

УДК 623.46.001:533.6.011

В.В. КУЛАЛАЕВ

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

ОЦЕНКА СНИЖЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ПОИСКОВЫХ И СЛЕДЯЩИХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ОРГАНИЗОВАННЫХ ПОМЕХ

Представлены основы построения теоретической оценки снижения потенциальной эффективности оптических поисковых и следящих систем в условиях применения искусственных организованных оптических помех для защиты летательных аппаратов различного назначения. Введена система критериев оценки и определены условия событий срыва процессов обнаружения и сопровождения оптическими системами объектов, излучающих искусственные оптические помехи с определением соответствующих вероятностей указанных событий.

поисковая система, следящая система, оптические помехи, устройство противодействия

С момента создания эффективных оптических систем поиска и сопровождения различных объектов, излучающих в оптическом диапазоне, в условиях закрытости и конкуренции ведутся работы по разработке устройств противодействия (УП) этим системам путем создания искусственных организованных помех в пространственном канале обратной кинематической связи между объектом и системой поиска и сопровождения (далее система). Обзор работ по состоянию данного вопроса можно найти в работах [1 – 4]. В СССР научные работы указанного направления велись по правительственным программам, начиная с 1991 года автор данной работы проводит исследования в Украине по собственной инициативе, хотя актуальность проблемы не вызывает сомнений [1, 2, 4].

Таким образом, **целью статьи** является обобщение результатов накопленного опыта данного научного направления и разработка системного подхода к снижению эффективности оптических поисковых и следящих систем в условиях излучения объектом (с помощью УП) искусственных организованных помех в канале кинематической обратной связи между объектом и системой.

Введем некоторые определения. Под противодействием системам будем понимать генерирование пространственно-модулированных оптических помех со стороны объекта (УП) по закону

$$F_{\Pi}(x, y, z, \tau), \quad (1)$$

где x, y, z – пространственные координаты;

τ – текущее время.

Помеха генерируется с определенной интенсивностью оптического излучения с коэффициентом

$$K_{\Pi} = \Phi_{\Pi\Omega} / \Phi_{O\Omega} \in]0; N], \quad (2)$$

где N – действительное число;

K_{Π} – коэффициент интенсивности излучения модулированной оптической помехи;

$\Phi_{\Pi\Omega}$ – лучистый поток от помехового источника УП;

$\Phi_{O\Omega}$ – стационарный лучистый поток от объекта в пространстве предметов без помехового излучения.

Считаем, что источник оптических помех (устройство) и объект совмещены в пространстве предметов.

Под срывом работы системы будем понимать процесс, происходящий в системе под воздействием оптической помехи УП в течение времени $\Delta\tau_{\Pi}$,

после которого система не может выполнить поставленную задачу с определенной вероятностью $P_{срв}(\lambda_1)$, где λ_1 – параметр, определяющий процесс срыва.

Таким образом, рассматривается следующая пространственная модель взаимодействия: объект, совмещенный с УП в пространстве предметов и на некотором заданном расстоянии L от него, и система, которые связаны единственным каналом – кинематическим пространственным звеном обратной связи [5, 6].

На основании принятой модели и применяя принцип суперпозиции [5 – 9] выражение, определяющее суммарный поток излучения от объекта, совмещенного с УП, имеет вид

$$\begin{aligned}\bar{\Phi}_{OB}(\tau) &= 1 + K_{\Pi} F_{\Pi}(*, \tau), \\ \bar{\Phi}_{OB}(\tau) &= \frac{\Phi_{OB}(\tau)}{\Phi_{OЭ}}.\end{aligned}\quad (3)$$

Здесь $\Phi_{OЭ}$ – лучистый поток от объекта без помехового оптического сигнала ($F_{\Pi}(*, \tau) = 0$);

* – x, y, z – принято для удобства записи.

Система через пространственное звено обратной кинематической связи воспринимает поток лучистой информации от объекта в виде

$$\bar{\Phi}_C(\tau) = (1 + K_{\Pi} F_{\Pi}(*, \tau)) f_C(\tau), \quad (4)$$

где $f_C(\tau)$ – закон обработки лучистой информации от объекта, заложенный в систему.

Если оптическая помеха, генерируемая УП, находится в области длин волн, которые не поддаются селекции системой, то помеховый оптический сигнал проходит в электронный блок (ЭБ) управления системой [5, 6]. Тогда оптическая помеховая составляющая определяется выражением

$$\Delta \bar{\Phi}_{\Pi}(\tau) = K_{\Pi} F_{\Pi}(*, \tau) f_C(\tau), \quad (5)$$

соответственно при постоянном импедансе ЭБ системы [6], электрический помеховый сигнал управления системы имеет вид

$$\Delta \bar{U}_{\Pi}(\tau) = K_{ЭБ} K_{\Pi} F_{\Pi}(*, \tau) f_C(\tau), \quad (6)$$

где $K_{ЭБ}$ – коэффициент адекватного преобразования суммарного оптического сигнала в электрический сигнал управления в ЭБ системы.

Очевидно, что максимальный помеховый сигнал определяется после решения уравнения

$$\frac{d\Delta \bar{U}_{\Pi}(\tau)}{d\tau} = 0. \quad (7)$$

Тогда справедливы соотношения:

$$\begin{aligned}\frac{d}{d\tau}(F_{\Pi}(*, \tau) f_C(\tau)) &= 0; \\ F_{\Pi}(*, \tau) f_C(\tau) &= const.\end{aligned}\quad (8)$$

Решая уравнение

$$\frac{dF_{\Pi}(*, \tau)}{d\tau} f_C(\tau) + \frac{df_C(\tau)}{d\tau} F_{\Pi}(*, \tau) = 0,$$

находим, что

$$F_{\Pi}(*, \tau) f_C(\tau) = 1, 0, \quad (9)$$

и далее

$$\frac{dF_{\Pi}(*, \tau)}{d\tau} = -\frac{1}{f_C^2(\tau)} \frac{df_C(\tau)}{d\tau}. \quad (10)$$

Анализ соотношений (5) и (6) приводит к следующим промежуточным выводам:

– в систему можно подать через пространственное кинематическое звено обратной связи помеховый оптический сигнал в ее рабочем диапазоне длин волн $\Delta \lambda_i$;

– помеховый управляющий сигнал в ЭБ системы будет наибольшим при выполнении условия (9), которое одновременно позволяет оценить вид закона модуляции оптического помехового сигнала устройства $F_{\Pi}(*, \tau)$ при известном законе $f_C(\tau)$;

– в линейных системах управления [5, 6, 9] вероятностные события прохождения помехового управляющего сигнала подчиняются закономерностям, определенным зависимостью (10).

Известно, что в поисковых и следящих оптических системах используется аппаратура

обнаружения и определения положения в пределах поля зрения системы медленно движущихся объектов в плоскости предметов, а также аппаратура, точно отслеживающая координаты объекта. В данной работе следящая система рассматривается как разновидность или специализированный вид поисковой системы [5]. Таким образом, рассматриваемая в нашем случае система отвечает требованиям поисковой и следящей систем, т.е. в автоматическом режиме производится обнаружение цели и слежение за нею (имеется в виду наличие управляющей системы для перемещения оптической оси системы и соответственно поля зрения вслед за движением объекта с устройством, генерирующим оптический помеховый сигнал [6]).

При воздействии оптического помехового сигнала возможны случаи искажения управляющих сигналов в системе, при которых она входит в режим процесса срыва обнаружения и сопровождения объекта. При этом параметр управления системой может принимать критическое значение $(\Delta \bar{U}_{кр}^{\Pi})$, при котором дальнейшее выполнение задачи системы не может быть осуществлено [2].

Введем критерий оценки снижения вероятности обнаружения объекта системой под воздействием организованной оптической помехи УП в виде

$$m_k(\tau) = 1 + K_{\Pi} F_{\Pi}(*, \tau). \quad (11)$$

Тогда пороговая чувствительность системы к обнаружению может быть определена соотношением [5, с. 384]

$$D_C - \left(\frac{S}{N} \right)_0 \left(\int_0^{\infty} \Phi'_{OB}(\lambda) d\lambda \right)^{-1.0}, \quad (12)$$

где $\left(\frac{S}{N} \right)_0$ – паспортное отношение полезного сигнала к естественному шуму, необходимое для

эффективной работы системы $(1 < \left(\frac{S}{N} \right)_0 < 8$ [6]). С учетом зависимости (11) выражение (12) приводится к виду, удобному для исследований:

$$D_C(\tau) = \left(\frac{S}{N} \right)_0 \left(m_k(\tau) \int_0^{\infty} \Phi'_{OЭ}(\lambda) d\lambda \right)^{-1.0}. \quad (13)$$

В зависимостях (12) и (13) $\Phi'_{OB}(\lambda)$ и $\Phi'_{OЭ}(\lambda)$ относятся к входному зрачку системы.

Вероятность обнаружения получим, преобразовав эмпирическую модель [8, 9] обнаружения цели, предложенную в конце 70-х годов прошлого века в виде

$$P_{OB}(\lambda) = P_{\infty} (1 - \exp\{-\lambda\}), \quad (14)$$

где P_{∞} – вероятность обнаружения при идеальных условиях и бесконечной экспозиции системы $(\tau \rightarrow \infty)$;

λ – параметр обнаружения объекта, равный $\lambda = \frac{\tau}{\alpha \tau_0}$ (τ – текущее время; α – коэффициент), определяющий обзор пространства предметов системой $(\alpha \leq 1,0)$;

τ_0 – паспортное время обнаружения объекта системой.

Тогда вероятность обнаружения объекта системой в условиях генерирования помех УП определяется формулой

$$P_{OB}^{\Pi}(\lambda) = P_{\infty} \left[1 - \exp\left\{ -\frac{\tau}{\alpha \tau_0 m_k(\tau)} \right\} \right]. \quad (15)$$

Для оценки эффективности противодействия системе генерированными оптическими помехами УП, пространственно совмещенному с объектом, удобно использовать выражение

$$\Delta P_{OB}(\tau) = P_{OB}(\tau) - P_{OB}^{\Pi}(\tau), \quad (16)$$

где индексом "П" обозначена помеховая величина.

Изменение вероятности обнаружения объектов P_{OB}^{Π} от времени наблюдения представлено на рис. 1.

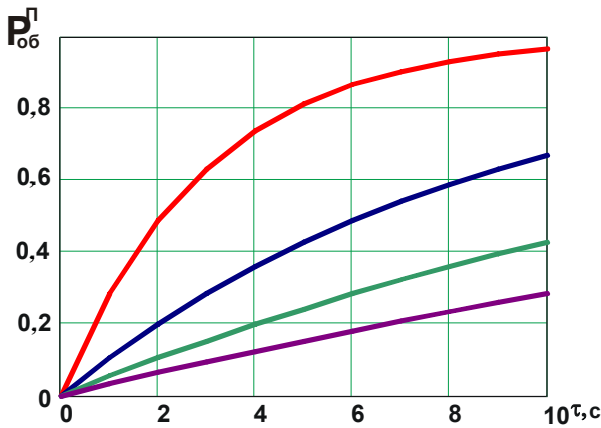


Рис. 1. Изменение вероятности обнаружения объекта системой под воздействием оптических помех УП в зависимости от времени наблюдения: линии сверху вниз соответствуют расчетам при значении критерия $m_k = 1, 3, 6, 8$

Изменение дальности обнаружения объекта системой в условиях модулированных помеховых оптических сигналов УП предлагается рассчитывать по зависимости

$$L^II(\tau) = L \sqrt{\frac{1}{m_k(\tau)}}, \quad (17)$$

где L – дальность обнаружения объекта системой без организованных помеховых оптических сигналов УП.

Срыв рабочих процессов системы оценим введением критерия срыва в виде

$$\begin{aligned} K_{срв}(\tau) &= \frac{\overline{U}_{II}(\tau)_i}{\overline{U}(\tau)_i} = \\ &= \frac{\overline{U}(\tau)_i + \overline{\Delta U}_{II}(\tau)_i}{\overline{U}(\tau)_i} = \\ &= 1 + \frac{\overline{\Delta U}_{II}(\tau)_i}{\overline{U}(\tau)_i}, \end{aligned} \quad (18)$$

где $\overline{U}(\tau)_i$ – i -й приведенный параметр управления системой без влияния организованных оптических помех (ООП);

$\overline{U}_{II}(\tau)_i$ – i -й приведенный помеховый параметр управления системой с учетом ООП;

$\overline{\Delta U}_{II}(\tau)_i$ – i -я помеховая составляющая управляющего сигнала системы, которая может

принять срывное (критическое) значение.

С учетом закона обработки суммарного оптического сигнала (4), принятого системой по заданному закону $f_C(\tau)$ для дальнейшего управления, зависимость (18) можно привести к виду

$$K_{срв}(\tau) = 1 + \frac{\tau_{\Gamma}}{\Delta\tau_{II}} K_{II} F_{II}(*, \tau). \quad (19)$$

Здесь $\Delta\tau_{II}$ – промежуток времени воздействия модулированной (организованной) оптической помехи УП на входной зрачок системы, с; τ_{Γ} – постоянная времени системы, с.

Таким образом, введенный критерий срыва рабочего процесса системы физически является приведенным временем, подчиняющимся функциональной зависимости вида

$$K_{срв}(\tau) = f\left(\frac{\tau_{\Gamma}}{\Delta\tau_{II}}; K_{II}; F_{II}(*, \tau)\right). \quad (20)$$

Анализ зависимостей (19) и (20) приводит к следующим выводам:

- критерий срыва пропорционален величине $\frac{\tau_{\Gamma}}{\Delta\tau_{II}}$, которая характеризует техническое совершенство системы (τ_{Γ}) и эффективность устройства противодействия (УП) величиной $\Delta\tau_{II}$, с;
- критерий срыва определяет энергетические параметры УП величиной K_{II} ;
- критерий срыва позволяет провести оценку эффективности принятого закона модуляции оптической помехи УП $F_{II}(*, \tau)$, который, в свою очередь, наряду с техническими решениями определяет величину $\Delta\tau_{II}$.

Вероятность срыва рабочего процесса системы под воздействием модулированных оптических помех УП можно оценить следующей формулой:

$$P_{срв}(\lambda)_1 = P_{II} \int_0^{\lambda_1} \rho(\lambda)_1 d\lambda_1. \quad (21)$$

Здесь P_{II} – вероятность событий взаимодействия помехового и основного управляющих сигналов, рассчитанных по «формуле успеха» [10];

$\rho(\lambda)_1$ – плотность вероятности случайных величин, приводящих к срыву рабочего процесса системы (распределение Пуассона [10]),

$$\rho(\lambda_1) = \exp\{-\lambda_1\}, \quad (22)$$

где $\lambda_1 = \frac{\tau}{\alpha\tau_\Gamma}$ – параметр условного закона срыва рабочего процесса системы.

На основании анализа проведенных многочисленных исследований автором предлагается формула для определения времени срыва $\tau_{срв}$ после воздействия помехового оптического сигнала τ_{II} в пространстве абсолютного времени в виде

$$\frac{\tau_{срв}}{\tau} = \sqrt{\frac{1}{K_{срв}}}, \quad (23)$$

где $K_{срв}$ определяется при $F_{II}(*, \tau) = 1,0$.

Тогда

$$\tau = \tau_{срв} \sqrt{K_{срв}} \quad (24)$$

и соответственно

$$\lambda_1 \rightarrow \lambda_{срв} = \frac{\tau_{срв}}{\alpha\tau_0} \sqrt{K_{срв}}, \quad (25)$$

$$\tau \rightarrow \tau_{срв}.$$

Выражение для определения вероятности срыва (21) с учетом (24), (25) приводится к виду

$$P_{срв}(\tau) = P_{II} B \int_{\tau_{II}=0}^{\tau} \exp\left\{-\frac{\tau}{\alpha\tau_\Gamma}\right\} d\tau, \quad (26)$$

где условно принято, что $B = \alpha\tau_\Gamma$.

После интегрирования зависимости (26) получим расчетную формулу для определения условной вероятности срыва процессов системы:

$$P_{срв}(\tau) = P_{II} \left(1 - \exp\left\{-\frac{\tau}{\alpha\tau_\Gamma} \sqrt{K_{срв}}\right\}\right). \quad (27)$$

Здесь τ_Γ – постоянная времени системы [5, 6], определяющая эквивалентную полосу частот пропускания шумов системой [5, с. 598],

$$\tau_\Gamma = \frac{1}{K_v \Delta f_C}, \quad (28)$$

где Δf_C – эквивалентная полоса частот пропускания шумов системой;

K_v – коэффициент пропорциональности.

С учетом зависимости (28) окончательно получим

$$P_{срв}(\tau) = P_{II} \left(1 - \exp\left\{-\frac{\tau}{\alpha} K_v \Delta f_C \sqrt{K_{срв}}\right\}\right). \quad (29)$$

Изменение условной вероятности срыва процессов системы $P_{срв}$ от времени представлено на рис. 2.

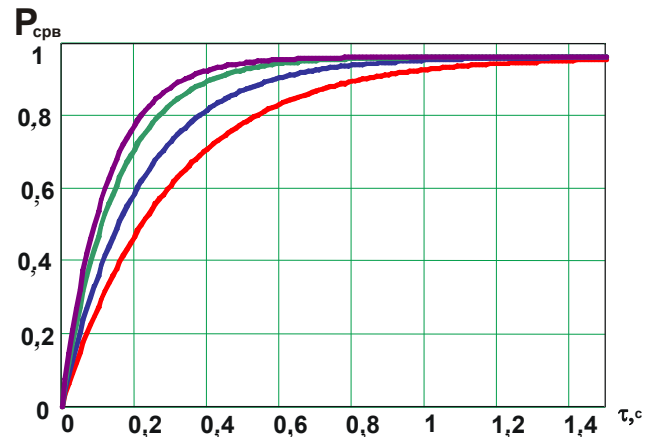


Рис. 2. Изменение вероятности срыва рабочих процессов системы под воздействием оптических помех УП в зависимости от времени воздействия помехового сигнала: линии сверху вниз соответствуют расчетам при значении критерия срыва $K_{срв} = 6, 4, 3, 2$; $P_{II} = 0,967$

Выводы

1. Для оценки снижения эффективности поисковых и следящих систем в условиях применения специально организованных модулированных оптических помех впервые

предложены критерии $m_k(\tau)$ и $K_{срв}(\tau)$ (зависимости (11) и (19)).

2. Предложены аналитические зависимости для определения вероятностей обнаружения и срыва сопровождения объекта системой под воздействием помеховых оптических сигналов УП в условиях реального времени (формулы (15) и (29)).

3. Результаты работы могут быть использованы при разработке оптических систем различного назначения для получения количественных показателей их эффективности, в том числе систем для защиты летательных аппаратов различного назначения.

Литература

1. 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. – Вип. 40/5. – С. 13 – 18.
2. Ольгин С. Проблемы оптоэлектронного противодействия (по взглядам зарубежных военных специалистов) // *Журнал ЗВО*. – 2002. – № 9. – С. 35 – 40.
3. Кулалаев В.В. Концепция применения газодинамических тепловыделяющих энергоустановок в системах обеспечения безопасности полетов летательных аппаратов // *Вісник двигунобудування*. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич». – 2003. – № 2. – С. 20 – 24.
4. Щербак Н. Противодействие зенитным управляемым ракетам с инфракрасным наведением (современные бортовые средства) // *Электроника: Наука. Технология. Бизнес*. – 2000. – № 5. – С. 52 – 55.
5. Физика и техника инфракрасного излучения: Пер. с англ. / Джемисон Дж.Э., Мак-Фи Р.Х., Плас Дж.Н., Грубе Р.Г., Ричардс О.Дж.; Под общ. ред. Н.В. Васильченко. – М.: Сов. радио, 1965. – 641 с.
6. Лазарев Л.П. Инфракрасные и световые приборы самонаведения и наведения летательных аппаратов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1976. – 568 с.
7. Основы построения и оценки потенциальной эффективности систем зенитного управляемого ракетного оружия: Монография / А.П. Ковтуненко, А.Ф. Козлов, О.П. Коростелев, Н.А. Шершнеv. – К.: Фитосоциоцентр, 2003. – 296 с.
8. Довідник з протиповітряної оборони / А.Я. Торопчин, І.О. Романенко, Ю.Г.Даник, Р.Е. Пашенко – К.: МО України; Х.: ХВУ, 2003. – 368 с.
9. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Тенденция развития тепловизионных систем второго и третьего поколения и некоторые особенности их моделирования (по материалам зарубежной печати). – М.: ОАО ЦНИИ «Циклон»; МИИГА и К°, 2002. – 18 с.
10. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике / Под ред. И.Г. Арамановича. – М.: Наука, 1974. – 831 с.

Поступила в редакцию 05.03.04

Рецензент: д-р. техн. наук, проф. В.И. Карпенко, ХВУ, г.Харьков; канд. техн. наук, проф. Н.А. Шершнеv, ХВУ, г. Харьков