

УДК 623.46.001:533.6.011

В.В. КУЛАЛАЕВ, А.В. КУЛАЛАЕВ

Интернациональная Техническая Экономическая компания «ИнтерТЭК», Украина

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ПОЛЕЙ ИСКУССТВЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОМЕХ НА ПАРАМЕТРЫ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ САМОНАВЕДЕНИЯ

Предложена методика и получены зависимости, позволяющие проводить теоретические исследования влияния специально организованного поля искусственных тепловых помех на основные параметры оптических систем самонаведения.

искусственная тепловая помеха, оптическая система самонаведения, динамика управления, траектория движения

Введение

Общие положения, формулирование проблемы.

Проблема обеспечения безопасности полетов самолетов гражданской авиации, в том числе авиалайнеров первых лиц государств, в последнее время становится одной из актуальнейших, в связи с возможностью использования террористами ракетных комплексов – носителей оптических систем самонаведения (ОСН) [1 – 10]. Решением данной проблемы заняты ученые многих стран мира на протяжении более чем 40 лет, однако проблема далека от решения [1, 7, 10]. Такое положение дел в данном научном направлении, по видимому, связано с тем, что отсутствует системный подход в решении проблемы, в части влияния искусственных (специально организованных) полей тепловых помех (ИТП) на динамические параметры ОСН. Системный подход к решению данной проблемы: анализ – критика – синтез, начало которому предложено в работах [11 – 15], позволит решить одновременно две научно-технические прикладные задачи проблемы:

- определить надежность и эффективность ОСН в поле ИТП для решения задачи пространственной встречи двух динамических объектов (обнаружение, сближение, стыковка и т.д.) в интересах народного хозяйства [9];
- описать переходные динамические процессы в поле ИТП для создания надежных систем защиты

теплоизлучающих объектов от поражающего оружия – носителей ОСН [2 – 7].

Цель работы. Целью данной работы является разработка методики и алгоритмов определения влияния полей искусственных тепловых помех (ИТП) на параметры, определяющие точность наведения ОСН.

Работа выполнена при поддержке Интернациональной технической экономической компании «ИнтерТЭК» (Украина) и участии ЗАО «АВИКОС» (Россия), в порядке частной инициативы и поддержку международной программы защиты населения (обеспечения жизнедеятельности человека) Initiatives for Proliferation Prevention (IPP) Program of the US Dept. of Energy.

Решение проблемы

Допустим, что ОСН произвела захват динамического объекта -цели, движущегося с постоянной скоростью $|\overline{V_U}| = const$ в момент времени $t_0 = 0$. До момента времени t_1 координатор ОСН сопровождает цель. ОСН передвигается носителем в пространстве с постоянной скоростью $|\overline{V_P}|$.

В момент времени t_1 в координатах, жестко связанных с целью, возникает поле искусственных специально организованных оптических (тепловых)

помех, которые передвигаются относительно центра излучения объекта-цели с известной относительной скоростью $\overline{V_{\Pi O}}$, тогда абсолютная скорость движения искусственных тепловых помех (ИТП) составит

$$\overline{V_{\Pi}} = \overline{V_{\Pi}} + \overline{V_{\Pi O}},$$

если угол между векторами $\overline{V_{\Pi}}$ и $\overline{V_{\Pi O}}$ равен $0 \leq \gamma \leq \pi$, то справедлива зависимость

$$|\overline{V_{\Pi}}| = V_{\Pi} \cdot K(k_V(f_{ИТП})), \quad (1)$$

где приведенный коэффициент относительной линейной скорости ИТП определяется соотношением

$$K(k_V(f_{ИТП})) = \left[\frac{1 + k_V^2(f_{ИТП})}{1 + \sin \gamma / k_V(f_{ИТП})} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

здесь коэффициент скорости $k_V(f_{ИТП})$ находится по формуле

$$k_V(f_{ИТП}) = 2\pi l_0 k_S f_{ИТП} / (N \cdot V_{\Pi}),$$

где l_0 – расстояние от центра излучения объекта-цели, где возникает генерируемое поле ИТП; $k_S < 1,0$ – конструктивный коэффициент совершенства системы генерирования ИТП; $f_{ИТП}$, N – частота следования и число тепловых сигналов создаваемых генератором поля ИТП за время их сопровождения ОСН.

При известной эквивалентной полосе пропускания ($\Delta f_{ЭКВ}$) управляющих сигналов замкнутого контура управления (ЗКУ) ОСН по углу слежения, т.е. определения угловой скорости ИТП и цели в связанной системе координатора ОСН можно утверждать, что координатор ОСН отслеживает ИТП и теряет цель-объект, в случае их дискретной генерации, когда $\Delta \tau_{\Pi} > 0$ с циклической частотой $\omega_{\Pi} = 2\pi \cdot f_{ЭКВ}^{ИТП}$ и возвращается к сопровождению цели-объекта при $\Delta \tau_{\Pi} = 0$. Динамические процессы управления координатором ОСН могут быть описаны математической моделью вида:

$$F_1(t) = \frac{d\psi_{\Pi}(t)}{dt} (2\pi \Delta f_{ЭКВ})^{-1} \leq 1,0;$$

$$F_2(t) = \frac{d}{dt} (\psi_{\Pi}(t) - \psi_{\Pi}(t)) \times \left(2\pi \Delta f_{ЭКВ} - \frac{d\psi_{\Pi}(t)}{dt} \right)^{-1} \leq 1,0, \quad (3)$$

где $\psi_{\Pi}(t)$ – измеряемый во времени слежения угол сопровождения цели-объекта в условиях генерации ИТП; $\psi_{\Pi}(t)$ – угол сопровождения цели при $\Delta \tau_{\Pi} = 0$; Π – индекс, который обозначает информационное влияние поля ИТП на параметры процесса самонаведения.

В случае использования двухточечных методов самонаведения [8] угол $\psi_{\Pi}(t)$ рассматривается как дополнительный курсовой угол цели-объекта. В этом случае угол $\psi_{\Pi}(t)$ может быть определен зависимостью от угла рассогласования цели $\phi(t)$, который отрабатывается координатором ОСН [8, 9].

Таким образом, представленная модель описания переходных динамических процессов ЗКУ в виде (3) может также имитировать маневр цели объекта в координаторе ОСН при воздействии поля ИТП в реальном масштабе времени.

Если принять, что поле ИТП подчиняется известному закону, который описывается критерием, введенным в работах [11 – 15]

$$K_{УВ}(t) = 1 + f(\Delta f_{ЭКВ}; f_{ИТП}; K_{\Pi\lambda}; F_{\Pi}(...t)), \quad (4)$$

где $F_{\Pi}(...t) = (\bar{r}(t)/|\bar{r}(t)|; t)$ – пространственно-временной закон генерации поля ИТП, здесь $\bar{r}(t)$ – вектор, определяющий положение ИТП в пространстве, то дифференциальное уравнение, описывающее динамику координатора ОСН приводится к виду

$$\frac{d\varphi^{\Pi}(t)}{dt} - \frac{\varphi^{\Pi}(t)}{\tau_{\Gamma}} = -\omega_0, \quad (5)$$

где ω_0 – угловая скорость объекта при захвате его координатором ОСН в сопровождение.

Предполагаем, что поле ИТП в пространственном оптическом кинематическом канале обратной связи осуществляет информацию пропорциональную коэффициенту спектральной интенсивности излучения ИТП

$$K_{\Pi\lambda} = \frac{J_{ИТП\lambda}}{J_{ОБ\lambda}} > 0, \quad (6)$$

где $J_{ИТП\lambda}$ и $J_{ОБ\lambda}$ – спектральные интенсивности излучения ИТП и объекта соответственно.

В этом случае определение координат объекта в предметной плоскости ОСН в форме нахождения угла рассогласования цели, в условиях генерирования ИТП, подчиняется зависимости

$$\varphi_{\Pi}(t) = K_{\Psi B}(t) \cdot \varphi(t), \quad (7)$$

где $\varphi(t) = |\omega_0| \tau_{\Gamma} \left(1 - \exp \left\{ -\frac{t}{\tau_{\Gamma}} \right\} \right)$, тогда дифферен-

циальное уравнение (5) принимает вид

$$\frac{d}{dt} (K_{\Psi B}(t) \cdot \varphi(t)) - \frac{K_{\Psi B}(t) \cdot \varphi(t)}{\tau_{\Gamma}} = -\omega_0, \quad (8)$$

здесь τ_{Γ} – постоянная времени замкнутого контура управления ОСН, которая определяет его инерционность и равна

$$\tau_{\Gamma} = \frac{1}{k_C \cdot \Delta f_{\text{ЭКВ}}}, \quad (9)$$

где $k_C < 1$ – коэффициент пропорциональности.

Решение линейного дифференциального уравнения первого порядка динамики координатора ОСН (8) имеет вид

$$\varphi_{\Pi}(t) = -(\beta(t))^{-1} \cdot \omega_0 \cdot \int_{t_1}^t \beta(t) \cdot f(t) dt, \quad (10)$$

где

$$\beta(t) = \int_{t_1}^t \exp \left\{ \frac{1}{\tau_{\Gamma}} - \frac{dK_{\Psi B}(t)}{dt} f(t) \right\} dt, \quad f(t) = (K_{\Psi B}(t))^{-1}, \quad (11)$$

здесь величина критерия $K_{\Psi B}(t)$ определена зависимостью (4).

Угловая скорость пространственного смещения поля ИТП описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{d\psi_{\Pi}(t)}{dt} = \frac{\varphi_{\Pi}(t)}{\tau_{\Gamma}} - \frac{d\varphi_{\Pi}(t)}{dt}. \quad (12)$$

Соотношение (12), с учетом зависимостей (1) и (3), можно преобразовать

$$\frac{d\psi_{\Pi}(t)}{dt} = \frac{|\overline{V_{\Pi}}(t)|}{R_{TO}(t)} = \frac{V_{\Pi}}{V_P} \frac{K(k_V(f_{ИТП}))}{N \cdot \Delta \tau_{\Pi}}, \quad (13)$$

где $R_{TO}(t)$ – радиус мертвой (неуправляемой) зоны, вызванный инерционностью ЗКУ; $\Delta \tau_{\Pi}$ и N – время импульса генерации ИТП и число импульсов за время $t = t_B - t_1$; здесь t_B – время встречи в точке пространства (В) траектории поля ИТП и линии визирования ОСН.

После преобразований, с учетом зависимостей (3) и (13), получаем формулу оценки влияния поля ИТП на параметры ОСН

$$F(\Delta f_{\text{ЭКВ}}) = \frac{f_{\text{ЭКВ}}^{\text{ИТП}}}{\Delta f_{\text{ЭКВ}}} \cdot B_0 \leq 1, 0, \quad (14)$$

где $B_0 = \frac{V_{\Pi}}{V_P} \frac{K(k_V(f_{ИТП}))}{N}$ – кинематический коэффициент, характеризующий траекторию движения генерированного поля ИТП в связанной системе координат; $f_{\text{ЭКВ}}^{\text{ИТП}}$ – эквивалентная частота генерирования тепловых помех системой ИТП.

Анализ полученных результатов и их применение

Полученные зависимости (3), (13), (14) позволяют проводить теоретические исследования влияния специально организованного поля ИТП на основные параметры ОСН на стадии их проектирования, в том числе и на точность наведения и сопровождения динамических излучающих объектов.

Оценка динамического промаха. Очевидно, что при выполнении условия (14) при заданных исходных параметрах, система ОСН будет отслеживать и сопровождать ложный специально генерируемый сигнал ИТП. В этом случае система ОСН приводит координатор в мнимую (не существующую) точку пространства. Система наведения в этом случае осуществляет запланированный пространственный динамический промах $H_g(t)$, который может быть определен путем расчета нормальных линейных перемещений объекта носителя ОСН движущейся со скоростью $\overline{V_P}$, полученных за счет команд замкнутого контура управления ОСН $\Delta h(t)$.

Оценку динамического промаха $H_g(t)$ проведем из решения следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned} H_g(t) &= 0,5 \cdot \Delta t_{ИТП}^2 \cdot \frac{d^2 \Delta h(t)}{dt^2}; \\ \Delta V_{PI}(t) &= \frac{d \Delta h(t)}{dt} = V_P \cdot \cos(\beta_{PI}(t)) \cdot \Delta \beta_{PI}; \\ \Delta \beta_{PI} &= \beta_0 - \beta_{PI}(t); \\ \Delta t_{ИТП} &= t_B - t_1, \end{aligned} \quad (15)$$

где $\Delta V_{PI}(t)$ – скорость поперечного смещения динамического объекта с ОСН за счет команды управления ЗКУ в поле ИТП; $\beta_{PI}(t)$ – текущий угол упреждения; $\Delta \beta_{PI}$ – малое приращение угла упреждения, т.е. дискретный поворот вектора скорости $\bar{V}_P$ за счет команды управления ЗКУ ОСН; β_0 – начальный угол вектора $\bar{V}_P$ при захвате тепловых образов поля ИТП в момент времени t_1 .

На основании непрерывного процесса управления ОСН [8] запишем соотношение

$$\beta_{PI}(t) = \beta_0 + (1 - k_\omega)(\psi_{PI}(t) - \psi_0), \quad (16)$$

где ψ_0 – начальный дополнительный курсовой угол цели-объекта при t_1 ; k_ω – коэффициент пропорциональности двухточечного метода пропорционального пространственного сближения объектов.

Совместное решение системы уравнений (15), с учетом соотношения (16), приводит к расчетной формуле оценки динамического промаха координатора ОСН в поле ИТП

$$\begin{aligned} H_g(t) &= 0,5 V_P \sin(\beta_{PI}(t)) \cdot k_\omega \cdot \frac{d \psi_{PI}(t)}{dt} \times \\ &\times \left[\frac{1}{f_{ИТП}^2} \left(N - \frac{f_{ИТП}}{\Delta f_{ЭКВ}} \right) \right]^2. \end{aligned} \quad (17)$$

Для более детального теоретического анализа динамики переходных процессов самонаведения ОСН в поле ИТП, с учетом характеристик пространственной траектории объекта-цели, введем функцию схода с траектории слежения (ФСТ) в общем виде

$$\Phi_{СТ}(t) = 1 - \frac{V_P}{V_{Ц}} \cdot \frac{\sin \beta_{PI}(t)}{\sin \psi_{PI}(t)} \cdot k_\omega \cdot \left(\frac{\Delta t_{ИТП}}{\tau_\Gamma} - 1 \right)^2, \quad (18)$$

где $\Delta t_{ИТП} = N \cdot \Delta \tau_{PI} = t_B - t_1$, с.

Анализ полученных зависимостей (3) и (14) показывает, что захват координатора ОСН поля ИТП происходит при их генерации в определенных частотах $f_{ЭКВ}^{ИТП}$ и заданных характеристиках замкнутого контура управления (ЗКУ) ОСН при выполнении условия

$$F_i(\Delta f_{ЭКВ}) \leq 1.$$

Режим, когда в зависимости (14) появляется знак равенства, определяет переходный процесс в динамике управления координатором ОСН, что определяет переход оптической системы в режим слежения за целью (динамическим объектом со скоростью $\bar{V}_{Ц}$). Поле ИТП не оказывает влияние на параметры ОСН в режиме

$$F_i(\Delta f_{ЭКВ}) > 1,$$

так как динамика тепловых образов полей ИТП превосходит разрешающую способность ($\Delta f_{ЭКВ}$) ОСН. Решение обратной задачи позволяет определить необходимые рабочие параметры ($\Delta f_{ЭКВ}$) для надежного функционирования ОСН в поле искусственных специально организованных тепловых полей, что становится особенно важным при организации надежной помехозащищенности ОСН.

Оценка влияния спектральной интенсивности полей ИТП. Анализ влияния энергетических параметров поля ИТП, формулы (4) и (6), показывает, что возрастание коэффициента $K_{П\lambda}$ приводит к увеличению помеховой составляющей определения относительной скорости цели ($\omega_{Ц}(t)$) в связанной системе координат ОСН.

При выполнении условий (3) $F_i(t) \leq 1,0$ координатор ОСН сопровождает ложные образы поля ИТП, даже при небольших значениях $K_{П\lambda} > 0,5$, т.е. ЗКУ отрабатывает ложное (мнимое) положение цели [15].

При значительных величинах коэффициента

$$K_{П\lambda} \geq [K_{П\lambda}]_{ПОР} \quad (19)$$

выше пороговых значений, которые определяются известными параметрами ЗКУ ОСН, процесс слежения и самонаведения выходит из процесса «нор-

мального» управления. Указанная закономерность объясняется тем, что, во-первых с ростом коэффициента $K_{П\lambda}$ возрастает амплитуда интенсивности излучения ИТП (см. формулы (4), (7) и (12), что приводит к увеличению скорости переходных процессов в ЗКУ ОСН, т.е. возникает условие резкого возрастания углового ускорения цели-объекта самонаведения измеряемого ЗКУ ОСН

$$\left| \frac{d^2 \psi_{П}^{\Pi}(t)}{dt^2} \right|, \quad (20)$$

после которого поле ИТП не влияет на параметры ОСН. Нарушаются условия (3), т.е.

$$F_i(t) > 1,0.$$

Во-вторых, при высоких значениях $K_{П\lambda} > 10$ возможно перенасыщение «ослепление» приемника лучистой энергии ОСН. При этом возникает мертвая зона ЗКУ ОСН определяемая временем генерации импульсов полей ИТП указанной интенсивности, которая может быть оценена зависимостью

$$R_{МЗ} \cong N \cdot \Delta \tau_{П} \cdot V_P. \quad (21)$$

Оценка проходимости полей ИТП логических схем помехозащищенности ОСН. Может возникнуть вероятностная ситуация, когда даже стробирование сигнала ЗКУ ОСН не приводит к ее помехозащищенности, т.к. в последующий момент времени возникает сигнал управления по закону

$$F_i(t) < 1 \text{ при } K_{П\lambda} < [K_{П\lambda}]_{ПОР}.$$

При нормальном законе распределения вероятность того, что строб ЗКУ ОСН может оказаться в пределах последовательности импульсов поля ИТП предлагается оценить по соотношению

$$P_3(\delta_O) = \frac{1}{\delta_{KB} \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(\delta_O - \delta_{CP})^2}{2\delta_{KB}^2} \right\}, \quad (22)$$

где δ_O – реализованная величина сдвига по фронту, заложенная в систему ЗКУ ОСН; δ_{CP} – математическое ожидание (среднее отклонение); δ_{KB} – среднеквадратичное отклонение, зависящее от вида модуляции заложенной в анализаторе изображения ОСН.

Величину δ_{KB} можно определить по известной формуле в зависимости от вида модуляции в каналах связи

$$\delta_{KB} = a \cdot V_M (b \cdot \mu \cdot \Delta f_{ЭKB})^{-1}, \quad (23)$$

где a, b – коэффициенты, учитывающие вид модуляции в оптическом канале связи; μ – коэффициент отношения полезного сигнала к шуму; V_M – скорость модуляции.

Величину математического ожидания находим по предлагаемой зависимости

$$\delta_{CP} = D(t) \cdot \frac{f_{ЭKB}^{ИТП}}{\Delta f_{ЭKB}}, \quad (24)$$

где $D(t)$ – функция времени сдвига фронта импульса поля ИТП.

Общий итог

Анализ полученных зависимостей (14), (17), (18) и (24) указывает на их одинаковую физическую основу, где в качестве аргумента выступает отношение $\frac{f_{ЭKB}^{ИТП}}{\Delta f_{ЭKB}}$, которое определяет приведенное дискретное время взаимодействия сигналов ЗКУ ОСН и генерируемого поля ИТП.

Таким образом, представленный подход к оценке влияния поля ИТП на основные параметры ЗКУ позволяет проводить теоретические исследования переходных динамических процессов слежения и самонаведения на стадии проектирования ОСН и получить исходные данные для генераторов полей ИТП для систем защиты тепловыделяющих объектов.

Заключение

1. Предложенные модели, алгоритмы и методики оценки влияния полей ИТП на ОСН, с известными характеристиками, позволяют на этапе эскизного проектирования оценить их надежность и эффективность при разработке способов и методов помехозащищенности, а также параметры переходных динамических процессов самонаведения.

2. Приведенные методики позволяют решить обратную задачу – определить параметры полей ИТП, обеспечивающие срыв надежной работы ОСН.

3. Предложенный подход к оценке эффективности ОСН в поле ИТП может быть использован как при создании надежных ОСН, так и систем генерирования полей ИТП при разработке систем защиты излучающих динамических объектов от следящих и сопровождающих систем самонаведения, в том числе при разработке систем защиты по предложенной технологии «ПСТО» – пространственное смещение тепловых образов [10].

Литература

1. Tunde Balvanyos and Lester B.Lave. The economic implications of terrorist attack on commercial aviation the USA/Create report, Under FEMA Grant N00014-05-0630 September 4, 2005, USC, CREATE HOMELAND SECURITY CENTER. – P.34.
2. Харкевич А.А. Борьба с помехами. – М.: Наука, 1965. – 275 с.
3. Якушенков Ю.Г., Луканцев В.Н., Колосов М.П. Методы борьбы с помехами в оптико-электронных приборах. – М.: Радио и связь, 1981. – 180 с.
4. Защита самолетов от ракет с тепловыми головками самонаведения / Под общей ред. М.Н. Мишука. – М.: Воениздат, 1982. – 384 с.
5. Вакин С.А., Шустов Л.Н. Основы радиоэлектронной борьбы: Учебное пособие. Ч. 1. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1998. – 118 с.
6. Перумов Ю.И., Фомичев К.И., Юдин Л.М. Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием / Под ред. Ю.М. Перумова. – М.: Радиотехника, 2003. – 416 с.
7. Active Infrared Countermeasures / Charles J. Tranchita, Kazimieras Jakstas, Robert G. Palazzo Northrop Electronics Systems Division Rolling Meadows, Illinois. Joseph C. O'Connell U.S. Army CECOM Fort Monmouth, New Jersey / CHARTER 3 / New York, 1990. – P. 235-286.
8. Лазарев Л.П. Инфракрасные и световые приборы самонаведения и наведения летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1976. – 568 с.
9. Физика и техника инфракрасного излучения: Пер. с англ. / Дж.Э. Джемисон, Р.Х. Мак-Фи, и др. – М.: Сов. радио, 1965. – 641 с.
10. Кулалаев В.В., Науменко П.О., Кулалаев А.В. Состояние и перспективы разработок систем защиты самолетов гражданской авиации от террористических пусков ракет с тепловыми головками самонаведения // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2003. – Вип. 40/5. – С. 13-18.
11. Кулалаев В.В. Оценка снижения эффективности оптических поисковых и следящих систем в условиях применения искусственных организованных помех // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2004. – № 3 (11). – С. 59-64.
12. Кулалаев В.В. Влияние организованных помеховых сигналов на характеристики поисковых и следящих оптических систем с фильтром Калмана // *Радиотехнические и компьютерные системы*. – 2004. – № 2. – С. 37-41.
13. Кулалаев В.В. Определение времени процесса срыва сопровождения цели оптической системой самонаведения при воздействии организованных помеховых оптических сигналов устройства противодействия // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2004. – № 8. – С. 42-45.
14. Кулалаев В.В. Математическая модель вероятности срыва автоматического сопровождения цели оптической системой самонаведения при воздействии организованных помеховых сигналов устройств противодействия // *Системы обработки информации*. – Х.: ХВУ, 2004. – Вип. 7. – С. 112-124.
15. Кулалаев В.В. Вероятность пропуска организованных помеховых сигналов согласованным фильтром электронного блока в оптических системах самонаведения // *Системы обработки информации*. – Х.: ХВУ, 2004. – Вип. 6. – С. 127-133.

Поступила в редакцию 11.05.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.И. Илюшко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ», Харьков.