

УДК 623.46.001:621.532

В.В. КУЛАЛАЕВ*Национальный аэрокосмический университет им Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

ВЛИЯНИЕ ОРГАНИЗОВАННЫХ ПОМЕХОВЫХ СИГНАЛОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОИСКОВЫХ И СЛЕДЯЩИХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ФИЛЬТРОМ КАЛМАНА

Рассмотрено влияние искусственных (специально организованных) помеховых сигналов на выходные параметры фильтра Калмана в системах автоматического управления на примере систем самонаведения, которые определяют местоположение объекта в пространстве предметов. Получен вектор помеховых оценок к трехмерному дискретному фильтру. Результаты работы могут быть полезны при разработке систем обеспечения безопасности полетов летательных аппаратов.

фильтр Калмана, оптическая помеха, система наведения, устройство противодействия

В статье Б. Ховарда (PC Magazine/RE №11/2003) «20 технологий будущего» отмечено, что в XXI веке одним из приоритетных научных направлений будет создание средств инфракрасного противодействия. Работы данного направления ведутся с середины 60-х годов прошлого столетия, когда интенсивно начали развиваться технологии создания зенитных управляемых ракет (ЗУР) с оптическими головками самонаведения (ОГС). С тех пор создано большое количество устройств противодействия (УП) [1], но до сих пор проблема не решена и является одной из актуальнейших научных задач современности [1, 2]. Работы данного научного направления проводились до 1991 года по решениям Правительства СССР, после, в Украине, по собственной инициативе автора.

Целью данной статьи является разработка алгоритма расчета влияния искусственных (специально организованных) оптических помех на эффективность ОГС ЗУР, работающих в инфракрасном диапазоне, на примере фильтрации помехового сигнала в электронном блоке фильтром Калмана.

Последние десятилетия метод калмановской фильтрации (иногда называемый последовательной динамической фильтрацией) успешно используется в системах автоматического самонаведения [3–5, 9]. Основной эффект применения фильтра Калмана

заключается в том, что ОГС измеряет угловую скорость линии визирования, которая сильно зашумлена флюктуациями естественного фонового происхождения, поэтому в первичном виде ее невозможно использовать для управления ЗУР [4]. Фильтр Калмана в дискретном времени фильтрует естественные помеховые шумы и приводит к максимизации показателя отношения полезного сигнала к шуму:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_0 \rightarrow \left(\frac{S}{N}\right)_{0\max}, \quad (1)$$

где S – полезный сигнал; N – сигнал шума.

Одним из методов противодействия ОГС ЗУР можно рассматривать следующую модель

$$\left(\frac{S}{N}\right)_0 \rightarrow \left(\frac{S}{N}\right)_0 (1 + K_{II} F_{II}(*, \tau)), \quad (2)$$

где $\left(\frac{S}{N}\right)_0$ – паспортное значение отношений полезного сигнала к шумовому для заданной эффективности ОГС ЗУР; $K_{II} = J_{IIЭ} / J_{ОЭ}$ – коэффициент излучения помехового сигнала устройством противодействия (УП) в рабочем диапазоне длин волн ОГС, $J_{IIЭ}, J_{ОЭ}$ – сила излучения помехового источника и цели; $K_{II} \in]0; N]$, N – действительное число больше единицы; $F_{II}(*, \tau)$ – закон

модуляції генерируемой помехи УП; $*$ = x, y, z – пространственные координаты; τ – время.

Таким образом, через оптический входной зрачок ОГС, наряду со стационарным сигналом от объекта самонаведения $J_{OЭ}$, попадает генерируемый организованный помеховый оптический сигнал УП $J_{ПЭ}$.

Рассмотрим прохождение помехового сигнала в ЭБ ОГС на примере фильтра Калмана. Применение фильтра Калмана в дискретном времени управления ОГС, находящейся под воздействием шумов, широко описано в работах [3–5, 9], поэтому нет необходимости приводить вычислительную процедуру для фильтра Калмана. Остановимся на решении вопроса точности самонаведения ОГС ЗУР при воздействии организованных оптических помех УП.

Для построения обобщенной системы самонаведения, в общем случае содержащей процедуру фильтра Калмана, используем модель динамической системы, описывающей самонаведение в одной плоскости [4]:

$$\begin{aligned} \frac{dn^{\Pi}}{d\tau} &= \frac{n^{\Pi}}{\tau} + \frac{1}{V}(W_{Ц}^{\Pi} - W_P); \\ \frac{d\varphi}{d\tau} &= \frac{n^{\Pi}}{\tau} - \omega_a; \\ \frac{dW_{Ц}^{\Pi}}{d\tau} &= \xi_{Ц}. \end{aligned} \quad (3)$$

Система (3) замыкается уравнениями стабилизации и управления:

$$\begin{aligned} W_P &= \gamma_{CT}(p)W_{Ц}; \quad \gamma_{CT}(p) = (1 + a_1p + a_2p^2)^{-1}; \\ a_1 &= \tau_{CT}; \quad a_2 = \tau_{CT}^2; \\ Z^{\Pi} &= \varphi^{\Pi} + \xi; \quad \omega_a^{\Pi} = Z^{\Pi}d; \quad W_{П} = mV\hat{\omega}^{\Pi}; \\ \hat{\omega}^{\Pi} &= \frac{\hat{n}^{\Pi}}{\tau}; \quad \tau_{\partial\hat{\omega}} = \tau_0 - \tau. \end{aligned} \quad (4)$$

В уравнениях (3) и (4) обозначены:

n – приведенный линейный промах ЗУР;

$W_{Ц}, W_P$ – ускорение цели (объекта) и ракеты;

φ – угол рассогласования цели в пространстве предметов;

ω_a – угловая скорость линии визирования;

V – скорость сближения объекта и ЗУР;

Z^{Π} – измерения; ξ – гауссов шум измерений;

d – добротность ОГС;

$\gamma_{CT}(p)$ – оператор замкнутой системы стабилизации ЗУР;

$\hat{\varphi}^{\Pi}, \hat{n}^{\Pi}, \hat{\omega}^{\Pi}$ – оценки фильтром Калмана угла рассогласования цели, относительного промаха, угловой скорости линии визирования под воздействием помехового сигнала УП соответственно, Π – индекс, обозначающий помеховые составляющие управляющих сигналов электронного блока ОГС.

При воздействии помеховых сигналов УП через входной зрачок ОГС в ее рабочем диапазоне длин волн и при пропускании фильтром помеховых частот $\Delta f_{П}$, определяемых законом $F_{П}(*, \tau)$, оценки фильтра Калмана принимают вид:

$$\begin{aligned} \hat{\varphi}^{\Pi} &= \hat{\varphi} + \Delta\hat{\varphi}^{\Pi}; \\ \hat{n}^{\Pi} &= \hat{n} + \Delta\hat{n}^{\Pi}; \\ \hat{\omega}^{\Pi} &= \hat{\omega} + \Delta\hat{\omega}^{\Pi}. \end{aligned} \quad (5)$$

Задача сводится к определению для динамической системы (3) в соответствии с общей процедурой расчета фильтра Калмана [4] вектора помеховых оценок трехмерного дискретного фильтра в виде

$$\begin{aligned} \hat{X}^{\Pi} &= \hat{X} + \Delta\hat{X}^{\Pi}; \\ \Delta\hat{X}_k^{\Pi} &= \left[\Delta\hat{\varphi}^{\Pi}; \Delta\hat{n}^{\Pi}; \Delta\hat{\omega}^{\Pi} \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Введем критерий срыва процесса самонаведения ОГС:

$$K_{срв} = \frac{\varphi^{\Pi}}{\varphi} = \frac{\varphi + \Delta\varphi^{\Pi}}{\varphi} = 1 + \frac{\Delta\varphi^{\Pi}}{\varphi}. \quad (7)$$

Из анализа работы электронной системы управления гироскопами ОГС [10] можно найти помеховую составляющую угла рассогласования цели при воздействии помеховых сигналов УП в виде

$$\Delta\varphi^{\Pi} = \varphi(K_{срв} - 1) = \varphi \frac{\tau_{\Gamma}}{\Delta\tau_{П}} K_{П}, \quad (8)$$

где $\tau_{\Gamma} = \frac{1}{K_{\nu} \Delta f_{\text{ОГС}}}$ – постоянная времени электронного блока управления системой гироскопов ОГС, K_{ν} – коэффициент пропорциональности; $\Delta f_{\text{ОГС}}$ – частотная характеристика электронного фильтра ОГС; $\Delta \tau_{\Pi}$ – промежуток времени воздействия помехового сигнала на ОГС.

Критерий срыва в общем виде с учетом (7) определяется формулой

$$K_{\text{срв}}(\tau) = 1 + \frac{\tau_{\Gamma}}{\Delta \tau_{\Pi}} K_{\Pi} F_{\Pi}(*, \tau). \quad (9)$$

Используем уравнение самонаведения в виде [10]

$$\varphi(\tau) = |\omega| \tau_{\Gamma} \left(1 - \exp \left\{ -\frac{\tau}{\tau_{\Gamma}} \right\} \right). \quad (10)$$

С учетом зависимостей (8), (9) и (10) можно записать

$$\begin{aligned} \overline{\Delta \varphi}^{\Pi}(\tau) &= \frac{\Delta \varphi^{\Pi}(\tau)}{\omega_0 \tau_{\Gamma}} = \\ &= \frac{\tau_{\Gamma}}{\Delta \tau_{\Pi}} K_{\Pi} \left(1 - \exp \left\{ -\frac{\tau}{\tau_{\Gamma}} \right\} \right) = \\ &= (K_{\text{срв}} - 1) \left(1 - \exp \left\{ -\frac{\tau}{\tau_{\Gamma}} \right\} \right), \end{aligned} \quad (11)$$

где $|\omega_0|$ – паспортное значение угловой скорости цели при захвате ее в сопровождении ОГС ЗУР, которая является заданной величиной.

Промах ЗУР с ОГС при воздействии помехового сигнала УП определим по аналогии с подходом, изложенным в работе [4]:

$$\begin{aligned} \Delta h(\tau) &= \\ &= V_p \left(\frac{\Delta \tau_{\text{срв}}}{\Delta \tau_{\Pi}} \right) \tau_{\Gamma}^2 \omega_0 K_{\Pi} \left(1 - \exp \left\{ -\frac{\tau}{\tau_{\Gamma}} \right\} \right), \end{aligned} \quad (12)$$

где $V_p = \text{const}$ – средняя скорость ракеты в промежутке времени воздействия помехового сигнала на ОГС $\Delta \tau_{\Pi}$.

На основании анализа теоретических результатов исследования рассматриваемой задачи предлагается промежуток времени, определяющий срыв рабочих

процессов ОГС, после которого задача ЗУР с ОГС не может быть выполнена, определять по формуле

$$\Delta \tau_{\text{срв}} = \frac{\Delta \tau_{\Pi}}{\beta_{\text{нр}} K_{\Pi}} \ln K_{\text{срв}}. \quad (13)$$

Тогда зависимость (12) с учетом (13) приводится к виду

$$\begin{aligned} \overline{\Delta n}^{\Pi}(\tau) &= \frac{\Delta h(\tau)}{V_p \tau_{\Gamma}^2 \omega_0} = \\ &= \beta_{\text{нр}} \left(1 - \exp \left\{ -\frac{\tau}{\tau_{\Gamma}} \right\} \right) \ln K_{\text{срв}}. \end{aligned} \quad (14)$$

Погрешность определения угловой скорости визирования цели получим после дифференцирования зависимости (11):

$$\overline{\Delta \dot{\omega}}(\tau) = \frac{\Delta \dot{\omega}(\tau)}{\omega_0 / \tau_{\Gamma}} = (K_{\text{срв}} - 1) \exp \left\{ -\frac{\tau}{\tau_{\Gamma}} \right\}. \quad (15)$$

Отметим, что $K_{\text{срв}}$ определен для всех помеховых составляющих системы самонаведения при условии

$$F_{\Pi}(*, \tau) = 1, 0.$$

Таким образом, фильтр Калмана в динамической системе самонаведения с определенной вероятностью [3] пропускает помеховые сигналы УП в виде трехмерного вектора помеховых оценок

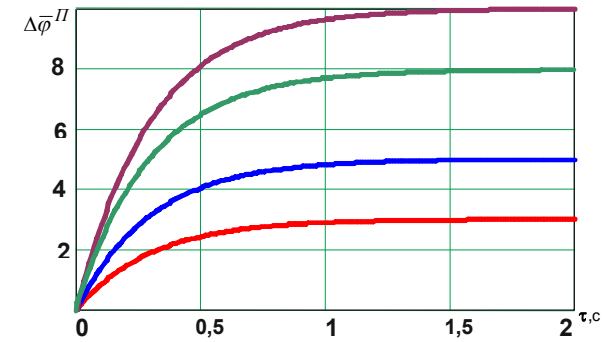
$$\Delta \hat{X}_k^{\Pi} = \left| \Delta \hat{\varphi}^{\Pi}; \Delta \hat{n}^{\Pi}; \Delta \hat{\dot{\omega}}^{\Pi} \right|. \quad (16)$$

В общем случае трехмерный вектор помеховых оценок может быть записан в виде функциональной зависимости

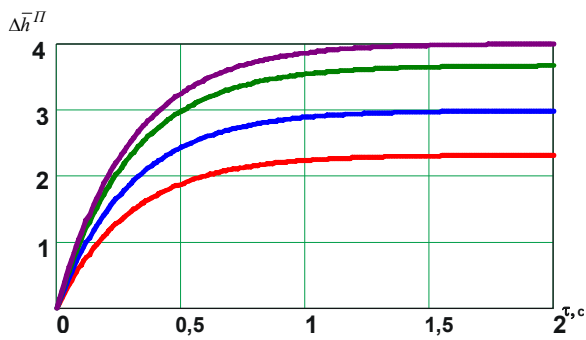
$$\left| \Delta \hat{X}_k^{\Pi} \right| = f(W(\overline{\Delta \tau}_{\Pi}); K_{\Pi}; \tau), \quad (17)$$

где $W(\overline{\Delta \tau}_{\Pi})$ – функция Ламберта (Lambert W.) [6–8], которая определяет значение $\overline{\Delta \tau}_{\Pi} = \Delta \tau / \tau_{\Gamma}$.

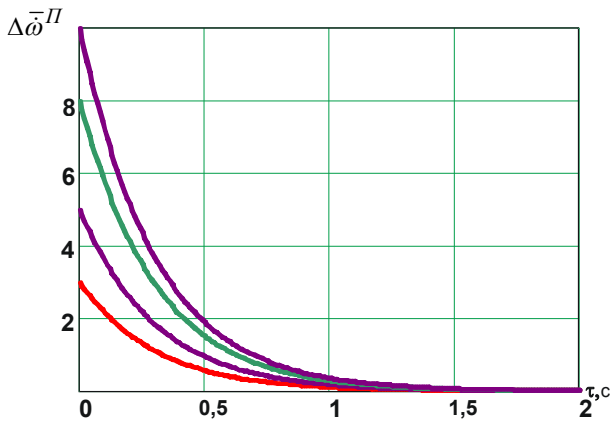
Изменение помеховых параметров управления ОГС представлено на рис. 1.



а



б



в

Рис. 1. Изменение помеховых параметров вектора оценок трехмерного дискретного фильтра Калмана в действительном масштабе времени τ : а – погрешности определения угла рассогласования $(\Delta\varphi^{II})$; б – приведенного промаха системы (Δh^{II}) ; в – погрешности определения угловой скорости вращения линии «система – объект» $(\Delta\omega^{II})$

На графиках линии сверху вниз соответствуют расчетам при $K_{II} = 10, 8, 5, 3$.

На основании теоретических исследований влияния организованных оптических помех УП ОГС ЗУР предлагается формула для определения времени воздействия помехового сигнала

$$\overline{\Delta\tau}_n e^{\overline{\Delta\tau}_n} = K_{II}\beta(\tau), \quad (18)$$

где

$$\beta(\tau) = \frac{\omega_0\tau\Gamma}{\xi_0} \left(1 - \exp\left\{-\frac{\tau}{\tau\Gamma}\right\} \right),$$

ξ_0 – паспортная точность определения угла рассогласования цели, заложенная в тактико-технические характеристики ОГС ЗУР.

В аналитическом виде величину $\overline{\Delta\tau}_{II}$ из выражения (18) можно определить только по процедуре вычисления функции Ламберта [8], которая определяет границы, изменяя $\overline{\Delta\tau}_{II}$ в масштабе реального времени $\tau \in [0; \infty]$.

Обобщая полученные результаты данного теоретического исследования, можно сделать следующие **выводы:**

1) трехмерный вектор помеховых оценок фильтра Калмана является нестационарным, изменяющимся в представлении дискретного времени бортовых цифровых вычислительных машин (БЭВМ) ЗУР с ОГС;

2) фильтр Калмана в электронной системе управления ОГС ЗУР для динамического процесса самонаведения в соответствии с общей вычислительной процедурой [5] в дискретном времени сводится к трехмерному дискретному фильтру с вектором помеховых оценок (16), которые приводят к ошибкам процесса самонаведения и возможному срыву выполнения задания ЗУР;

3) приведенный алгоритм расчета трехмерного дискретного фильтра помеховых оценок (16) позволяет рассчитать численные значения ошибок процесса самонаведения, такие, как линейный промах

ЗУР (Δh^{Π}); погрешность определения угла рассогласования цели ($\Delta \varphi^{\Pi}$); погрешность определения угловой скорости линии визирования цели ($\Delta \dot{\omega}$) в реальном масштабе времени (зависимости (11), (14) и (15));

4) приведенные аналитические зависимости позволяют провести оценку параметров эффективности искусственных организованных помеховых сигналов УП и получить их численные значения ($\Delta \tau_{\Pi}$) при воздействии на ОГС ЗУР и определить аналитический вид функции $F_{\Pi}(*, \tau)$;

5) дополнительные динамические помеховые оценки трехмерного дискретного фильтра Калмана зависят от закона модуляции оптической помехи $F_{\Pi}(*, \tau)$;

6) организованные помеховые сигналы УП приводят к ошибкам процесса самонаведения ОГС в виде (17) и зависят от интенсивности излучения помехового сигнала K_{Π} .

Результаты работы могут найти применение при разработке оптико-электронных систем управления различного назначения, в том числе УП ОГС ЗУР для защиты летательных аппаратов.

Литература

1. Щербак Н. Противодействие зенитным управляемым ракетам с инфракрасным наведением (современные бортовые средства) // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. – 2000. – № 5. – С. 52 – 55.
2. Кулалаев В.В., Кулалаев А.В., Науменко П.О. Состояние и перспективы разработок систем защиты самолетов гражданской авиации от террористических пусков ракет с тепловыми головками самонаведения // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – Х.: НАКУ “ХАІ”. – 2003. – № 40/5. – С. 13 – 18.

3. Латхи Б.П. Системы передачи информации. – М.: Связь, 1971. – 319 с.

4. Проектирование зенитных управляемых ракет / Под ред. И.С. Голубева и В.Г. Светлова. – М.: Изд-во МАИ, 1999. – 727 с.

5. Воскобойников Ю.Е., Преображенский Н.Г., Седельников А.И. Математическая обработка эксперимента в молекулярной газодинамике. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1984. – 237 с.

6. Valluri S.R., Jeffrey D.I., Corless R.M. Some applications of the Lambert W function to physics // Canadian J. Physics. – 2000. – Vol. 78. – P. 823 – 831.

7. Eric W. Weisstein. The CRC Concise Encyclopedia of Mathematics // Boca Raton: CRC Press LLC. – 1998. – P. 1969.

8. WWW. Special functions W:Lambert's W Function.

9. Острем К.Ю. Введение в стохастическую теорию управления / Пер. с англ. С.А. Анисимова. – М.: Мир, 1973. – 320 с.

10. Лазарев Л.П. Инфракрасные и световые приборы самонаведения и наведения летательных аппаратов. – 3-е изд., перераб. доп. – М.: Машиностроение, 1976. – 568 с.

Поступила в редакцию 05.03.04

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.И. Карпенко, Харьковский военный университет, г. Харьков