

УДК 623.46.001:533.011

А.В. КУЛАЛАЕВ

Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина

УПРАВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ПОЛОЖЕНИЕМ КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ САМОНАВЕДЕНИИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ДИНАМИЧЕСКИЙ ИЗЛУЧАЮЩИЙ ОБЪЕКТ

На основании системного феноменологического подхода проведено исследование параметров управления пространственным положением каналов передачи информации (КПИ) и связи оптико-электронных систем слежения (ОЭСС) при самонаведении беспилотного летательного аппарата (БПЛА) на динамический излучающий объект в поле внешних, возмущающих искусственных тепловых помех (ИТП). Составлены математические модели и получены аналитические зависимости для исследования параметров пространственного управления КПИ при сближении двух динамических объектов: БПЛА и излучающего летательного аппарата (ЛА) по методу пропорционального сближения (МПС). Результаты работы могут быть использованы при исследованиях методов помехозащищённости и динамической устойчивости контуров управления ОЭСС, а также при синтезе систем оптико-электронного противодействия (СОЭП) ОЭСС различного оптического диапазона на БПЛА, например, для обеспечения безопасности полетов гражданской и коммерческой авиации.

Ключевые слова: *информационное поле, тепловой образ, поле искусственных тепловых помех, вектор, электромагнитные излучения, управление, противодействие, коррекция, оптико-электронная следящая система.*

Общие положения

В настоящей работе проведено исследование научной проблемы пространственного управления КПИ между БПЛА с ОЭСС (здесь БПЛА – объект управления) и динамическим пассивно излучающим ЛА при сближении по заданному алгоритму в условиях искусственных детерминированных помех. При исследованиях принят системный феноменологический подход (СФП). Под данным подходом понимается: учёт накопленного теоретического и экспериментального научного материала для построения адекватных физико-математических моделей для исследований проблемы с оптимальным числом аргументов иерархических уровней значимости. СФП позволяет с оптимальной эффективностью исследовать переходные процессы в сложных динамических системах управления, к которым относятся современные типы ОЭСС. Особенно, когда КПИ управления ОЭСС подвержены воздействию специально организованных, детерминированных внешних полей ИТП, генерируемых СОЭП. Доступные опубликованные научные работы указанного научного направления [1-4, 6, 7, 11-14] не раскрывают в полной мере решение поставленной в данной работе задачи. В современных пассивных ОЭСС заложен, как правило, алгоритм МПС или его модификации [10-14]. Этот метод

сближения позволяет сопровождать БПЛА с ОЭСС криволинейно движущийся пассивно излучающий объект (ПИО), например ЛА с высокой степенью помехозащищённости и эффективности [1, 9, 10].

Процессы самонаведения и слежения пассивной ОЭСС БПЛА осуществляются в одной плоскости по единственному КПИ, направленному по линии визирования (ЛВ) объекта пассивного электромагнитного излучения (ЭМИ) ЛА или по вектору дальности $\vec{r}(t)$ между динамическими объектами [1, 9, 10, 12]. При этом КПИ совпадает с направлением лучистого потока от излучающего объекта – ЛА [9, 12]. В поле зрения приёмной оптической системы (ПОС) создается первичный оптический сигнал управления пропорциональный углу рассогласования $\Delta(t)$ между $\vec{r}(t)$ – КПИ и направлением оптической оси координатора ОЭСС БПЛА в данный момент времени [9, 12, 13]. При исследовании процессов самонаведения ОЭСС при воздействии специально организованных ИТП СОЭП, особое значение приобретает разработка и исследование методов пространственного управления КПИ в интересах решения двойной прикладной научно – технической задачи. Первой – в обеспечении точности наведения и динамической устойчивости замкнутого контура управления (ЗКУ) ОЭСС и второй – в создании СОЭП при управлении про-

пространственным положением КПИ ОЭСС, например, для обеспечения безопасности полетов ЛА в зонах возможного применения БПЛА с ОЭСС [5, 15–18]. Проблема пространственного управления КПИ ОЭСС сводится к исследованию процесса слежения и самонаведения при одновременном сопровождении, в поле зрения ПОС, нескольких сигнатур тепловых сигналов одинакового спектрального состава и разной мощности и контраста. Однако по данным источников доступной информации таким исследованиям уделяется мало внимания. В известных работах рассмотрены только случаи сопровождения ОЭСС неподвижного двойного источника излучения одинаковой мощности [6, 7, 11, 13] для анализа вида модуляторов в системе анализатора изображений (АИ), что требует проведения дополнительных научных исследований данного направления.

Таким образом, целью работы является:

- разработка методологии проведения исследований;
 - построение моделей влияния детерминированных полей ИТП СОЭП на управление пространственным положением КПИ в каналах управления ОЭСС БПЛА при самонаведении на динамический пассивно излучающий объект (ПИО);
 - исследование динамической устойчивости электронного усиливающего тракта ОЭСС в условиях воздействия детерминированной системы пространственных помех;
 - исследование связи между кинематическими параметрами траектории сближения управляемого БПЛА с ЛА–целью и сигналов управления электронного усиливающего блока бортовой ОЭСС БПЛА при воздействии детерминированных помех.
- Работа выполнена в Киевском авиационном университете, г. Киев, Украина, в рамках международного проекта Р371 УНТЦ, г. Киев.

1. Модель траектории сближения динамических объектов в поле искусственных тепловых помех

Для получения исходных данных при составлении математической модели управления пространственным положением КПИ рассмотрим МПС [1-3, 8-14]. Пусть БПЛА с ОЭСС пассивного типа и ЛА (например, пассажирский самолёт типа Boeing –747–800) – ПИО в режиме взлёта сближаются в трёхмерном пространстве по МПС в одной плоскости. Предлагаемая система уравнений, описывающих модель сближения объектов, имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} h_0 &= r_0 \cdot \sin \psi_0, \\ \omega_0(t) &= V_z(t) \cdot \sin \psi_0 / r_0, \\ V_z(t) &= V_0 + a \cdot t, \\ V_W(t) &= V_z(t) \cdot \cos \psi(t) - V_p \cdot \cos \beta(t), \\ r_z(t) &= r_0 + \int_0^t V_z(t) \cdot \cos \psi(t) \cdot dt, \\ r_p(t) &= V_p \cdot \int_0^t \cos \beta(t) \cdot dt, \\ r_W(t) &= r_z(t) - r_p(t), \\ \Delta(t) &= \exp\left(\frac{-t}{T_c}\right) \cdot \int_0^t \exp\left(\frac{t}{T_c}\right) \cdot \omega_0(t) \cdot dt, \\ \psi(t) &= \psi_0 - \Delta(t) + \frac{1}{T_c} \int_0^t \Delta(t) \cdot dt, \\ \beta(t) &= \beta_0 + f(k_w) \cdot (\psi(t) - \psi_0), \\ W_{pn}^{пот}(t) &= V_p \cdot \frac{d^2}{dt^2} (\sin \beta(t)), \\ W_{pn}(t) &= W(p) \cdot W_{pn}^{пот}(t), \\ W(p) &= \frac{1}{\left(1 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot p\right)}, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где $W_{pn}^{пот}(t)$, $W_{pn}(t)$ – потребное ускорение при управлении БПЛА и реальное ускорение, нормальные к ЛВ, соответственно;

$W(p)$ – оператор управления БПЛА;

a_i – коэффициенты оператора управления;

$p = \frac{1}{dt}$ – оператор дифференцирования.

Начальные условия:

$V_0 = 195$ – начальная скорость ЛА при захвате его в сопровождение ОЭСС, м/с;

$V_p = 550$ – средняя скорость БПЛА с ОЭСС (объекта управления), м/с;

$r_0 = 1400$ – модуль вектора дальности в момент пуска БПЛА с ОЭСС (начальное расстояние), м;

$k_w = 3,5$ – коэффициент пропорциональности (пропорциональной навигации) МПС;

T_c – постоянная времени ЗКУ ОЭСС (задаётся);

$\psi_0 = \frac{\pi}{4}$ – начальный дополнительный курсовой угол ЛА – цели;

$\beta_0 = \frac{\pi}{10}$ – начальный угол упреждения при пуске БПЛА с ОЭСС;

$a = 2$ – ускорение ЛА при взлёте;

$\alpha = 0,18$ – угол траектории взлёта.

Все величины начальных условий модели сближения приведены в системе СИ.

Траектории полёта ЛА и БПЛА с ОЭСС находим по следующим соотношениям, определяющим их координаты по времени:

– для траектории ЛА – цели (ПИО):

$$x_o(t) = \begin{cases} r_o \cdot \cos \psi_o, & \text{если } t = 0; \\ r_o \cdot \cos \psi_o + \sin \alpha \cdot \int_0^t V_z(t) \cdot dt, & \text{если } t > 0; \end{cases} \quad (2)$$

$$y_o(t) = \begin{cases} r_o \cdot \sin \alpha, & \text{если } t = 0; \\ h_o + \sin \alpha \cdot \int_0^t V_z(t) \cdot dt, & \text{если } t > 0; \end{cases}$$

– для траектории БПЛА с ОЭСС:

$$x_p(t) = r_o \cdot \cos \psi_o - r_w(t) \cdot \cos \psi(t) + \cos \alpha \cdot \int_0^t V_z(t) \cdot dt; \quad (3)$$

$$y_p(t) = h_o - r_w(t) \cdot \sin \psi(t) + \sin \alpha \cdot \int_0^t V_z(t) \cdot dt.$$

При проведении расчётов кинематики сближения приняты следующие допущения: траектории сближения объектов лежат в одной плоскости и их скорости постоянны. Результаты расчётов траекторий встречи ЛА и носителя ОЭСС представлены на рис.1.

Расчётное время встречи определим графически согласно графикам представленным на рис. 2.

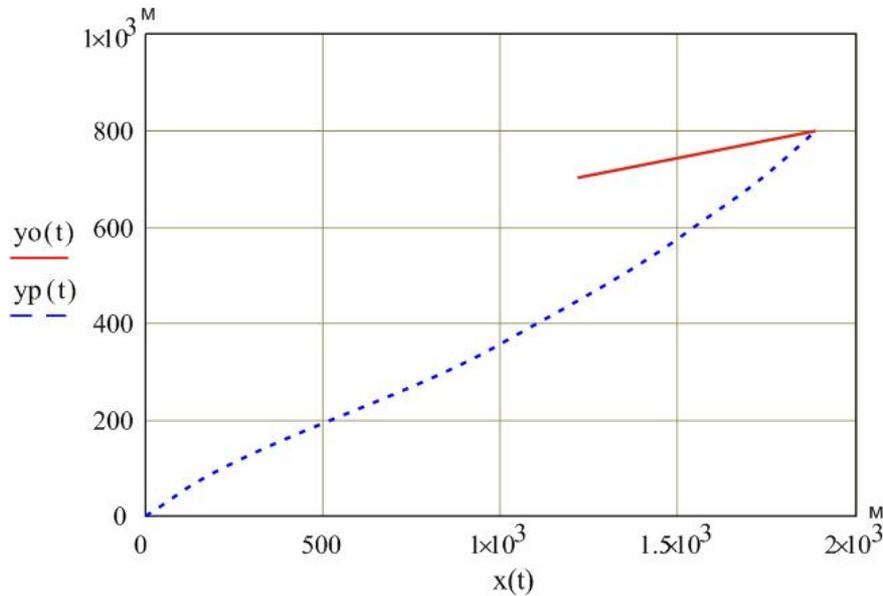


Рис. 1. График траекторий встречи ЛА по МПС:

$y_o(t)$ – траектория ЛА (ПИО) при взлёте; $y_p(t)$ – траектория БПЛА с ОЭСС (объект управления)

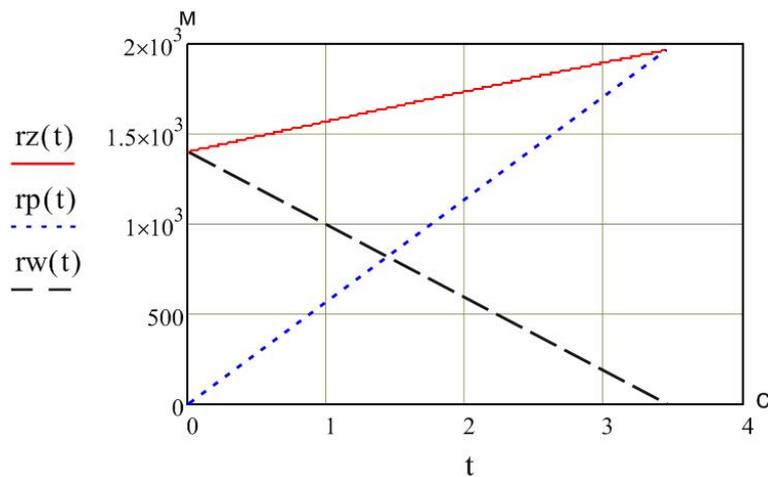


Рис. 2. График для определения времени встречи ЛА:

$r_z(t)$ – расстояние пройденное целью; $r_p(t)$ – расстояние пройденное БПЛА с ОЭСС;

$r_w(t)$ – расстояние между целью и БПЛА

Из анализа графиков рис.2 следует, что расчётное время встречи ЛА составляет $t_{в} \approx 3,4$, сек.

Параметры модулированных тепловых образов (ТО) поля ИТП СОЭП зададим следующими соотношениями:

– энергетические параметры:

$K_{\Pi i} = \frac{I_{\Pi i}^{\max}}{I_0}$ – коэффициент интенсивности помехового излучения i – го ТО поля ИТП, здесь $I_{\Pi i}^{\max}$ и I_0 – максимальное значение энергетической силы излучения i – го ТО поля ИТП и цели – ЛА ПИО $\frac{Вт}{ср}$;

$K_{\Pi i}(t) = 1 + k_f(t) \cdot K_{\Pi i} \cdot F_{\Pi}(t, |\Delta \vec{r}_i|, \dots)$ – коэффициент эффективности внешних возмущающих воздействий излучения i – го ТО поля ИТП СОЭП на приёмную оптическую систему ОЭСС, здесь $k_f(t) = f_{\Pi}(t) / \Delta f_{\text{ЭКВ}}^{\text{ЗКУ}}$ – коэффициент пропуска частот управления бортовыми генераторами ТО поля ИТП и ЗКУ ОЭСС;

$F_{\Pi}(t, |\Delta \vec{r}_i|, \dots)$ – пространственный закон модуляции ТО поля ИТП с заданной амплитудной частотно – фазовой характеристикой (АЧФ);

$|\Delta \vec{r}_i|$ – модуль вектора пространственного смещения i – го ТО поля ИТП;

– кинематические параметры:

$\Delta \psi_{\Pi i} = f(t, |\Delta \vec{r}_i|, F_{\Pi}(t, |\Delta \vec{r}_i|, \dots), dF_{\Pi}/dt, |\vec{r}_w(t)|)$,
если $r_w(t) \geq r_{\Pi P}$;

$\Delta \psi_{\Pi i}(t) = 0$, если $r_w(t) < r_{\Pi D}$ – детерминированный шумовой (ошибочный) дополнительный курсовой угол (ДКУ) ЛА, возникающий за счёт воздействия i – го ТО поля ИТП; $r_{\Pi P} = \frac{|\Delta \vec{r}_i|}{2 \cdot \omega_{зр}}$ – предельное

расстояние оптического разрешения i – го ТО поля ИТП в угловой апертуре ПОС ОЭСС, где $2 \cdot \omega_{зр}$ – угловое поля зрения (конструктивная величина);

$\Delta \omega_{\Pi i}(t) = \frac{d}{dt}(\Delta \psi_{\Pi i}(t))$ – относительная угловая скорость вобуляции КПИ

(детерминированное управление флуктуацией оси координатора ОЭСС) при внешнем возмущающем воздействии угловой фазы и мощности i – го ТО поля ИТП в угловой апертуре ПОС ОЭСС, измеряется координатором.

Шум (ошибка) угла рассогласования, определяемого координатором ОЭСС при вобуляции КПИ в поле сигнатур i – го ТО ИТП СОЭП, определяется соотношением

$$\Delta_{\Pi i}(t) = \exp\left(\frac{-t}{T_C}\right) \cdot \int_0^t \exp\left(\frac{t}{T_C}\right) \cdot \Delta \omega_{\Pi i}(t) \cdot dt. \quad (4)$$

2. Кинематика сближения объектов по МПС и их связь с параметрами переходных процессов в ЗКУ ОЭСС в поле ИТП

Процессы сближения ЛА по МПС, в описанных условиях, состоят из нескольких этапов:

Первый этап. "Захват" цели (ЛА – ПИО) в сопровождение координатором ОЭСС БПЛА. Обычно оператор пуска БПЛА с ОЭСС в ручном или автоматическом режиме обеспечивает "захват" цели в течение нескольких секунд [8]. После выхода на рабочие режимы систем раскручивания гироскопа и арретирования оси координатора ОЭСС (выполнения команды "захват") и разрешения команды "пуск", БПЛА с ОЭСС покидает пусковую установку и находится в режиме автономного полёта. При этом полярная ось стабилизирующей гироскопической системы (ГС) координатора строго направлена на систему сигнатур тепловых сигналов от ЛА – ПИО. Цель воспринимается приёмником лучистой энергии (ПЛЭ) ОЭСС как групповой источник тепла с сигнатурами полей ИТП с одним яркостным центром. Так как нет оптического разрешения сигнатур двигателей цели и помеховых тепловых сигналов на большом расстоянии, полярная ось ГС координатора ОЭСС отслеживает яркостной центр – системы сигнатур цели. Половина поля зрения ПОС ОЭСС $\beta = 0,5 \cdot (2 \cdot \omega_{зр})$ определяет линейную часть дискриминационной характеристики (ДХ) ЗКУ [1-3, 8-14]. ДХ представляет собой математическую модель зависимость сигнала на выходе анализатора изображений (АИ) ОЭСС от угла рассогласования цели $\Delta_i(t)$, измеряемого координатором. При этом угловая скорость полярной оси ГС ограничивается максимальной угловой скоростью ЛВ цели ω_{\max} , которая определяет нижнюю границу работоспособности ЗКУ по коэффициенту усиления $K_C(t) = \frac{1}{T_C}$ ОЭСС, здесь T_C – постоянная времени контура управления ОЭСС [9, 12]. Управление ОЭСС, с момента автономного полета БПЛА осуществляется по двум основным конструктивным элементам. Первый элемент – это оптическая система с ПЛЭ и анализатором изображения с предварительным усилителем (ПУ) сигнала фототока, куда поступает первичная информация по КПИ от системы сигнатур излучающего ЛА, в виде векторных сигнатур тепловых сигналов от разогретых его конструктивных частей и от полей ИТП [5–7,9,10]. Второй элемент – это электронный блок усиления (ЭБУ) обработки первичной информации, где вырабатываются электрические (вторичные) сигналы управления исполнительными конструктивными силовыми

звеньями ЗКУ ОЭСС (к ним относятся: коррекционный блок управления координатором и силовой блок привода аэродинамических рулей, при управлении БПЛА с ОЭСС по тангажу и рысканию) [8, 9, 12-14]. Отметим, что первичная информация оптического диапазона через КПИ поступает в первичный элемент управления – оптическую систему ОЭСС, который является основным при формировании сигналов управления [10, 11]. Изменение первичной информации управления в начале автономного полёта БПЛА с ОЭСС в виде измеряемого координатором ОЭСС шума (ошибки) угла рассогласования $\Delta_{pi}(t)$ под воздействием i – го ТО поля ИТП СОЭП показано на рис. 4. Управление ЗКУ ОЭСС на первом этапе и последующих, происходит только динамичными векторными сигналами тепловых сигналов, которые находятся в угловой апертуре оптической системы от момента "захвата" цели в сопровождение до момента пространственной встречи ЛА по принятому алгоритму метода сближения [5].

Особенностью первого этапа является то, что при "захвате" ОЭСС тепловой цели в сопровождение оператором пуска БПЛА с ОЭСС, определенное время в ручном или автоматическом режиме, следует удерживать цель в прицеле пусковой установки с ограниченной амплитудой угловой раскачки линии визирования на цель [8]. В противном случае будет заблокирована команда "захват", а в дальнейшем и команда "пуск" [8]. Это связано с тем, что в момент "захвата" цели в сопровождение ОЭСС, полярная ось гироскопической системы координатора должна быть строго стабилизированной в направлении на цель по ЛВ (КПИ), при этом по заданному алгоритму формируется угол пеленга цели системой арретирования. За счёт воздействия поля ИТП генераторов СОЭП, команда «захват» на пусковой установке может быть заблокирована (нарушается работа системы арретирования), и «захват» цели ОЭСС в сопровождение не происходит [5].

Второй этап. Движение объектов (БПЛА с ОЭСС и ЛА – цели) по траекториям сближения по алгоритму МПС, заложенному в ЗКУ ОЭСС. При сближении, ось координатора ОЭСС постоянно направлена по вектору сигнатуры теплового сигнала от цели (КПИ) с определенным рассогласованием, а вектор скорости БПЛА с ОЭСС направлен с упреждением в мгновенную точку встречи [8]. Объекты движутся (если нет внешних помеховых возмущающих воздействий в виде полей ИТП) по расчетным кинематическим траекториям и встречаются в точке встречи в расчётное время t_B . По мере приближения БПЛА с ОЭСС к ЛА – цели, расстояние между объектами сокращается, т.е. $\vec{r}_W(t) \rightarrow 0$. Картинная плоскость, в

которой находится цель, приближается с одновременным уменьшением площади поля зрения ПОС ОЭСС. Наступает оптическое разрешение векторных тепловых сигналов от двигателей ЛА – цели с одновременным разрешением векторных сигнатур модулированных ТО полей ИТП, генерируемых средством индивидуальной ИК – защиты СОЭП. Поля ИТП могут быть созданы по новой концептуальной технологии ПСТО, описание которой приведено в работах [5, 15-18]. В этом случае в поле зрения ПОС, на ПЛЭ ОЭСС попадают векторные аддитивные тепловые сигналы непосредственно от цели и от системы генераторов модулированных ТО полей ИТП, т.е. происходит одновременное сопровождение ОЭСС нескольких тепловых сигнатур одного спектрального состава, но переменного контраста и мощности [5]. На определенном расстоянии (оптического разрешения системы источников излучения) от ЛА – цели, эти оптические сигналы, в зависимости от мощности лучистого потока, спектрального состава и заложенных в ОЭСС методов селекции и фильтрации, формируют сигналы управления ЭБУ (автопилотом), который выдаёт команды управления рулями БПЛА.

Определим изменение площади и диаметра круга поля зрения ПОС ОЭСС в полётное время БПЛА, при $\vec{r}_W(t) \rightarrow 0$:

$$S_{zr}(t) = \pi \cdot r_W(t) \cdot \omega_{zr}^2, \quad (5)$$

$$D_{zr}(t) = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot S_{zr}(t)}. \quad (6)$$

Результаты расчётов по зависимостям (5) и (6) представлены на рис. 3. Из анализа графиков рис.3 следует, что процесс пространственной встречи ЛА по методу МПС сводится к следующей математической модели:

$$\lim S_{zr}(t) = 0, \text{ при } t \rightarrow t_B. \quad (7)$$

Сближение объектов и пространственная встреча по МПС, практически, сводится к попаданию цели – ПИО в своеобразную "ловушку", а именно: в вершину конуса с угловой апертурой поля зрения ПОС ОЭСС БПЛА. На рис.3 видно, что это происходит на 3,4 с. полёта БПЛА с ОЭСС, т.е. в расчётное время встречи. Нарушение модели пространственной встречи ЛА согласно зависимости (6) приводит к срыву процесса самонаведения или к промаху БПЛА с ОЭСС.

Отметим, что все этапы сближения ЛА являются пригодными для организации методов индивидуальной ИК – защиты ПИО от БПЛА с ОЭСС [3, 11, 14]. Обзор современных видов и параметров индивидуальных средств ИК – защиты (СОЭП) ЛА приведен в работах [11, 15].

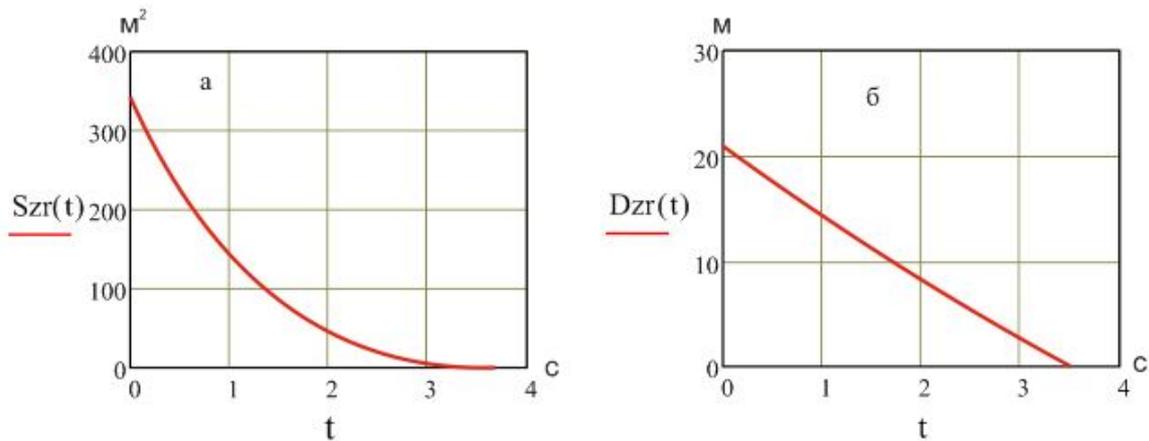


Рис. 3. Изменение площади $S_{zr}(t)$ и диаметра круга $D_{zr}(t)$ поля зрения ПОС ОЭСС БПЛА при заданном угле зрения $2 \cdot \omega_{зр}$ в полётное время

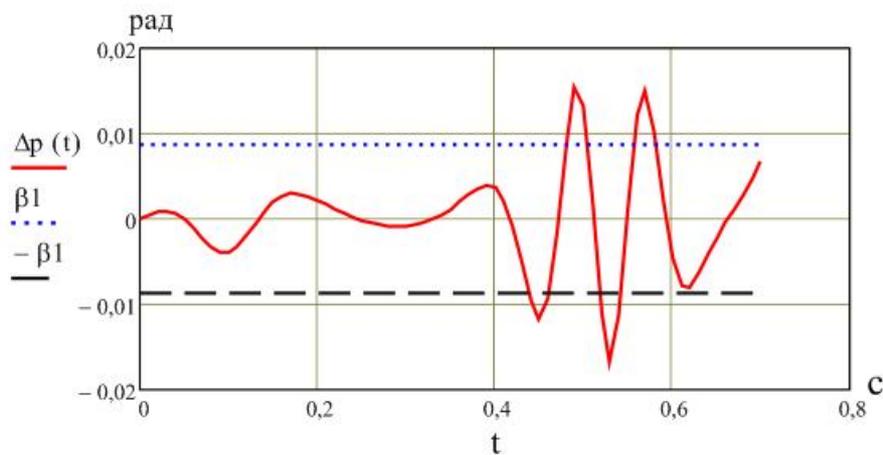


Рис. 4. Шум (ошибка) угла рассогласования при управлении СОЭП КПИ ТО поля ИТП в начале полёта БПЛА с ОЭСС:

$|\beta_1|$ – угловая апертура ограничения параметров управления БПЛА

Третий этап. Завершающий этап сближения ЛА – объектов по МПС. Этот этап наиболее ответственный и энергонапряженный (энтропия процесса максимальна) для всех звеньев ЗКУ, так как траектории сближения ЛА должны сходиться в мгновенной точке пространства, притом только одной [8]. Возможны два вероятностных случая:

- пространственная встреча БПЛА с ОЭСС с ЛА - целью, т. е. поражение цели;
- не встреча ЛА, т.е. промах, когда не выполняется задача БПЛА с ОЭСС в заданный промежуток времени.

При сближении БПЛА с ОЭСС с целью до расстояния $r_W(t) = 300 - 600$ м., ЗКУ ОЭСС работает на пределе динамической устойчивости с максимальным коэффициентом усиления и энергонапряженностью всех динамических звеньев управления, так как угол рассогласования обнуляется $\Delta(t) \rightarrow 0$ [3,5,8,9-14].

На этом этапе особенно важна стабильная работа инерционного звена ЗКУ ОЭСС автомата регулировки усиления (АРУ), который определяет нижний и верхний пределы изменения коэффициента усиления $K_S(t)$ ЗКУ, т. е. определяет его работоспособность и динамическую устойчивость [8,12,13].

Третий этап наиболее благоприятен для применения индивидуальной ИК – защиты ЛА по технологии ПСТО [5,15-18] пространственного управления КПИ, что эквивалентно вобуляции линии визирования цели в апертуре поля зрения ПОС ОЭСС, за счёт одновременного сопровождения двух и более нестационарных сигнатур ТО заданного спектрального состава поля ИТП СОЭП.

Действительно, динамические характеристики работоспособности и устойчивости ЗКУ ОЭСС наиболее полно определяются его ДХ, описываемой аналитической моделью первого или второго порядка [6,13]. Для описания математической модели управления КПИ под воздействием системы ТО поля ИТП,

приведём следующие выкладки и рассуждения.

Допустим, что на третьем этапе сближения ЛА по МПС, в угловой апертуре ПОС ОЭСС $2\omega_{зр}$, созданы ТО с сигнатурой $\bar{S}_{pi}(t)$ поля ИТП с заданными параметрами: АЧФ характеристикой; коэффициентом интенсивности спектрального излучения ТО $K_{\Pi i} > 1$. В поле зрения ПОС тепловые образы поля ИТП СОЭП синхронизированы по заданной пространственной угловой фазе $\theta(t)$, тогда можно записать уравнение, описывающее изменение коэффициента усиления $K_S(t)$ ЗКУ ОЭСС в полётное время БПЛА с ОЭСС в виде:

$$\begin{cases} K_{S0} \geq \frac{\omega_{\max}}{\beta}; \\ K_{Sp}(t) \leq \frac{\omega_{\max}}{\beta - k_{ЗКУ}(t) \cdot |\Delta_{\Pi}(t)|}, \end{cases} \quad (8)$$

где $K_{S0} = 1/T_c$; $K_{Sp}(t)$ – нижний и верхний предел изменения коэффициента усиления ЗКУ ОЭСС, обеспечивающий её работоспособность и динамическую устойчивость, соответственно: $K_{Sp}^{ДУ} \geq K_{Sp}(t) \geq K_{S0}$ [12];

$k_{ЗКУ}(k_{\Pi i}(t), \dots) > 1$ – коэффициент аддитивно - мультипликативного шума усилительного тракта ЗКУ, возникающего за счёт воздействия i -го ТО поля ИТП, который уменьшает (зашумляет) линейную часть ДХ ОЭСС [12,13]. Изменение коэффициента усиления ЗКУ ОЭСС в начале пространственной встречи ЛА по МПС, в поле модулированных ТО ИТП при нестационарной частоте модуляции, показано на рис. 5.

Представляет интерес исследование дискриминационной характеристики ЗКУ ОЭСС при сближении ЛА на предельное расстояние оптического разрешения сигнатур помех – модулированных ТО поля ИТП в 300 – 600 м, т. е. при детерминированном управлении пространственным положением КПИ

СОЭП [5,15-18]. При этом сигнатуры ТО находятся на краю поля зрения ПОС ОЭСС. Исследование дискриминационной характеристики ЗКУ ОЭСС при воздействии системы генераторов ТО поля ИТП проведём по зависимости вида [13]

$$U_p(t) = \begin{cases} K_{sp}(t, f_{\Pi}(t), \dots) \cdot \sin \left(\pi \cdot \frac{\sum \Delta_i^P(t)}{\beta} \right), & \text{если } \Delta_i^P(t) \leq \beta; \\ 0, & \text{если } \Delta_i^P(t) > \beta, \end{cases} \quad (9)$$

здесь $\Delta_i^P(t) = \Delta_o(t) + \Delta_{\Pi i}(t)$.

Результаты расчёта ДХ, в указанных условиях, представлены на рис. 6 и рис.7. Расчёт величины промаха БПЛА с ОЭСС, в условиях воздействия векторных сигнатур $\bar{S}_{pi}(t)$ тепловых внешних возмущений в виде ТО поля ИТП, проведен по следующему предлагаемому алгоритму:

$$\begin{aligned} \psi_p(t) &= \psi_o - \Delta^P(t) + \frac{1}{T_c} \cdot \int_0^t \Delta^P(t) \cdot dt; \\ \beta_p(t) &= \beta_o + f(k_W) \cdot (\psi_p(t) - \psi_o); \\ W_{np}(t) &= V_p \cdot \left(\frac{d}{dt} \beta_p(t) \right) \cdot \cos \beta_p(t) \cdot W(p); \\ n_p(t) &= \frac{W_{np}(t)}{g}; \\ V_{wp}(t) &= V_z(t) \cdot \cos \psi_p(t) - V_p \cdot \cos \beta_p(t); \\ \Delta h_p(t) &= 0,5 \cdot |\Delta \bar{f}_i| \cdot \left(1 - \frac{n_p(t) \cdot |\Delta \bar{f}_i| \cdot \sin \eta(t)}{(V_{wp}(t) \cdot 2 \cdot \omega_{зр})^2} \right), \end{aligned}$$

где индекс p обозначает кинематические параметры помех;

$W_{np}(t)$, $n_p(t)$ – реальное нормальное ускорение и коэффициент поперечной перегрузки БПЛА с ОЭСС на траектории встречи;

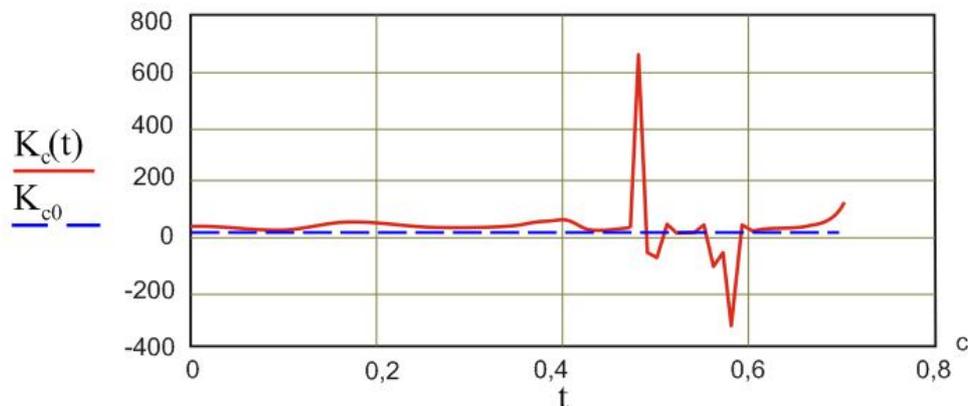


Рис. 5. Изменение коэффициентов усиления ЗКУ ОЭСС : $K_c(t)$ – в условиях воздействия ТО поля ИТП; K_{c0} – беспомеховые условия

$\Delta h_p(t)$ – расчетный промах БПЛА с ОЭСС в данный момент времени полёта;

$\eta(t)$ – угол между нормалью к вектору смещения сигнатуры ТО $\Delta \vec{l}$ в плоскости предметов и вектором скорости БПЛА с ОЭСС \vec{V}_p в данный момент време-

ни.

Результаты расчёта промаха $\Delta h_p(t)$ и коэффициента перегрузки $n_p(t)$ приведены на рис. 8 и рис. 9.

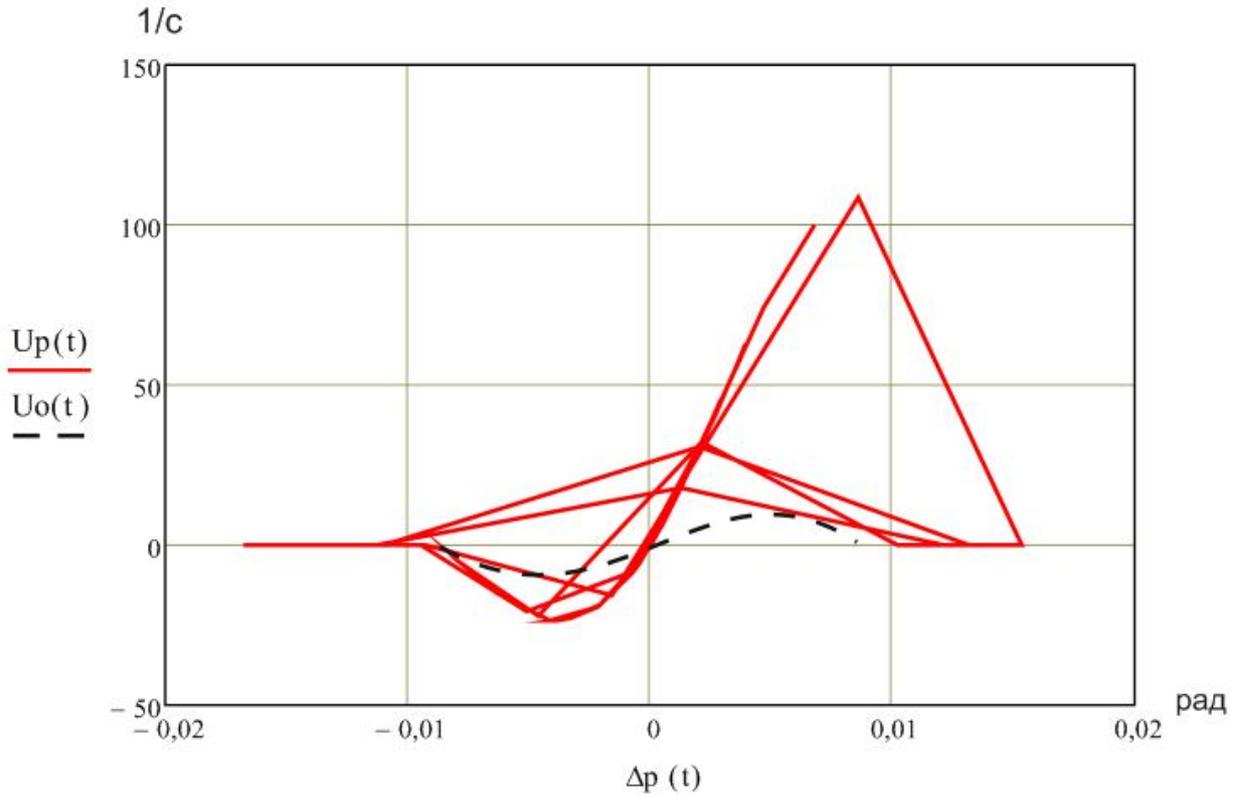


Рис. 6. Вид дискриминационной характеристики ЗКУ управления ОЭСС:

$U_p(t)$ – при вобуляции КПИ под воздействием ТО поля ИТП СОЭП; $U_0(t)$ – в беспомеховых условиях

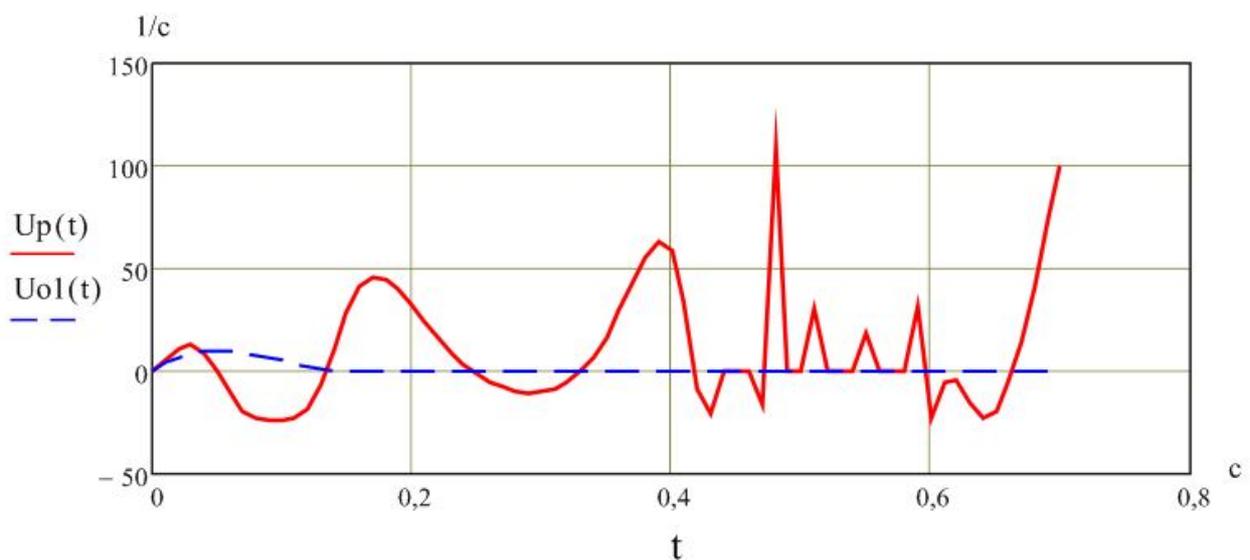


Рис. 7. Вид дискриминационной характеристики ЗКУ ОЭСС во время полёта БПЛА:

$U_p(t)$ – при вобуляции КПИ под воздействием ТО поля ИТП СОЭП; $U_{01}(t)$ – в беспомеховых условиях

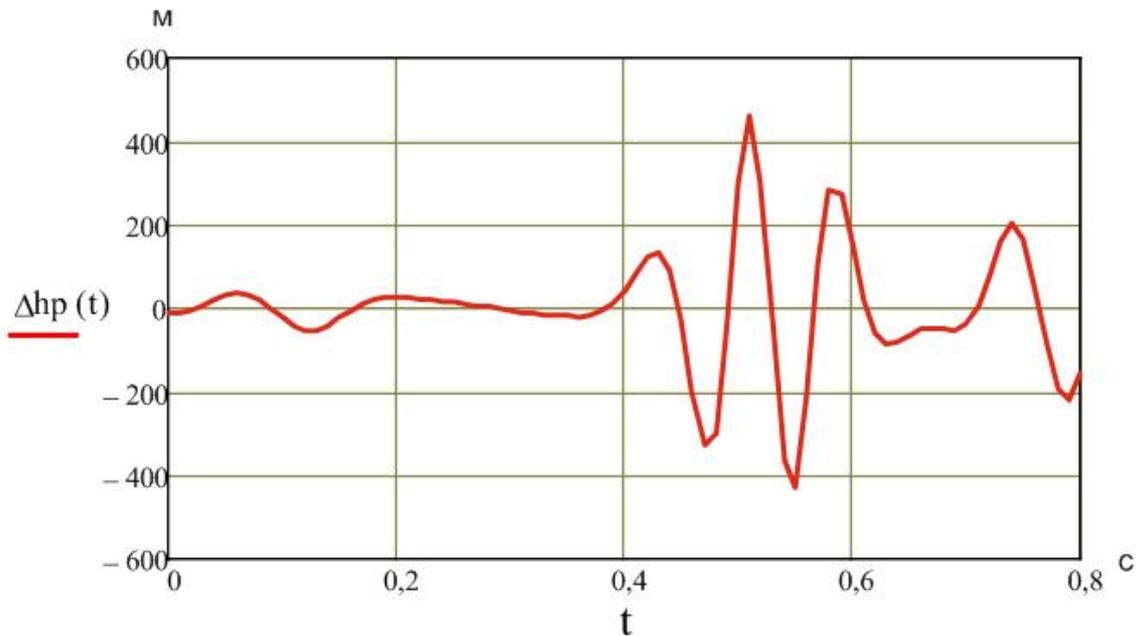


Рис. 8. Результаты расчета мгновенного промаха БПЛА с ОЭСС при детерминированном управлении пространственным положением КПИ СОЭП в начальный момент полёта

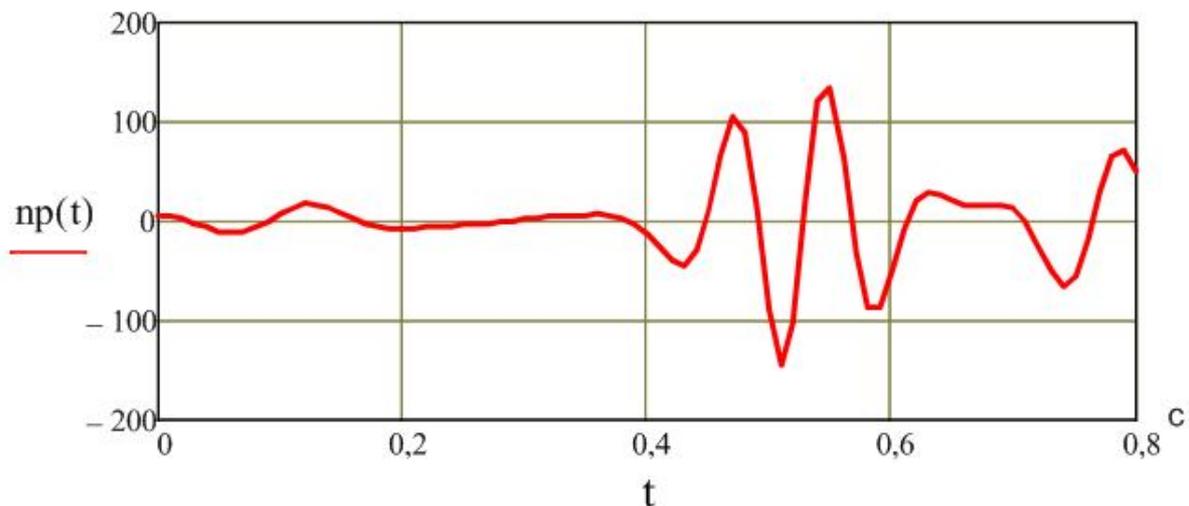


Рис. 9. Изменение коэффициента требуемой поперечной перегрузки при управлении полётом БПЛА с ОЭСС на траектории встречи – МПС, в условиях применения технологии ПСТО при управлении пространственным положением КПИ

Представляют интерес расчёты траектории сближения динамических объектов по МПС при воздействии сигналов помехи СОЭП, построенной по технологии ПСТО [5, 15-18] по разработанному выше алгоритму (1), (2), (9). Результаты расчётов представлены на рис.10. Из анализа рис.10 видно, что на 2,6 сек. полёта БПЛА с ОЭСС, при предельном оптическом разрешении ПОС ОЭСС сигнатур ТО помех на расстоянии около $|\bar{r}(t)_{\text{пр}}| \approx 600$ м от ЛА – цели, происходит резкий сход БПЛА с ОЭСС с

кинематической траектории сближения и срыв процессов слежения и самонаведения (пунктирная линия). ПОС ОЭСС теряет цель, что приводит к ожидаемому детерминированному промаху БПЛА с ОЭСС без возможности повторного «захвата» цели в сопровождение [5, 8, 16].

В момент срыва процесса самонаведения, примерно на 2,6 сек. полета, перегрузка БПЛА с ОЭСС составляет более $n_p = 250$ (оценки проведены по алгоритму (9)), что может привести к его разрушению.

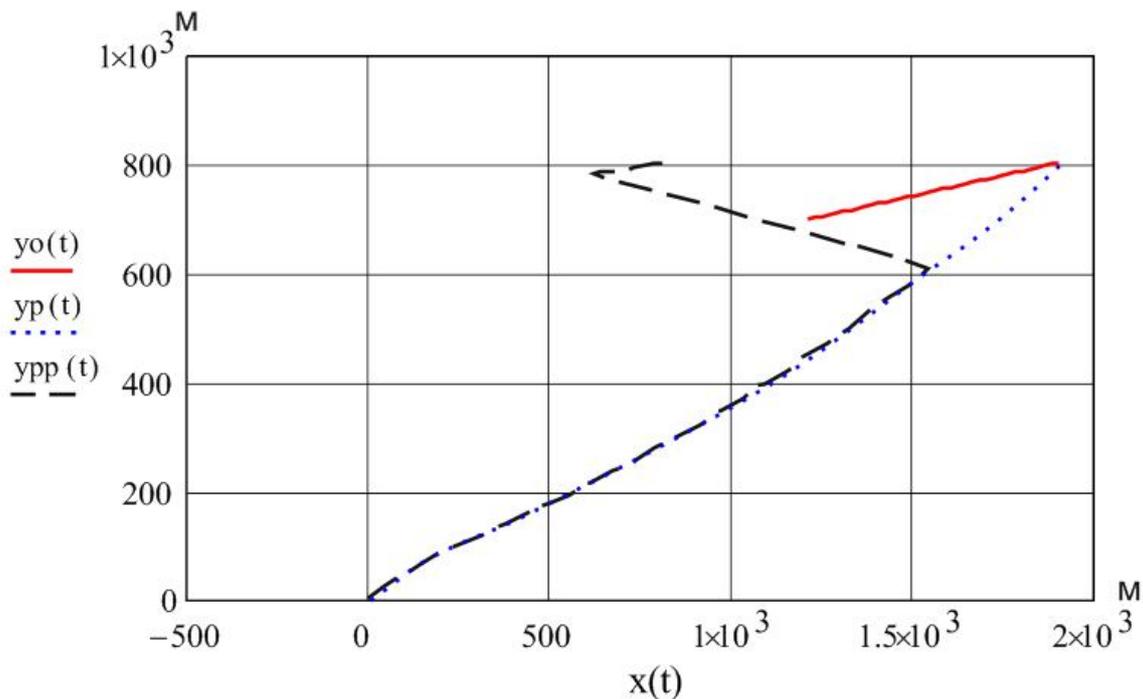


Рис. 10. Траектории сближения динамических объектов по МПС при воздействии сигналов помехи СОЭП, построенной по технологии ПСТО:

$y_0(t)$ - траектория ЛА (ПИО) при взлёте; $y_p(t)$ – траектория БПЛА с ОЭСС (объект управления);

$y_{pp}(t)$ – сход БПЛА с кинематической траектории сближения

3. Обсуждение полученных результатов исследований

На основании проведенных расчетов кинематических параметров пространственной встречи ЛА по разработанному алгоритму (1-3) и (4-9) (см. рис. 1-10) получены исходные данные для проведения синтеза СОЭП и оценки связи переходных динамических процессов в ЗКУ ОЭСС с параметрами кинематики траектории сближения БПЛА с ОЭСС – ЛА цели по МПС.

Из анализа результатов расчётов приведенных на рис. 4-10 следует, что применение технологии управления пространственным положением КПИ за счёт одновременного сопровождения тепловых модулированных сигнатур i -го ($i = 1, 2, 3, \dots$) ТО поля ИТП и ПИО, приводит к значительным искажениям динамических параметров ЗКУ слежения и самонаведения ОЭСС пассивного типа.

На рис.4 видно, что уже на 0,5 с., полёта БПЛА с ОЭСС её приёмная оптическая система теряет цель из-за выхода угла рассогласования, измеряемого координатором, за пределы параметров апертуры управления $|\beta|$ ЗКУ. В реальных условиях это означает срыв процесса самонаведения.

На рис.5, момент срыва процесса самонаведения, изображён в виде резкого изменения коэффициента усиления ЗКУ, скачком, до значения $K_{st}(t)$

большим 630, что в 63 раза больше нижнего значения. При этом система АРУ ЗКУ ограничивает сигнал управления сверху, что приводит к перегрузке (запиранию) усилительного тракта и, как следствие, к зашумлению линейной части ДХ. Этот факт подтверждён сравнением ДХ в указанных условиях сближения ЛА (см. рис.6 и рис. 7). В данных условиях управление ОЭСС а, следовательно, и траекторией полёта объекта управления – БПЛА невозможно [5].

На рис. 7 представлены сравнения ДХ ЗКУ по времени. Здесь видно, что в беспомеховых условиях ОЭСС сопровождает ЛА – цель точно с 0,4 сек. полёта (т. е. переходной процесс составил 0,4 с). В условиях управления пространственным положением КПИ СОЭП, уже на 0,2 сек., наблюдается скачок до $K_{st}(t) = 47$, что в 4,7 раза выше нижнего предела, что приводит к перегрузке системы АРУ, насыщению предварительного усилителя ПЛЭ. Это вызывает срыв процесса «захвата» тепловой сигнатуры излучающего объекта в сопровождение, за счёт срыва работы системы арретирования ОЭСС под воздействием генерации полей ТО СОЭП [8], что подтверждено экспериментами [5].

На рис. 8 приведены результаты расчётов промаха БПЛА с ОЭСС при облучении ПОС ТО поля ИТП на третьем завершающем этапе полёта. На рис. 8 видно, что величина динамического мгновенного промаха на 0,5 сек., полёта БПЛА с ОЭСС находится

за критическими значениями. Это значит, что срыв процесса самонаведения ОЭСС произошёл намного раньше, в начале автономного полёта, т. е. в промежутке времени $0 - 0,5$ с., с момента выхода БПЛА с ОЭСС из пусковой установки, когда коэффициент усиления ЗКУ имел критическое изменение (см. рис.7). Возникающие предельные поперечные перегрузки при управлении БПЛА с ОЭСС в этот промежуток времени, представленные на рис.9, убедительно это подтверждают: на 0.5 секунде полёта поперечная перегрузка составляет более 140, что может привести к разрушению БПЛА как объекта управления. Этот момент подтверждён расчётами кинематической траектории сближения БПЛА с ОЭСС по МПС при воздействии сигналов помехи СОЭП построенной по технологии ПСТО, см. рис.10. При сближении БПЛА с ОЭСС на расстояние около 600м. до ЛА-цели происходит резкое изменение траектории с поперечной перегрузкой более 250 единиц, расчёты проведены по алгоритму (9).

4. Рекомендации

Представленные результаты исследований в данной работе и в работах [5,15-18] являются теоретическим обоснованием технологии детерминированного управления пространственным положением КПИ – ПСТО, на базе специальной организации процесса одновременного сопровождения ПОС ОЭСС системы излучающих источников (ТО поля ИТП) заданного спектрального состава, переменной мощности лучистого потока и постоянной тепловой сигнатуре ПИО. Основной отличительной особенностью технологии ПСТО является то, что она позволяет управлять пространственным положением КПИ на принципах вобуляции линии визирования цели ($\vec{r}_w(t)$) в угловой апертуре ПОС современных типов пассивных ОЭСС, в отличие от применяемых в настоящее время «заградительных» типов СОЭП [3,11,14]. «Заградительные» технологии воздействуют на второй элемент управления – электронный тракт, а это требует обязательного знания тактико-технических параметров подавляемых типов БПЛА с ОЭСС. Возможно применение технологии ПСТО и в других диапазонах электромагнитного излучения, а также для противодействия БПЛА с активными ОЭСС. Технология ПСТО обладает всеми признаками универсальности, так как не требует знания тактико-технических характеристик звеньев управления ОЭСС [5,15-18], в этом случае необходимо знать лишь входные и выходные параметры ЗКУ, которые легко определяются из математической модели применяемого метода сближения динамических объектов.

Заключение

Представленные в работе математические модели управления пространственным положением КПИ на базе предложенной гипотезы о том, что динамическая сигнатура теплового сигнала является векторным "силовым" фактором управления приёмной системой пространственного наблюдателя (ОЭСС) [5], получили теоретическое подтверждение. Теоретически обоснована и подтверждена технология – ПСТО детерминированного управления пространственным положением (вобуляции) КПИ различным типам ОЭСС [5,15-18]. Проведенное исследование полученных математических моделей взаимного влияния между кинематическими параметрами траектории сближения БПЛА с ОЭСС с ЛА – целью по МПС и сигналов управления электронным блоком ОЭСС при воздействии поля помех по технологии ПСТО, приводят к следующим выводам:

1. Представленные в работе математические модели, на стадии проектирования ОЭСС пассивного типа, позволяют:

- исследовать переходные динамические процессы в ЗКУ сложными системами с пересекающимися связями;

- определять границы устойчивой работы динамических звеньев ЗКУ ОЭСС;

- проводить исследования различных методов помехозащищённости пассивных ОЭСС;

- исследовать методы управления положением КПИ, например ИК – и УФ – диапазона;

2. Показано, что $K_{\Pi i} = \frac{I_{\Pi i}^{\max}}{I_0}$ – коэффициент интенсивности помехового излучения i – го ТО поля ИТП может рассматриваться как параметр качества при синтезе СОЭП – ПСТО;

3. Разработанные модели управления ОЭСС в поле ИТП, создаваемых СОЭП по технологии ПСТО, позволяют на базе подтверждённой гипотезы "силового" управления пространственным положением (вобуляции) КПИ [5]:

- исследовать альтернативные методы постановки активных (квазипассивных) помех ИК – и УФ – диапазона систем слежения и самонаведения;

- могут быть использованы при синтезе СОЭП, как индивидуальных средств ИК – защиты теплоизлучающих объектов от высокоточного оружия, в том числе и ЛА различного гражданского коммерческого назначения.

Литература

1. *Авиационные системы информации оптического диапазона [Текст]: справ. / под ред. Л.З. Криксунова. – М.: Машиностроение, 1985. – 264 с.*
2. *Системы управления и динамика полёта ракет [Текст] / под ред. В.С. Пугачёва. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1965. – 416 с.*
3. *Федосов, Е.А. Системы управления конечным положением в условиях противодействия среды [Текст] / Е.А. Федосов, В.В. Инсаров, О.С. Селивохин. – М.: Наука, 1989. – 272 с.*
4. *Казак, В.М. Системи і методи відновлення живучості літальних апаратів у польоті [Текст] / В.М. Казак. – К.: НАУ, 2010. – 210 с.*
5. *Кулалаев, В.В. Сигнатура тепловых сигналов объекта в пространственном информационном поле, как «силовой» фактор управления оптико-электронными следящими системами [Текст] / В.В. Кулалаев, А.В. Кулалаев // Авиационно – космическая техника и технология. – 2011. – № 9(86). – С. 168–176.*
6. *Nicholson, A. F. Error signals and discrimination in optical trackers that see several sources [Text] / A. F. Nicholson // Proc. IEEE. – 1965. – Vol. 53, № 1. – P. 56–71.*
7. *Гриневич, В.Н. О влиянии метода модуляции на возможность разрешения двух источников в следящем оптико- электронном приборе [Текст] / В.Н. Гриневич //Изв. вузов СССР. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 1974. – № 5. – С. 133–141.*
8. *Акулов, И.Е. Техническая подготовка командира взвода ПЗРК 9К38 «Игла» [Текст] : учеб. пособие / И.Е. Акулов, В.И. Байдаков, А.Г. Васильев. – Томск: Изд-во Томский политехнический университет, 2011. – 192 с.*
9. *Криксунов, Л.З. Инфракрасные системы [Текст] / Л.З. Криксунов, И.Ф. Усольцев; под общ. ред. д.т.н. Л.З. Криксунова. – М.: Изд-во. Сов. Радио, 1968. – 320 с.*
10. *Лазарев, Л.П. Инфракрасные и световые приборы самонаведения и наведения летательных аппаратов [Текст] / Л.П. Лазарев. – М.: Машиностроение, 1976. – 568 с.*
11. *Якушенков, Ю.Г. Методы борьбы с помехами в оптико – электронных приборах [Текст] / Ю.Г. Якушенков, В.Н. Луканцев, М.П. Колосов. – М.: Радио и связь, 1981. – 180 с.*
12. *Барский, А.Г. Оптико-электронные следящие системы [Текст]: учеб. пособие / А.Г. Барский. – М.: Университетская книга Логос, 2009. – 200 с.*
13. *Астапов, Ю.М. Теория оптико-электронных следящих систем [Текст] / Ю.М. Астапов, Д.В. Васильев, Ю.И. Заложнев. – М.: Наука, 1988. – 328 с.*
14. *Перунов, Ю.М. Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием [Текст] / Ю.М. Перунов, К.И. Фомичёв, Л.М. Юдин; под ред. Ю. М. Перунова. – М.: Радиотехника, 2003. – 416 с.*
15. *Кулалаев, В.В. Состояние и перспективы разработок систем защиты самолетов гражданской авиации от террористических пусков ракет с тепловыми головками самонаведения [Текст] / В.В. Кулалаев, П.О. Науменко, А.В. Кулалаев // Авіаційно-космічна техніка і технологія. –2003.– № 40(5). – С. 13–18.*
16. *Технология пространственного смещения теплового образа (технология «ПСТО»). Пассивная ИК - защита самолетов и вертолетов гражданской авиации – система «КАРАВАН» [Текст] / В.В. Кулалаев, А.В. Кулалаев, С.С. Чемезов, М.Г. Салахеев, П.Н. Устименко // Авиакосмическое приборостроение. – 2008.– №3. – С. 35 – 41.*
17. *Пат. №2295743 Российская Федерация, МПК G2B26/04, G02F1/29. Способ оптической модуляции лучистого потока / Кулалаев В.В.(UA), Кулалаев А.В. (UA), Устименко П.Н. (RU); Заявитель и патентообладатель Кулалаев В.В., Кулалаев В.А., Устименко П.Н. – № 2005108923/28; заявл. 29.03.05; опубл. 10.09.06.*
18. *Пат. №2291374 Российская Федерация, МПК F41H11/0. Способ пространственного смещения теплового образа и устройство для его реализации / Кулалаев В.В.(UA), Кулалаев А.В. (UA); Заявитель и патентообладатель Кулалаев В.В., Кулалаев А.В. – № 2005119393/28; заявл. 22.06.05; опубл. 10.01.07.*

Поступила в редакцию 15.02.2013, рассмотрена на редколлегии 13.03.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. Производства радиоэлектронных систем ЛА В.М. Илюшко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

УПРАВЛІННЯ ПРОСТОРОВИМ ПОЛОЖЕННЯМ КАНАЛУ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ ПРИ САМОНАВЕДЕННІ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ НА ДИНАМІЧНИЙ ВИПРОМІНЮЮЧИЙ ОБ'ЄКТ

А.В. Кулалаєв

На підставі системного феноменологічного підходу проведено дослідження параметрів управління просторовим положенням каналом передачі інформації (КПІ) та зв'язку оптико – електронних систем стеження (ОЕСС) при самонаведенні безпілотного літального апарату (БПЛА) на динамічний випромінюючий об'єкт в полі зовнішніх, збурюючих штучних теплових перешкод (ШТП). Складено математичні моделі та отримано аналітичні залежності для дослідження параметрів просторового управління КПІ при зближенні двох динамічних об'єктів: БПЛА та випромінювального літального апарату (ЛА) за методом пропорційного зближення

(МПЗ). Результати роботи можуть бути використані при дослідженнях методів перешкодозахищеності і динамічної стійкості контурів управління ОЕСС, а також при синтезі систем оптико – електронної протидії (СОЕП) ОЕСС різного оптичного діапазону на БПЛА, наприклад, для забезпечення безпеки польотів цивільної та комерційної авіації.

Ключові слова: інформаційне поле, тепловий образ, поле штучних теплових перешкод, вектор, електромагнітні випромінювання, управління, протидія, корекція, оптико-електронна система стеження.

CONTROL ON SPATIAL LOCATION OF INFORMATION TRANSFER CHANNEL WHILE UAV GUIDING ONTO DYNAMIC EMITTING OBJECT

A. V. Kulalayev

Based on systematic phenomenological approach it was conducted the research of parameters of control on spatial location of information transfer channel (ITC) and connection between optic-electronic tracking and homing systems (OTHS) while unmanned aerial vehicle (UAV) guidance onto dynamic emitting object within the field of external disturbing artificial thermal interferences (ATI). The mathematical models were compiled and analytic dependences were obtained for the research of parameters of spatial control on ITC while approaching of two dynamic objects: UAV and emitting aircraft based on the method of proportional approaching (MPA). The results of works can be used during the research of noise-immunity method and method of dynamic stability of OTHS control loop as well as during synthesis of the optic-electronic countermeasure systems (OECS) to OTHS of various optical range onboard UAV, for example, for ensuring safety of civil and commercial aviation.

Key words: information field, thermal image, artificial thermal interferences field, vector, electromagnetic radiations, control, countermeasure, correction, optic-electronic tracking and homing system.

Кулалаев Андрей Викторович – аспирант каф. автоматизации и энергоменеджмента, Национальный авиационный университет, Киев, e-mail: kulalayev@yahoo.com