит проезд автомобиля между штрафными зонами (рис. 3).

Данная задача успешно решалась при уменьшении расстояния между двумя штрафными зонами до 2 м без изменения коэффициентов и при различном расположении штрафных зон.

Для ускорения расчетов и выбора коэффициентов алгоритма при объезде нескольких

препятствий предпочтительнее разбивать траекторию на множество участков и решать задачи управления при объезде каждой из штрафной зоны последовательно.

Интерес вызывает объезд движущегося препятствия, в качестве которого можно рассматривать другой автомобиль. Примем, что второй автомобиль движется прямолинейно вдоль оси Ox из начальной точки $(x,z) = (40,3)$ со скоростью 10,3 м/с и имеет размеры $R_z = 0,2$ м, $R_x = 10$ м. При значениях $\beta_1 = 10$, $\beta_2 = 100$, $\rho_1 = 1$; $\rho_2 = 1,03$; $k_0 = 0,008$; $k_V = 0,003$; $k_t = 0,1$ происходит объезд движущегося автомобиля путем маневра с увеличением скорости V_x первого автомобиля (рис. 4, а). При значениях $\beta_1 = 10000$, $\rho_1 = 1,1$ и неизменных остальных коэффициентах происходит объезд запретной зоны путем маневра с уменьшением скорости V_x первого автомобиля (рис. 4, б).

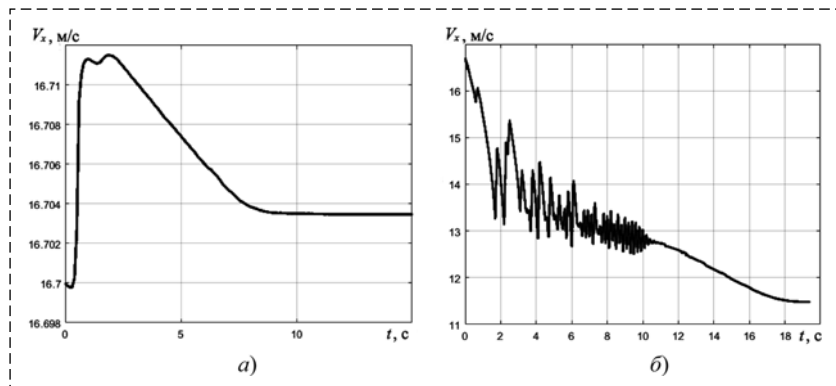


Рис. 4. Результаты моделирования $V_x(t)$
Fig. 4. Simulation results $V_x(t)$

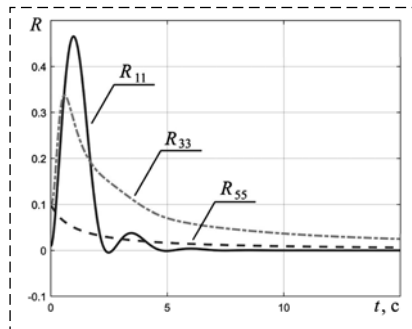


Рис. 5. Графики $R_{ii}(t)$ при $V_x(0) = 16,7$ м/с
Fig. 5. Graphics $R_{ii}(t)$ at $V_x(0) = 16,7$ m/s

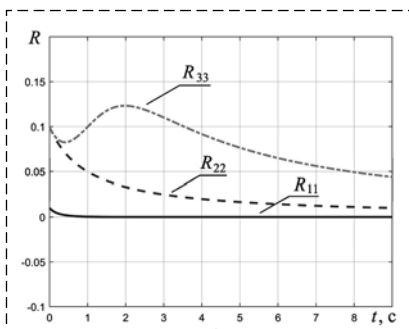


Рис. 6. Графики $R_{ii}(t)$ при $V_x(0) = 3$ м/с
Fig. 6. Graphics $R_{ii}(t)$ at $V_x(0) = 3$ m/s

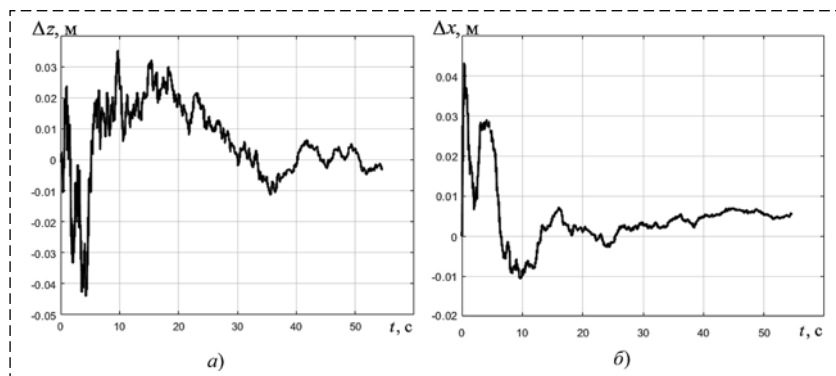


Рис. 7. Графики ошибок оценивания:
а — $\Delta z(t)$; б — $\Delta x(t)$
Fig. 7. Graphs of estimation errors:
а — $\Delta z(t)$; б — $\Delta x(t)$

Рассмотрим работу фильтра Калмана при выполнении маневра по обгону движущегося автомобиля. Примем шумы измерений со следующими интенсивностями: $\mathbf{B}_z = \text{diag}(0, 0,01, 0,1, 0, 0,01)$. На рис. 5 представлены диагональные элементы матрицы ковариации при $R_{11}(0) = 0,01$; $R_{22}(9) = 0,01$; $R_{33}(0) = 0,1$; $R_{44}(0) = 0,01$; $R_{55}(0) = 0,1$. Время прихода данных элементов к установившимся значениям занимает длительное время (около 9 с). В связи с этим шумы измерений не оказывают сильное влияние на динамику исследуемого автомобиля, что позволяет решить поставленную задачу.

При уменьшении начальной скорости движения автомобиля в два раза до $V_x(0) = 8$ м/с удается добиться установившихся значений диагональных элементов матрицы ковариации и успешного решения поставленной задачи.

На рис. 6 представлены зависимости R_{11} ; R_{22} ; R_{33} ; R_{44} ; R_{55} от времени при $V_x(0) = 3$ м/с; $k_0 = 0,0008$; $k_V = 0,007$ и неизменных остальных коэффициентах. Видно, что с течением времени они приходят к установившимся значениям. Также было проведено модели-

рование при разных уровнях шума. Фильтр Калмана обрабатывает их успешно. Шумы измерений не оказывают сильного воздействия на управление.

Удалось добиться успешного решения поставленной задачи управления при переводе автомобиля из начального положения $(x,z) = (0,5)$ в заданное положение $(x,z) = (250,0)$ при наличии штрафной зоны в виде движущегося автомобиля. Конечное время моделирования t_f увеличилось с 15 с до 54,7 с. Скорость движения управляемого автомобиля V не превышает 4,7 м/с. На рис. 7, а, б показаны графики изменения ошибки оценивания Δz и Δx , соответственно.

Примем, что возмущения не превышают $\pm 1\%$ от максимальных значений соответствующих переменных. В расчетах шумы ξ_x принимались белыми с интенсивностями $\mathbf{V}_x = \text{diag}(0, 0, 0.01, 0, 0.01)$. При наличии внешних возмущений ошибки имеют математическое ожидание, равное нулю, и дисперсию, не превышающую дисперсию возмущений.

Заключение

В результате проделанной работы было подтверждено решение задачи оптимального управления беспилотным автомобилем при наличии штрафной функции, шумов измерений и возмущений по неполным данным с использованием принципа разделения и критерия Красовского. Показано, что с помощью фильтра Калмана можно решить поставленную задачу при различных интенсивностях возмущений и шумов измерений. В дальнейшем при необходимости выделения приоритетных ограничений в терминальных условиях (например, выход к дороге, мосту и др.) целесообразно применять оптимизацию по иерархии критериев с использованием алгоритма последовательной оптимизации [15].

Для изменения активности работы измерителей в работе [19] показана возможность отключения датчиков при допустимой точности оценивания. Для рассматриваемой задачи также является актуальным интервальное наблюдение, что позволит продолжить управление при пропадании сигнала со спутника.

Представленные исследования доложены на XXVI международной научной конференции "Системный анализ, управление и навигация" [20].

Список литературы

1. Юзаева А. Г., Кукарцев В. В. Беспилотные автомобили: опасности и перспективы развития // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2016. Т. 2. С. 120–122.
2. Краснопевцева Н. А., Стычев С. Н., Мальцев С. А. Анализ существующих систем безопасности управления беспилотным автомобилем // Проблемы и перспективы реализации междисциплинарных исследований. Сб. статей Всеросс. науч.-практ. конф. 2019. С. 11–12.
3. Chu W., Wuniri Q., Du X., Huang T., Li K. Cloud Control System Architectures, Technologies and Applications on Intelligent and Connected Vehicles: a Review // Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition). 2021. Vol. 34, N. 1. P. 1–23.
4. Павловский В. Е., Огольцов В. Н., Спиридонова И. А., Павловский Е. В. Управление беспилотным автомобилем в проекте "АВТОНИВА" // Робототехника и техническая кибернетика. 2015. № 4 (9). С. 41–46.
5. Зубов И. Г. Обработка и анализ видеоданных в системе управления беспилотного автомобиля // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2021. № 4. С. 96–99.
6. Спиридон А. А., Волосников А. С. Обработка сигналов датчиков в системе управления беспилотным автомобилем // Наука ЮУрГУ: Секции технических наук. Матер. 73-й науч. конф. 2021. С. 465–472.
7. Chuan Z. B., Ming L. G., Wang P. S., Li Y., Peng L. H. Research on Key Technology of Auto-driving Based on Machine Vision // ACM International Conference Proceeding Series. 2021. P. 429–433.
8. Кобылинский А. Ю. Опасности и перспективы развития беспилотного автомобильного транспорта // Наука, техника и образование. 2022. № 3 (86). С. 40–44.
9. Gopinath K., Narayanamurthy G. Meta-analysis of autonomous vehicles adoption — Moderating role of automation level, ownership and culture // International Journal of Information Management. 2022. Vol. 66. P. 1–13.
10. Динамика системы дорога-шина-автомобиль-водитель / Под ред. А. А. Хачатурова. М.: Машиностроение, 535 с.
11. Крашенинников Б. А. Активное оптимальное демпфирование колебаний кузова автомобиля // Изв. ВУЗов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 5. С. 36–41.
12. Кабанов Д. С., Крашенинников Б. А. Управление траекторией автомобиля с использованием алгоритма последовательной оптимизации // Изв. ВУЗов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 10. С. 21–24.
13. Orisnt System. Геодзический приемник ОС-213. URL: <https://orsyst.ru/receivers/os-213> (дата обращения: 25.08.2022).
14. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.
15. Кабанов С. А. Управление системами на прогнозирующих моделях. СПб: Изд-во СПбГУ, 1997. 200 с.
16. Кабанов С. А. Оптимизация динамики систем при действии возмущений. М.: Физматлит, 2008. 200 с.
17. Кабанов Д. С. Оптимальное управление ядерным реактором с учетом случайных возмущений // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 5. С. 27–30.
18. Литвинов А. С. Управляемость и устойчивость автомобиля. М.: Машиностроение, 1971. 417 с.
19. Кабанов С. А., Кабанов Д. С., Никулин Е. Н., Митин Ф. В. Оптимальное управление разведением спицы трансформируемого рефлектора при наличии возмущений // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 4. С. 649–659.
20. Кабанов С. А., Митин Ф. В., Скворцова А. Э. Оптимальное управление беспилотным автомобилем при действии возмущений и наличии препятствий // Системный анализ, управление и навигация: Тезисы докладов. М.: Изд-во МАИ, 2022. С. 121–123.

Optimization of the Course Movement of an Unmanned Vehicle in the Presence of Obstacles and Disturbances

S. A. Kabanov, kaba-sa@mail.ru, D. S. Kabanov, kabanovds@mail, F. V. Mitin, fedor28@list.ru, BSTU "VOENMEH" named after D. F. Ustinov, Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation

Corresponding author: **Kabanov Sergey**, Ph.D., Dr. Sci., Professor, Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D. F. Ustinov, Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation, e-mail: kaba-sa@mail.ru

Accepted on November 09, 2022

Abstract

The article discusses the optimization of the control process of an unmanned vehicle. Currently, there is an active development and use of unmanned vehicles. There is a practice of using unmanned shuttles in closed areas (conferences, forums, etc.). The use of cars with automated control in urban conditions and on rough terrain is being tested. In this regard, it is important to develop control algorithms that allow solving problems of car control in real time under the influence of disturbances and the presence of obstacles. With the development of technology and an increase in computing power, it becomes possible to use optimal control algorithms that allow you to achieve better results when the terminal conditions are met, minimizing energy costs. This paper shows the solution of the problem of optimal control of an unmanned vehicle in the presence of a penalty function, measurement noise and disturbances from incomplete data using the separation principle. The problem of optimal control in a deterministic and stochastic setting is solved using an algorithm with a predictive model with a generalized work functional. The effectiveness of applying the Kalman filter is shown depending on the different intensity of measurement noise and different vehicle speeds. The results of numerical modeling are presented, showing the possibility of using the proposed algorithm to control an unmanned vehicle under various initial and final conditions. The developed algorithm has been successfully applied to bypass a moving object.

Keywords: mathematical model, unmanned vehicle, control, optimization

Acknowledgements: The work was carried out in BSTU "VOENMEH" with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (government contract agreement № 075-03-2020-045/2 of 09.06.2020).

For citation:

Kabanov S. A., Kabanov D. S., Mitin F. V. Optimization of the Course Movement of an Unmanned Vehicle in the Presence of Obstacles and Disturbances, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 2, pp. 93–100.

DOI: 10.17587/mau.24.93-100

References

1. Yzaeva A. G., Kukarcev V. V. Unmanned vehicles: danger and prospects, *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики*, 2016, vol. 2, pp. 120–122 (in Russian).
2. Krasnopevceva N. A., Stychev S. N., Malcev S. A. Analysis of existing security systems for driving an unmanned vehicle, *Problemy i perspektivy realizatsii mezhdisciplinarnykh issledovaniy. Sbornik statej Vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii*, 2019, pp. 11–12 (in Russian).
3. Chu W., Wuniri Q., Du X., Huang T., Li K. Cloud Control System Architectures, Technologies and Applications on Intelligent and Connected Vehicles: a Review, *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, 2021, vol. 34, no. 1, pp. 1–23.
4. Pavlovskij V. E., Ogo'cov V. N., Spiridonova I. A. Driving an unmanned vehicle in the AVTONIVA project, *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika*, 2015, vol. 9, no. 4, pp. 41–46 (in Russian).
5. Zubov I. G. Processing and analysis of video data in the control system of an unmanned vehicle, *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika teledeniya*, 2021, no. 4, pp. 96–99 (in Russian).
6. Spiridon A. A., Volosnikov A. S. Processing of sensor signals in the control system of an unmanned vehicle, *Nauka YUUrGU: Sekcii tekhnicheskikh nauk. materialy 73-j nauchnoj konferentsii. Ministerstvo nauki i vysshego obrazovaniya Rossiyskoj Federatsii YUzhno-Ural'skij gosudarstvennyj universitet*, 2021, pp. 465–472 (in Russian).
7. Chuan Z. B., Ming L. G., Wang P. S., Li Y., Peng L. H. Research on Key Technology of Auto-driving Based on Machine Vision, *ACM International Conference Proceeding Series*, 2021, pp. 429–433.
8. Kobylinskij A. Y. Dangers and prospects for the development of unmanned vehicle transport, *Nauka, tekhnika i obrazovanie*, 2022, vol. 86, no. 3, pp. 40–44 (in Russian).
9. Gopinath K., Narayanamurthy G. Meta-analysis of autonomous vehicles adoption — Moderating role of automation level, ownership and culture, *International Journal of Information Management*, 2022, vol. 66, pp. 1–13.
10. Hachaturov A. A. ed. Dynamics of the road-tire-car-driver system, Moscow, Mashinostroenie, 535 p. (in Russian).
11. Krashenninnikov B. A. Active optimum vibration damping of the vehicle body, *Izv. VUZov. Priborostroenie*, 2008, vol. 51, no. 5, pp. 36–41 (in Russian).
12. Kabanov D. S., Krashenninnikov B. A. Vehicle trajectory control using a sequential optimization algorithm, *Izv. VUZov. Priborostroenie*, 2008, vol. 51, no. 10, pp. 21–24 (in Russian).
13. Orient System. Geodezicheskij priyomnik OC-213, available at: <https://orsyst.ru/receivers/oc-213> (date of the application: 25.08.2022).
14. Krasovskiy A. A. Handbook on the theory of automatic control, Moscow, Nauka, 1987, 712 p. (in Russian).
15. Kabanov S. A. Controlling systems based on predictive models, St. Petersburg, St. Petersburg State University Publishing House, 1997, 200 p. (in Russian).
16. Kabanov S. A. Optimization of the dynamics of systems under the influence of perturbations, Moscow, FIZMATLIT, 2008, 200 p. (in Russian).
17. Kabanov D. S. Optimal control of a nuclear reactor subject to random disturbances, *Izv. VUZov. Priborostroenie*, 2009, vol. 52, no. 5, pp. 27–30 (in Russian).
18. Litvinov A. S. Vehicle handling and stability, Moscow, Mashinostroenie, 1971, 417 p. (in Russian).
19. Kabanov S. A., Kabanov D. S., Nikulin E. N., Mitin F. V. Optimal control of deployment of the spoke of a transformable reflector in the presence of disturbance, *Siberian Aerospace Journal*, 2021, vol. 22, no. 4, pp. 649–659 (in Russian).
20. Kabanov S. A., Mitin F. V., Skvortsova A. E. Optimal control of an autonomous car under the influence of disturbances and obstacles, *Sistemnyj analiz, upravlenie i navigatsiya: Tezisy dokladov*, Moscow, Publishing house of MAI, 2022, pp. 121–123 (in Russian).