

try into the atmosphere, *Kosmicheskie Issledovaniya*, 2002, vol. 40, no. 5, pp. 503–514 (in Russian).

8. **Lyubimov V. V.** Dynamics and Control of Angular Acceleration of a Re-Entry Spacecraft with a Small Asymmetry in the Atmosphere in the Presence of the Secondary Resonance Effect, *International Siberian Conference on Control and Communications*, 2015, pp. 1–4.

9. **Lyubimov V. V.** Asymptotic analysis of the secondary resonance effects in the rotation of a spacecraft with a small asymmetry in the atmosphere, *Russian Aeronautics*, 2014, vol. 57, no. 3, pp. 245–252.

10. **Bobilev A. V., Yaroshevsky V. A.** *Ocenka uslovij zahvata v rezhim rezonansnogo vrashheniya neupravlyаемого tela pri spuske v atmosferu* (Evaluation of conditions in the capture resonance uncontrolled body rotation mode during the descent into the atmosphere), *Kosmicheskie Issledovaniya*, 1999, vol. 37, no. 5, pp. 515–523 (in Russian).

11. **Lyubimov V. V.** Estimating the probability of capture into resonance when driving dynamically rigid body in the atmosphere, *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauki*, 2007, no. 2 (15), pp. 110–115 (in Russian).

12. **Zabolotnov Yu. M.** *Metod issledovaniya rezonansnogo dvizheniya odnoj nelinejnoj kolebatel'noj sistemy* (The method of investigation of resonant motion of a nonlinear oscillation system), *Izvestiya RAS. Mechanics of rigid body*, 1999, vol. 1, pp. 33–45 (in Russian).

13. **Zabolotnov Yu. M.** Asymptotic analysis of quasi-linear equations of the motion in the atmosphere of a spacecraft of a small asymmetry I, *Kosmicheskie Issledovaniya*, 1993, vol. 31, no. 6, pp. 39–50 (in Russian).

14. **Yaroshevsky V. A.** *Dvizhenie neupravlyаемого tela v atmosfere* (Uncontrolled body motion in the atmosphere), Moscow, Mashinostroyeniye, 1978, 168 p. (in Russian).

15. **Neishtadt A. I.** Averaging, passage through resonances, and capture into resonance in two-frequency systems, *Uspekhi Mat. Nauk*, 2014, vol. 69, no. 5 (419), pp. 3–80 (in Russian).

16. **Mars Polar Lander**, available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Mars_Polar_Lander.

17. **Zabolotnov Yu. M., Lyubimov V. V.** *Vtorichnyj rezonansnyj jeffekt pri dvizhenii KA v atmosfere* (The secondary resonance effect at spacecraft motion in the atmosphere), *Kosmicheskie Issledovaniya*, 1998, vol. 36, no. 2, pp. 206–214 (in Russian).

УДК 621.396: 681.5.015.44

DOI:10.17587/mau.18.571-576

А. Н. Грачев, канд. техн. наук, доц., ga150161@mail.ru,

Тульский государственный университет,

С. А. Курбатский, нач. отделения qrbs@rambler.ru,

Ю. И. Лебеденко, канд. техн. наук, вед. инженер, lebedenko@tsu.tula.ru,

АО ЦКБА, г. Тула

Алгоритм оценки параметров морской качки в задачах повышения точности позиционирования луча корабельной радиолокационной станции

Рассматривается проблема предсказания углового положения судна при морской качке, что необходимо для электронной стабилизации положения луча его радиолокационной станции. Используются независимые динамические модели второго порядка для всех видов качки: бортовой, килевой и рыскания. Показано, что применение дискретного экстраполятора калмановского типа позволяет построить цифровую систему стабилизации луча локатора, погрешность которой при определенных условиях может быть меньше погрешности гироскопических датчиков соответствующих углов.

Ключевые слова: корабельная радиолокационная станция, электронная стабилизация луча, дискретная модель нерегулярной качки в пространстве состояний, идентификация параметров модели, калмановская фильтрация

Введение

За исключением относительно редких случаев полного штиля, морское судно практически всегда подвергается воздействию волн и поэтому находится в состоянии так называемой нерегулярной качки [1–3]. Вместе с судном качается и антенна его радиолокационной станции (РЛС), предназначенной для решения задач обзора окружающего пространства, а также для сопровождения воздушных и надводных целей. При управлении такой РЛС, работающей в условиях качки, возникают существенные проблемы, связанные с невозможностью в определенный момент времени точного направления луча в заданную точку пространства. Для РЛС с механическим управлением положением луча наиболее распространенным способом решения этой проблемы является размещение антенны на специальной стабилизированной платформе.

При этом очевидно, что использование таких стабилизированных платформ является достаточно затратным решением, дополнительно приводящим к существенному увеличению массы и габаритных размеров РЛС [1].

В то же время известно [4], что в современных обзорных РЛС с цифровой системой управления и с электронной стабилизацией луча, основанной на применении фазированных антенных решеток (ФАР), не представляет особого труда практически мгновенно установить текущие углы отклонения луча от нормали к плоскости ФАР, обеспечивающие его точное заданное положение в стабилизированной системе координат. Таким образом, появляется принципиальная возможность отказаться от использования стабилизированных платформ при условии разработки специальных алгоритмов, способных упреждать (предсказывать) основные характеристики качки судна для того, чтобы в заданный мо-

мент времени направлять луч РЛС в любую требуемую точку пространства уже с учетом компенсации влияния морской качки.

Постановка задачи

Современные обзорные РЛС с ФАР, как правило, осуществляют регулярные посылки пачек зондирующих импульсов с определенной длительностью и заданным обзорным периодом [4]. Во время излучения самой пачки корректировать ее направление, естественно, невозможно. Однако, поскольку длительность таких посылок относительно периода колебаний корабля при качке невелика, то это не приведет к значительным отклонениям луча от заданной точки пространства, если будет возможность с помощью алгоритма упреждения с достаточной точностью предсказать параметры качки на момент середины будущей посылки и, соответственно, скорректировать ее направление.

Кроме того, значительно реже, чем обзорные посылки пачек импульсов, необходимо осуществлять некоторые дополнительные посылки в определенные точки пространства, например, для сопровождения целей. Длительность таких посылок также может оказаться больше, чем у обзорных. Поэтому, разрабатывая алгоритм компенсации морской качки, необходимо учесть, чтобы с его помощью можно было предсказывать параметры качки судна как на относительно малый (обзорный) интервал времени, так и на некоторое произвольное время, в несколько раз превышающее обзорный интервал.

Разработка такого алгоритма, естественно, подразумевает использование соответствующих математических моделей морского волнения и нерегулярной качки корабля. В работах [2, 3, 5–7] описано использование для решения различных задач нескольких типов таких моделей: линейных и нелинейных, в сосредоточенных и распределенных параметрах. Там же показано, что нерегулярная морская качка состоит из трех одновременно действующих на судно, однако взаимно практически не связанных типов качки: бортовой, килевой и рыскания. В простейшем случае для достаточно точного предсказания с использованием методов калмановской фильтрации всех соответствующих углов наклона палубы, а именно крена, дифферента и рыскания, вполне достаточно использования линейных моделей в сосредоточенных параметрах в виде обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка [2, 6, 7]. Поскольку для разных типов углов такие дифференциальные уравнения будут различаться только своими параметрами, в дальнейшем будем рассматривать модель бортовой качки, учитывая тот факт, что остальные типы качки (килевая и рыскание) будут иметь аналогичные модели, а задачи их компенсации будут решаться с использованием тех же методов.

Непрерывная математическая модель процесса качки

Исходя из сказанного выше, бортовую качку судна на нерегулярном волнении предлагается описывать следующим стохастическим дифференциальным уравнением [2, 6]:

$$\ddot{\theta}(t) + 2\mu\dot{\theta}(t) + b^2\theta(t) = 2b\sqrt{A\mu}\omega(t), \quad (1)$$

где $\theta(t)$ — угол бортового крена корабля в момент времени t ; μ — коэффициент, определяющий степень нерегулярности волнения; A — дисперсия ординат волнового профиля, характеризующая интенсивность волнения; b — коэффициент, вычисляемый по формуле: $b = \sqrt{\mu^2 + \lambda^2}$, где λ — преобладающая частота системы волн; $\omega(t)$ — скалярный белый шум с интенсивностью (дисперсией) $Q = 1$.

Как известно [2], решением дифференциального уравнения вида (1) будет случайный процесс колебательного типа с корреляционной функцией, хорошо аппроксимируемой следующим равенством:

$$K_{\theta}(\tau) = Ae^{-\mu|\tau|} \left(\cos\lambda\tau + \frac{\mu}{\lambda} \sin\lambda|\tau| \right). \quad (2)$$

Например, задавшись следующими данными: $A = 0,008 \text{ рад}^2$; $\lambda = 0,7 \text{ с}^{-1}$; $\mu = 0,1$ и воспользовавшись формулами (1), (2), можно получить при нулевых начальных условиях соответствующий процесс изменения угла бортового крена корабля и его корреляционную функцию, показанные на рис. 1 и 2.

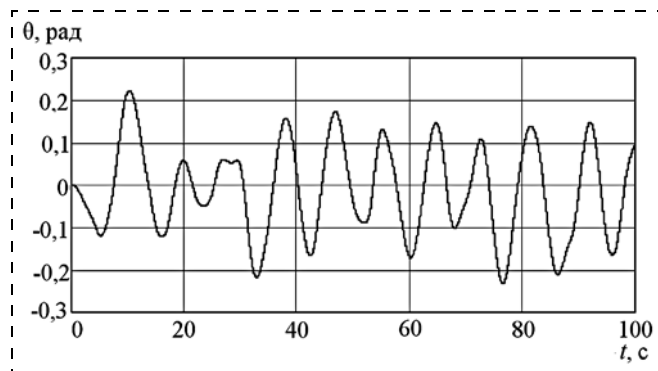


Рис. 1. Процесс изменения угла бортовой качки корабля

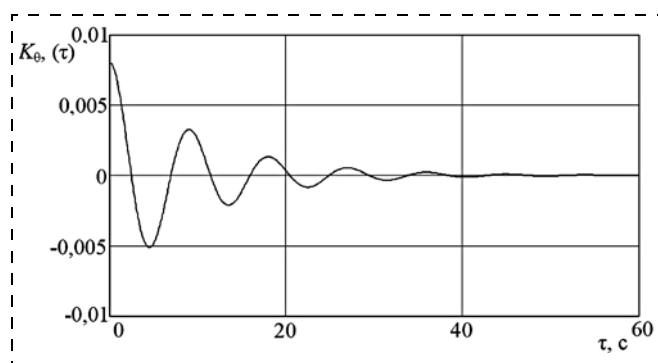


Рис. 2. Корреляционная функция процесса изменения угла бортовой качки корабля

Таким образом, в данном примере угол крена корабля при бортовой качке в отдельные моменты времени достигает 0,25 рад, или примерно 12°. При этом отметим, что интенсивность волнения ($A = 0,008 \text{ рад}^2$) соответствует умеренному уровню (примерно 2 балла по десятибалльной шкале ГУ ГМС СССР от 1953 г.) со средней высотой волны примерно в 0,5 м [1, 2]. Частота колебаний при качке, вызванной нерегулярным волнением, как показано в книге [2], всегда бывает близкой к собственной частоте колебаний корабля в соответствующей плоскости.

Очевидно, данная модель может быть использована для упреждения характеристик качки в реальном времени. Это, например, можно сделать с использованием линейного непрерывного фильтра (экстраполятора) Калмана, для чего дифференциальное уравнение вида (1) преобразуется в модель, представленную в пространстве состояний [2]:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \mathbf{F}x(t) + \mathbf{G}\omega(t); \quad (3)$$

$$z(t) = \mathbf{H}x(t) + \mathbf{v}(t), \quad (4)$$

где $\mathbf{x}^T(t) = [\omega(t) \dot{\theta}(t)]$ — вектор состояния в модели

качки; $\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -b^2 & -2\mu \end{bmatrix}$ — матрица состояний; $\mathbf{G} =$

$= \begin{bmatrix} 0 \\ 2b\sqrt{A\mu} \end{bmatrix}$ — матрица преобразования входного

воздействия; $\mathbf{z}(t)$ — вектор текущих измерений угла крена и, возможно (если имеется соответствующий датчик), угловой скорости крена; $\mathbf{H}$ — матрица измерений; $\mathbf{v}(t)$ — вектор шумов в измерениях, зависящий от погрешностей используемых гироскопических измерительных приборов.

Отметим, что $\mathbf{z}(t)$ и $\mathbf{v}(t)$ могут быть скалярами, если измеряется только один угол крена $\theta(t)$, тогда матрица измерений будет иметь вид: $\mathbf{H} = [1 \ 0]$. Если же с помощью соответствующих гироскопических приборов может быть измерен весь текущий вектор состояний, т.е. сам угол крена $\theta(t)$ и его первая производная $\dot{\theta}(t)$, то $\mathbf{z}(t)$ и $\mathbf{v}(t)$ становятся векторами, состоящими из двух элементов каждый, а матрица измерений превращается в единичную:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Дискретная математическая модель процесса качки

В современных условиях применения цифровых систем управления, в том числе в рассматриваемом классе РЛС, при реализации данного метода компенсации морской качки представляется целесообразным от непрерывной модели вида (3),

(4) перейти к дискретной модели в виде следующей системы разностных уравнений:

$$\mathbf{x}(k+1) = \Phi(T_0)\mathbf{x}(k) + \Gamma(T_0)\omega(k); \quad (5)$$

$$\mathbf{z}(k+1) = \mathbf{H}\mathbf{x}(k+1) + \mathbf{v}(k+1), \quad (6)$$

где $\mathbf{x}^T(k) = [\theta(k) \dot{\theta}(k)]$ — вектор состояния в модели качки в дискретный момент времени k ; $\Phi =$

$= \begin{bmatrix} 1 & T_0 \\ -b^2 T_0 & 1 - 2 T_0 \mu \end{bmatrix}$ — матрица состояний; $\Gamma =$

$= \begin{bmatrix} 0 \\ 2 T_0 b \sqrt{A \mu} \end{bmatrix}$ — матрица преобразования входного

воздействия; $\mathbf{z}(k)$ — вектор измерений; $\mathbf{H}$ — матрица измерений; $\mathbf{v}(k)$ — вектор шумов в измерениях, зависящий от погрешностей используемых гироскопических измерительных приборов; T_0 — период дискретизации.

Что касается модели измерений (6), то для нее справедливо все, что было сказано ранее о непрерывной модели (4), в том числе и о виде матрицы измерений $\mathbf{H}$.

Дискретный фильтр Калмана для упреждения параметров качки

Далее, воспользовавшись моделью (5), (6), можно синтезировать линейный дискретный фильтр (экстраполятор) Калмана, одним из достоинств которого, наряду со сглаживанием текущих измерений, является упреждение вектора состояния на любое наперед заданное время, для чего необходимо это время подставить в матрицы Φ и Γ вместо времени дискретизации T_0 . Заметим, что одновременно с таким упреждением вектора состояния может быть рассчитана и априорная дисперсия данного упреждения.

Синтез линейного дискретного фильтра Калмана в этом случае особых проблем не представляет, если известны три основных параметра описанной выше модели качки: A , λ и μ . Ниже приведем выражения такого линейного дискретного фильтра Калмана [8]:

1) ковариационная матрица упреждения на время дискретизации T_0

$$\mathbf{P}(k+1/k) = \Phi(T_0)\mathbf{P}(k/k)\Phi^T(T_0) + \Gamma(T_0)\mathbf{Q}\Gamma^T(T_0);$$

2) коэффициент усиления в фильтре Калмана

$$\mathbf{K}(k+1) = \mathbf{P}(k+1/k)\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{P}(k+1/k)\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1};$$

3) ковариационная матрица сглаженных оценок

$$\mathbf{P}(k+1/k+1) = (\mathbf{I} - \mathbf{K}(k+1)\mathbf{H})\mathbf{P}(k+1/k);$$

4) упреждение на время дискретизации T_0

$$\mathbf{x}(k+1/k) = \Phi(T_0)\mathbf{x}(k/k);$$

5) сглаженная оценка

$$\begin{aligned} & \mathbf{x}(k+1/k+1) = \\ & = \mathbf{x}(k+1/k) + \mathbf{K}(k+1)\{\mathbf{z}(k+1) - \mathbf{H}\mathbf{x}(k+1/k)\}. \end{aligned}$$

Здесь $\mathbf{I}$ — единичная матрица размером 2×2 ; Q — скаляр, равный 1; $\mathbf{R}$ — ковариационная матрица ошибок измерений (определяется погрешностями измерений угла крена и его угловой скорости, если она измеряется). В качестве начальных условий для запуска фильтра $\mathbf{x}(0/0)$ можно использовать измерения, полученные непосредственно перед его запуском. В качестве начального для алгоритма значения ковариационной матрицы необходимо

взять: $\mathbf{P} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & bA \end{bmatrix}$.

Заметим, что если нужно упреждать состояние на время, отличное от T_0 (например, на время T_1), то это не представляет особой сложности, поскольку для этого можно использовать то же уравнение п. 4 из фильтра, в котором матрица $\Phi(T_1)$ вычисляется как функция уже не от T_0 , а от T_1 . Аналогично с помощью уравнения п. 1 из фильтра, заменив в нем T_0 на T_1 , можно оценить ковариационную матрицу такого упреждения, т.е. его априорную точность.

Параметрическая идентификация модели качки

Рассмотрим теперь задачу параметрической идентификации модели морской качки или определения параметров A , λ и μ , знание которых необходимо для применения фильтра Калмана.

Так, параметр A может быть оценен двумя способами. Во-первых, приближенно — по высоте так называемой волны 3 %-й обеспеченности с использованием выражения (см. [2], с. 30)

$$A = 0,143 \left(\frac{h_{3\%}}{2} \right)^2,$$

где $h_{3\%}$ — высота волны 3 %-й обеспеченности по десятибалльной шкале ГУ ГМС СССР от 1953 г. [1, 2].

Во-вторых, параметр A может быть вычислен экспериментально по предварительно измеренной с использованием гироскопического датчика выборке процесса $\theta(t)$ (примерно такой, какая показана на рис. 1), поскольку интенсивность волнения на море по сравнению с задачами, решаемыми с использованием РЛС, можно считать практически постоянной. Как известно, в этом случае достаточно легко можно рассчитать экспериментальную корреляционную функцию, такую, как показано на рис. 2. Параметр A есть не что иное, как дисперсия процесса $\theta(t)$ или значение корреляционной функции при нулевом аргументе.

Аналогично параметр λ также может быть оценен двумя способами. С одной стороны, как уже было сказано ранее, частота колебаний при качке, вызванной нерегулярным волнением, бывает близкой к собственной частоте колебаний корабля в со-

ответствующей плоскости. Поэтому если имеется априорная информация о частотах собственных колебаний корабля, то ею, естественно, можно воспользоваться. С другой стороны, преобладающую частоту колебаний при качке можно вычислить по той же самой экспериментально полученной корреляционной функции (рис. 2) путем определения преобладающего периода ее колебаний.

Наконец, параметр μ приближенно может быть вычислен по формуле (см. [2], с. 30):

$$\mu = 0,21\lambda.$$

Пример моделирования и предсказания параметров качки

Рассмотрим пример упреждения процесса бортовой качки с характеристиками, соответствующими истинным параметрам, введенным ранее: $A = 0,008 \text{ рад}^2$; $\lambda = 0,7 \text{ с}^{-1}$; $\mu = 0,1$ (рис. 1, 2). Погрешности измерений угла бортовой качки и его первой производной, т.е. среднеквадратичное отклонение (СКО) измерений, в данном исследовании будем полагать равными $1,5'$ и $12'/\text{с}$ соответственно, что не противоречит литературным источникам по гироскопическим приборам [9]. Так, погрешность выдерживания вертикали в таких приборах составляет единицы угловых минут, а датчики угловых скоростей способны измерять скорости порядка $10^{-4} \dots 10^{-5} \text{ рад/с}$ (т.е. менее $1'/\text{с}$). Основной период дискретизации РЛС примем равным $T_0 = 0,01 \text{ с}$.

При проведении исследований в процессе имитационного моделирования по "измеренному" процессу $\theta(t)$ вычислялась корреляционная функция (рис. 1, 2), по которой, в свою очередь, описанным выше способом были вычислены оценки параметров: $A_{\text{оц}} = 0,013 \text{ рад}^2$; $\lambda_{\text{оц}} = 0,726 \text{ с}^{-1}$; $\mu_{\text{оц}} = 0,152$. Заметим, что они не совсем совпадают с истинными значениями соответствующих параметров. С использованием этих оценок были синтезированы два линейных дискретных фильтра (экстраполятора) Калмана: в одном измерялся только угол крена, в другом измерялись как угол крена, так и его первая производная (угловая скорость крена).

В результате применения первого фильтра (с измерением только угла крена) были получены графики ошибок упреждения угла на время дискретизации $T_0 = 0,01 \text{ с}$ и на время $T_1 = 0,1 \text{ с}$, показанные на рис. 3 и 4 соответственно. При этом ошибку вычисляли как разность между реальным значением угла крена имитационной модели и предсказанным с помощью фильтра значением (по результатам зашумленных измерений).

В результате применения второго фильтра с измерением угла крена и его первой производной также были получены графики ошибок упреждения угла на время дискретизации $T_0 = 0,01 \text{ с}$ и на время $T_1 = 0,1 \text{ с}$, показанные на рис. 5 и 6.

По представленным на рисунках графикам были вычислены СКО ошибок упреждения, которые составили для первого фильтра: $\sigma_{0,01} = 3,033 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$,

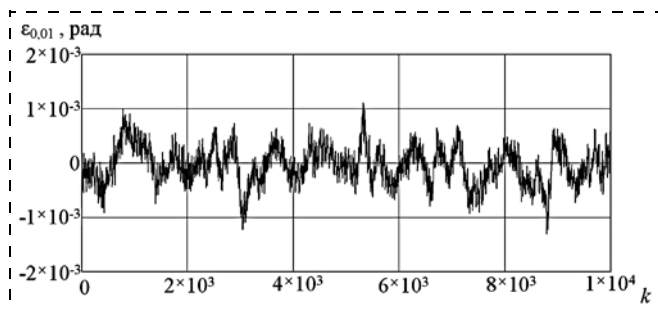


Рис. 3. Ошибка упреждения на 0,01 с при измерении только угла крена

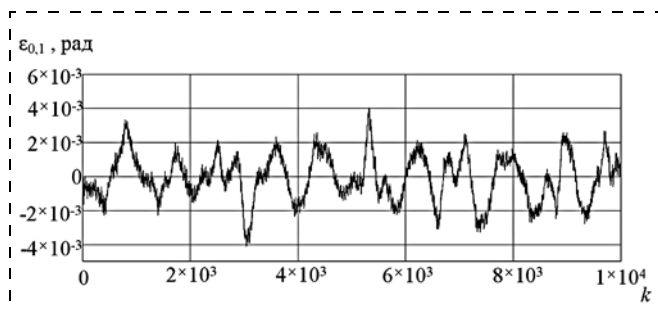


Рис. 4. Ошибка упреждения на 0,1 с при измерении только угла крена

$\sigma_{0,1} = 1,425 \cdot 10^{-3}$ рад; для второго фильтра: $\sigma_{0,01} = 2,62 \cdot 10^{-4}$ рад, $\sigma_{0,1} = 9,138 \cdot 10^{-4}$ рад при соответствующих временах упреждения. Из этих результатов следует, что второй фильтр упреждает процесс качки несколько лучше, чем первый, что вполне логично при наличии дополнительных измерений первой производной угла крена.

В целом дискретный фильтр Калмана, рассмотренный в данной статье, обеспечивает упреждение угла крена на время 0,01 с точностью, даже превосходящей точность текущих измерений этого угла гироскопическим прибором, которая в вычислительных экспериментах составляла $4,363 \cdot 10^{-4}$ рад (т.е. 1,5').

Заключение

В настоящее время возможности цифровых систем управления позволяют реализовывать различные достаточно сложные алгоритмы предсказания параметров качки судна. Однако в задачах электронной стабилизации луча корабельной РЛС, когда модель качки представляет собой линейный псевдослучайный процесс, вполне достаточным является применение для предсказания углового положения судна классического метода линейной калмановской фильтрации (экстраполяции). Как известно [7], для линейных динамических систем фильтр Калмана является оптимальным и обеспечивает минимальное СКО оценки параметров качки.

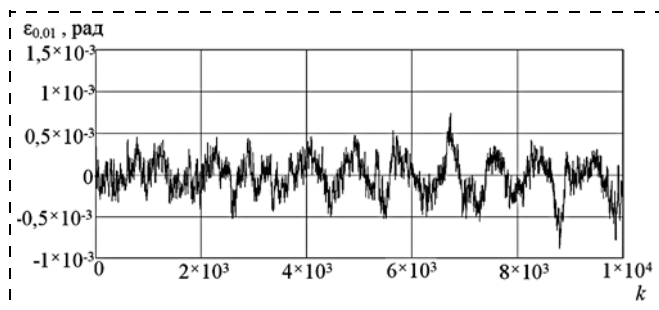


Рис. 5. Ошибка упреждения на 0,01 с при измерении угла крена и угловой скорости крена

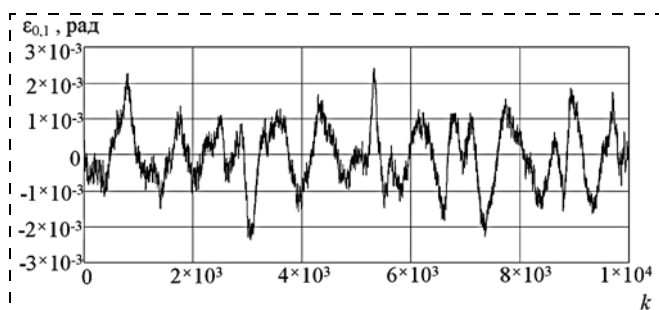


Рис. 6. Ошибка упреждения на 0,1 с при измерении угла крена и угловой скорости крена

В работе также показано, что при рассмотренных малых периодах упреждения он позволяет вычислять упрежденный угол крена с СКО не более ошибки датчика-измерителя.

Список литературы

1. Судовые радиолокационные станции и их применение (справочное руководство). Т. 3 / В. Я. Аверьянов, А. М. Байрашевский, К. В. Георгианов и др. Л.: Судостроение, 1970. 264 с.
2. Ривкин С. С. Стабилизация измерительных устройств на качающемся основании. М.: Наука, 1978. 320 с.
3. Чижиков С. Д. Основы динамики судов на волнении: учеб. пособ. Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО "КнАГТУ", 2010. 110 с.
4. Активные фазированные антенные решетки / Под ред. Д. И. Воскресенского и А. И. Канащенкова. М.: Радиотехника, 2004. 488 с.
5. Нечаев Ю. И., Бухановский А. В., Иванов С. А. Виртуальное моделирование динамики судна на морском волнении в интеллектуальных тренажерах // Искусственный интеллект. 2004. № 4. С. 350—359.
6. Чепок А. О. Аналитическое определение сил инерции, действующих на груз при качке корабля // Вестник АГТУ. Сер. Морская техника и технология. 2014. № 1. С. 43—47.
7. Mar J., Chen-Chih Liu, and Basnet M. B. Ship-Borne Phased Array Radar Using GA Based Adaptive α - β - γ Filter for Beam-forming Compensation and Air Target Tracking // International Journal of Antennas and Propagation. 2015. Article ID 563726. 16 p.
8. Браммер К., Зиффлинг Г. Фильтр Калмана-Бьюси. М.: Наука, 1982. 200 с.
9. Бороздин В. Н. Гироскопические приборы и устройства систем управления: учеб. пособ. для вузов. М.: Машиностроение, 1990. 272 с.

Algorithm for Estimating the Parameters of Sea Pitching for Increasing the Accuracy of a Ship-Borne Radar Beam Positioning

A. N. Grachev, ga150161@mail.ru,

Tula State University, Tula, 300012, Russian Federation,

S. A. Kurbatsky, qrbs@rambler.ru, Yu. I. Lebedenko, lebedenko@tsu.tula.ru,
Central Design Bureau of Apparatus Engineering, Tula, 300034, Russian Federation

Corresponding author: Grachev Aleksandr N., Associate Professor,
Tula State University, Tula, 300012, Russian Federation, e-mail: ga150161@mail.ru

Received on September 12, 2016

Accepted on December 16, 2017

The sea waves cause the effect of a rotational motion (i.e., pitch, roll and heading angle) of ships. The ship rotational motions result in beam pointing error of the phased array radar aboard the ship. The antenna stabilization aimed to achieve a beam pointing accuracy over a long dwell time is an important problem for the shipborne phased array radars. Due to the dynamic and stochastic nature of the sea environment, the shipborne phased array radar must be able to compensate for the ship's motion adaptively. In this paper, the linear discrete Kalman filter is proposed as a predictor for the shipborne phased array radar, which can compensate for the beam pointing error and track the air and sea surface targets. The pitch, roll and heading angles and the its velocities data are measured on-line from a gyroscope of the sea vehicle and used from the ship motion mathematical models for their prediction. It is proved, that the pitch, roll, and heading motion models may be considered as independent. All these models are presented as the same second order linear differential equations with different parameters. Besides, equivalent linear discrete state space models for the angles' changes are constructed in the paper. The estimation accuracy of the Kalman filter (predictor) depends on the values of different parameters, such as the parameters of the ship's motion mathematical model, measurement error covariance matrices, etc. The sea environments are very dynamic, hence, there is a need for an adaptive system for the controlling and compensating devices, operating regardless of the ship's motion. Continuous monitoring of the environment and adapting filter ensure parameters with less computational burden needed for a real time application. The paper describes a technique for identification of such parameters by the measured correlation functions of the pitch, roll, and heading angles. Finally, it is proved by the computer simulations that the proposed compensations technique is a real time applicable algorithm for a shipborne phased array radar. The computer simulation was performed with the following parameters: the measurement frequency for the gyroscopes was 100 Hz, the prediction times of the Kalman filter were 0.01 s and 0.1 s. The following two cases were considered. In the first case, only the predicted angles were measured with gyroscopes. In the second case, the angles and the rates of their change were measured. The simulations demonstrated that the presented prediction algorithm ensured higher accuracy (less root mean square errors of the predicted angles) than the initial accuracy of the gyroscopes measurements.

Keywords: shipborne phased array radar, ship rotational motion, pitch, roll, and heading angle, beam pointing error compensation, parameters identification technique, linear discrete Kalman filter

For citation:

Grachev A. N., Kurbatsky S. A., Lebedenko Yu. I. Algorithm for Estimating the Parameters of Sea Pitching for Increasing the Accuracy of a Ship-Borne Radar Beam Positioning, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 8, pp. 571—576.

DOI: 10.17587/mau.18.571-576

References

1. Aver'janov V. Ja., Bajrashevskij A. M., Georgianov K. V. i dr. *Sudovye radiolokacionnye stancii i ih primeneniye (spravochnoe rukovodstvo)* (Shipboard radars and their application (Reference Guide)), vol. 3, Leningrad, Sudostroenie, 1970, 264 p. (in Russian).
2. Rivkin S. S. *Stabilizatsiya izmeritel'nykh ustroystv na kachajushchimsya osnovanii* (Stabilization of measuring devices based on the rocker base), Moscow, Nauka, 1978, 320 p. (in Russian).
3. Chizhiumov S. D. *Osnovy dinamiki sudov na volnenii* (Fundamentals of dynamics of ships in waves), Komsomol'sk-na-Amure, Published by GOUVPO "KnAGTU", 2010, 110 p. (in Russian).

4. Voskresenskogo D. I., Kanashhenkova A. I. ed. *Aktivnye fazirovannye antennnye reshetki* (The active phased array antennas), Moscow, Radiotekhnika, 2004, 488 p. (in Russian).
5. Nechaev Ju. I., Buhanovskij A. V., Ivanov S. A. *Virtual'noe modelirovanie dinamiki sudna na morskoy volnenii v intellektual'nykh trenazherakh* (Virtual modeling of dynamics vessel on the sea wave in intelligence trainer), *Iskusstvennyy Intellekt*, 2004, no. 4, pp. 350—359 (in Russian).
6. Chepok A. O. *Analiticheskoe opredelenie sil inercii, deystvuyushih na gruz pri kachke korablja* (Analytical determination of the inertia forces acting on the cargo ship at the roll), *Vestnik AGTU, Ser. Morskaya Tekhnika i Tehnologiya*, 2014, no. 1, pp. 43—47 (in Russian).
7. Mar J., Chen-Chih Liu, and Basnet M. B. Ship-Borne Phased Array Radar Using GA Based Adaptive α - β - γ Filter for Beamforming Compensation and Air Target Tracking, *International Journal of Antennas and Propagation*, 2015, Article ID 563726, 16 p.
8. Brammer K., Ziffeling G. *Fil'tr Kalmana-Bjusi* (Kalman-Busy Filter), Moscow, Nauka, 1982, 200 p. (in Russian).
9. Borozdin V. N. *Giroskopicheskie pribory i ustrojstva sistem upravleniya* (Gyroscopic devices and control systems), Moscow, Mashinostroenie, 1990, 272 p. (in Russian).

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 З. В. Наумова.

Сдано в набор 31.05.2017. Подписано в печать 14.07.2017. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН817 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 "Авансд солюнз". Отпечатано в ООО "Авансд солюнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.