

УДК 621.396.7

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ НА ЛИНИЮ ВВЕРХ КАНАЛА УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА*

Б.М. Антипин, Е.М. Виноградов, Е.И. Туманова

*Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича*

Рассматривается метод оценки влияния непреднамеренных помех, создаваемых стационарными наземными радиоэлектронными средствами, содержащими радиопередающие устройства, на прием сигналов, передаваемых по линии вверх канала радиопередачи беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Полезный сигнал, поступающий с пульта управления в радиоприемник БПЛА, является сигналом с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Мешающие сигналы имеют непрерывную несущую частоту. Предполагается, что траектория движения БПЛА известна, выбраны точки траектории, в которых осуществляется анализ влияния помех на прием полезного сигнала по линии вверх канала радиопередачи БПЛА, и определена область на поверхности земли, в которой находятся передатчики, источники возможных помех. Известны координаты этих передатчиков, параметры их излучений и пространственное расположение диаграмм направленности их антенн. Поскольку мощность мешающих сигналов, поступающих в приемник БПЛА, зависит от того, как взаимодействуют диаграммы направленности антенны приемника БПЛА и мешающего передатчика (боковыми или главными лепестками диаграмм направленности), предложен способ определения этого взаимодействия. Для оценки качества принимаемого полезного сигнала в условиях действия непреднамеренных помех применяется защитное отношение. Метод реализован в виде процедуры, результаты которой могут быть использованы при планировании полетов гражданских БПЛА.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, канал радиопередачи, линия вверх, псевдослучайная перестройка рабочей частоты, непреднамеренные помехи, защитное отношение.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-4-18-33

Введение

Развитие техники приводит к тому, что человека все больше заменяют технические устройства, управляемые дистанционно с помощью специализированных программных средств. К числу таких устройств относятся беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Современные БПЛА приобретают все большую значимость в решении многих народнохозяйственных задач [1–5]. Гражданские БПЛА решают, например, такие задачи, как доставка товара, наблюдение подстилающей поверхности, аэрофотосъемка выбранных участков местности, видеосъемка, проведение воздушного наблюдения за состоянием удаленных и труднодоступных объектов (нефте- и газопроводов, линий электропередач и пр.), геолокация, охрана. При решении этих задач БПЛА могут испытывать непреднамеренные помехи со стороны других радиоэлектронных средств (РЭС). Однако вопросам, связанным с анализом качества работы гражданских БПЛА в условиях непреднамеренных помех со стороны других гражданских РЭС, почти не уделяется внимания. Данная работа направлена на то, чтобы несколько заполнить этот пробел.

Исследование выполнено в рамках выполнения прикладных научных исследований по государственному заданию СПбГУТ на 2023 год, регистрационный номер 123060900012-6 в ЕГИСУ НИОКТР.

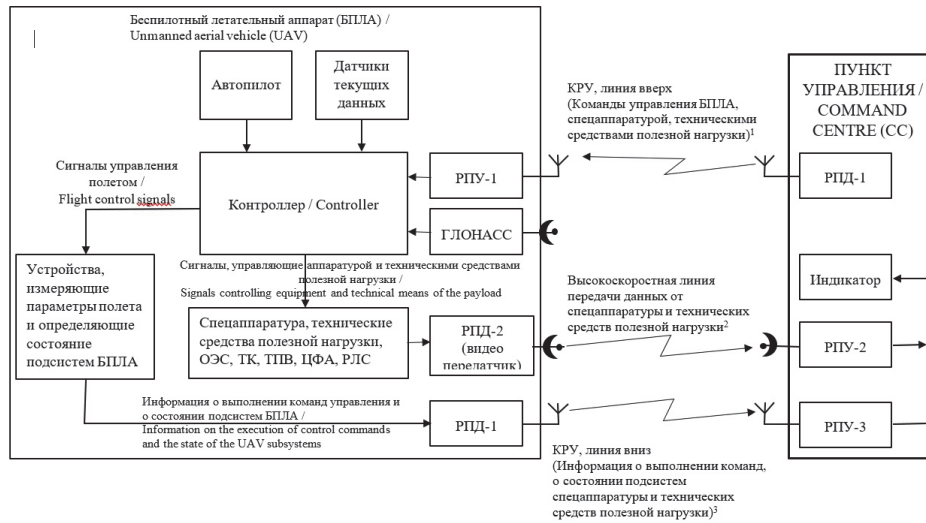


Рис. 1 – Упрощенная структура рассматриваемого БПЛА, пункта управления и каналов связи между ними:

КРУ – канал радиуправления / radio control channel (RCC); ОЭС – оптико-электронные средства / optical-electronic means; ТК – телевизионная камера / television camera; ТПВ – тепловизионная камера / thermal imaging camera; ЦФА – цифровой фотоаппарат / digital camera

Fig. 1 – Simplified structure of the overview of the UAV, command centre and communication channels between them:

RCC, up line (UAV control commands, special equipment, payload technical means); High-speed data transmission line from special equipment and payload technical equipment; RCC, line down (Information on the execution of commands, on the status of special equipment subsystems and payload hardware)

Управление работой БПЛА происходит с пункта управления (ПУ). Упрощенная структурная схема БПЛА – ПУ представлена на рис. 1. В состав БПЛА и ПУ входят радиоприемные устройства (РПУ) и радиопередатчики (РПД). В частности, на борту БПЛА находится радиоприемное устройство, обозначенное на рис. 1 как РПУ-1, которое является составной частью канала радиуправления (КРУ) (линия «вверх»), по которому на борт БПЛА поступают команды управления полетом, а также команды управления работой специальной аппаратуры и средствами полезной нагрузки. В структуру БПЛА входят два передатчика (РПД-1 и РПД-2), один из которых является составной частью высокоскоростной линии передачи данных, полученных со специализированных приборов и средств полезной нагрузки на ПУ, а другой входит в состав линии «вниз» канала радиуправления. Информация, передаваемая на ПУ по линии «вниз», содержит сведения о результатах выполнения команд, переданных с ПУ, сведения о состоянии подсистем специальной аппаратуры и технических средств полезной нагрузки.

Поскольку БПЛА в канале радиуправления (линия вверх) содержит радиоприемное устройство с антенной, то наземные передатчики, работающие на частотах близких к частоте этого РПУ или на частотах, совпадающих с рабочей частотой этого РПУ, могут создавать помехи, искажающие информацию, передаваемую на БПЛА по каналу радиуправления. Это может привести к неправильной работе как системы управления полетом БПЛА, так и специальной аппаратуры, установленной на его борту. Для оценки степени влияния непреднамеренных помех на работу канала управления БПЛА будет использовано защитное отношение. Подобная ситуация требует своего более подробного рассмотрения и анализа.

1. Принятые допущения и обозначения

В качестве источников потенциально опасных излучений для приемника, находящегося на борту БПЛА, рассматриваются только наземные стационарные РЭС, которые располагаются на ограниченной территории и рабочие частоты которых находятся в ограниченной полосе частот. Нелинейные явления в РПУ не рассматриваются. Отбор передатчиков РЭС с потенциально опасными излучениями осуществляется по частоте и расстоянию.

Отбор передатчиков по расстоянию проводится в каждой выбранной точке траектории движения БПЛА, для которой осуществляется анализ. Размеры территории на поверхности земли, которая располагается под этой точкой, задает аналитик, выполняющий анализ. В качестве ориентира для определения границ территории может использоваться расстояние от БПЛА до радиогоризонта или, если известна максимальная ожидаемая мощность наземных стационарных передатчиков вдоль трассы полета БПЛА, расстояние до передатчика, при котором в свободном пространстве передатчик создаст на входе приемника БПЛА уровень сигнала, равный его чувствительности.

Из передатчиков, находящихся на выбранной территории, в качестве потенциально опасных для приема сигнала ППРЧ выберем передатчики, рабочие частоты которых лежат в полосе, занимаемой сигналом ППРЧ, и которые располагаются в пределах не более двух каналов от частот, составляющих сигнал ППРЧ. Излучения передатчиков на этих частотах подлежат исследованию на предмет создания недопустимого уровня помех в структуре ПУ – БПЛА.

Индексы параметров и переменных, используемые в расчетах, указывают, к какому устройству или объекту относится данный параметр или переменная, а именно:

T – параметр или переменная относится к передатчику;

R – параметр или переменная относится к приемнику;

$ЛА$ – параметр или переменная относится к беспилотному летательному аппарату;

$ПУ$ – параметр или переменная относится к пункту управления;

$РЭС$ – параметр или переменная относится к радиоэлектронному средству.

Значение других индексов в расчетных формулах поясняется по мере их появления.

Местоположение рассматриваемых радиосредств описывается в декартовой системе координат (x, y, h) с $ПУ$ в начале координат $(0, 0, h_{ПУ})$. Координата h соответствует высоте антенны, используемой рассматриваемым прибором или объектом.

Параметры диаграмм направленности антенн представлены в сферической системе координат.

2. Процедура вычислений

На первом шаге выбирают размеры области, в которой будут отобраны наземные стационарные РЭС, излучения которых могут снижать качество сигналов в канале управления БПЛА. Далее на намеченной траектории движения БПЛА выбирают точки, в которых будет выполнена оценка влияния излучений наземных стационарных РЭС на прием полезного сигнала приемником БПЛА (приемник РПУ-1 на рис. 1). Максимальный шаг между точками не превышает размера выбранной области вдоль траектории движения БПЛА.

Частотный отбор учитывает специфику сигнала, который используется в линии вверх КРУ. Обычно это сигнал с псевдослучайной перестройкой рабочей

частоты (сигнал ППРЧ). Обозначим B_S ширину полосы полезного сигнала, поступающего на вход приемника БПЛА,

$$B_S = f_{\max} - f_{\min},$$

где f_{\max} и f_{\min} – граничные частоты B_S . Если эту полосу занимают M каналов сигнала ППРЧ, то ширина полосы B_R , занимаемая одним каналом (с учетом защитных интервалов), составляет

$$B_R = B_S / M$$

с центральными частотами, по которым происходит перестройка:

$$f_j = f_{\min} + (j+1/2)B_R, \quad j = 0, 1, 2, \dots, (M-1).$$

В процессе частотного отбора определяем передатчики стационарных наземных РЭС, частоты которых f_i отличаются от f_j не более чем на $2,5 B_R$:

$$\Delta f_{ij} = |f_i - f_j| \leq 2,5 B_R, \quad (1)$$

Выражение (1) позволяет сформировать множество сигналов РЭС с частотами f_i и элементов полезного сигнала с частотами f_j , для качественного приема которых сигналы РЭС представляют потенциальную опасность. Отобранные частоты f_i подлежат дальнейшему анализу на предмет их действительного влияния на прием выделенных элементов и полезного сигнала в целом. Ниже рассмотрим анализ для одной частоты f_i , поскольку для других f_i он проходит аналогично.

В качестве критерия, определяющего степень опасности помехи, используется защитное отношение, представляющее минимальное отношение сигнал/помеха на входе приемника $(S/I)_{\text{защ}}$, дБ, при котором еще обеспечивается требуемое качество приема полезного сигнала.

При использовании защитного отношения необходимо вычислить мощности сигнала и помехи, приведенные ко входу приемника БПЛА в исследуемой ситуации. Для передатчика РЭС, работающего на частоте f_i , эквивалентная мощность мешающего сигнала $I(f_{0R})$, дБм, приведенная ко входу приемника на частоте его настройки f_{0R} в полосе пропускания приемника при условии, что разность частот передатчика РЭС f_i и элемента ППРЧ сигнала, имеющего частоту f_i , удовлетворяет неравенству (1), составляет

$$I(f_{0R}) = P_T(f_i) + G_{TR}(f_i) + G_{RT}(f_i) - L(f_i) - \gamma - CF(\Delta f_{ij}), \quad (2)$$

здесь $P_T(f_i)$ – мощность передатчика РЭС на частоте f_i , дБм; $G_{TR}(f_i)$, $G_{RT}(f_i)$ – коэффициенты усиления антенн на частоте f_i соответственно, антенны передатчика в направлении на приемник и антенны приемника в направлении на передатчик, дБи; $L(f_i)$ – потери в пространстве распространения на частоте f_i , дБ; γ – потери из-за несовпадения поляризаций приходящей электромагнитной волны и приемной антенны, дБ; $CF(\Delta f_{ij})$ – коэффициент частотной коррекции, учитывающий ослабление помехи из-за ее отстройки от частоты полезного сигнала (1) и возможное превышение ширины спектра помехи ширины полосы пропускания приемника, дБ.

Если помеху данному элементу сигнала создают излучения нескольких передатчиков, то мощность суммарной помехи получают суммированием приведенных ко входу приемника мощностей одиночных передатчиков.

Для полезного сигнала, учитывая, что в этом случае можно положить $\gamma = 0$, $CF(\Delta f_{ij}) = 0$, а коэффициенты усиления антенн передатчика и приемника имеют максимальное значение, соответственно G_{0T} и G_{0R} , уравнение (2) приобретает вид

$$S(f_{0R}) = P_T(f_{0R}) + G_{0T} + G_{0R} - L(f_{0R}), \quad (3)$$

где f_{0R} – центральная частота полезного сигнала, принимаемого приемником.

В уравнениях (2) и (3) напрямую не указаны омические потери в антенно-фидерных трактах (АФТ) и потери рассогласования сопротивления антенн и их нагрузок. Предполагаем, что они включены в коэффициенты усиления антенн.

Остановимся на вычислении мощности помехи с использованием выражения (2). Мощность мешающего передатчика на его рабочей частоте определена в исходных данных задачи. Важным моментом анализа является определение коэффициентов усиления антенн в требуемых направлениях: усиления антенны передатчика рассматриваемого РЭС в направлении на БПЛА и усиления антенны приемника БПЛА в направлении рассматриваемого РЭС.

Диаграмма направленности антенны (ДНА) разбивается на две области: область главного лепестка (ГЛ) и область боковых лепестков (БЛ), куда включена и задняя полусфера. В угловом выражении область ГЛ определена шириной ДНА по уровню –3дБ. Учитывая относительно узкую полосу частот, в которой рассматриваются потенциально опасные передатчики, определенную выражением (1), коэффициент усиления антенны РПУ БПЛА в этой области принимаем равным максимальному значению усиления G_{0R} , указанному в спецификации антенны, с учетом принятых омических потерь в АФТ и на рассогласование. То же относится к антеннам передатчиков наземных РЭС. В области ГЛ их коэффициенты усиления определены значениями, приведенными в спецификациях на соответствующие антенны. Остальная область ДНА – это область БЛ. Здесь коэффициент усиления принимается равным среднему значению в этой области m_G плюс его среднеквадратическое отклонение σ_G . Значения m_G и σ_G представлены в табл. 1 [6, 7]. Переходной областью от ГЛ к БЛ в этой модели ДНА пренебрегаем.

Таблица 1 / Table 1

Статистические параметры антенн в области бокового усиления
Statistical parameters of antennas in the lateral gain region

Коэффициент усиления антенны / Antenna gain factor	Частота / Frequency	Поляризация / Polarization	m_G , дБи	σ_G , дБ
$G_0 > 25$ дБи	Рабочая / Operating frequency	Любая / Any	–10	14
	Побочная / Side emission			
$10 < G_0 \leq 25$ дБи	Рабочая / Operating frequency	Рабочая / п	–10	11
		Ортогональная / Orthogonal	–20	13
	Побочная / Side emission	Любая / Any polarization	–10	10
$G_0 \leq 10$ дБи	Рабочая / Operating frequency	Рабочая / Worker	0	6
		Ортогональная / Orthogonal	–13	8
	Побочная / Side emission	Любая / Any	–3	6

Уравнение (2) показывает, что мощность помехи на входе приемника зависит от областей взаимодействия диаграмм направленности приемной и передающей антенн. Поэтому важным этапом при оценке мощности является определение областей взаимодействия этих ДНА.

На рис. 2 представлен один из вариантов взаимного расположения ПУ, БПЛА и РЭС, возможного источника помехи в линии вверх КРУ. Если отобрано несколько РЭС, оценка областей взаимодействия ДНА БПЛА и РЭС проводится для каждого РЭС отдельно.

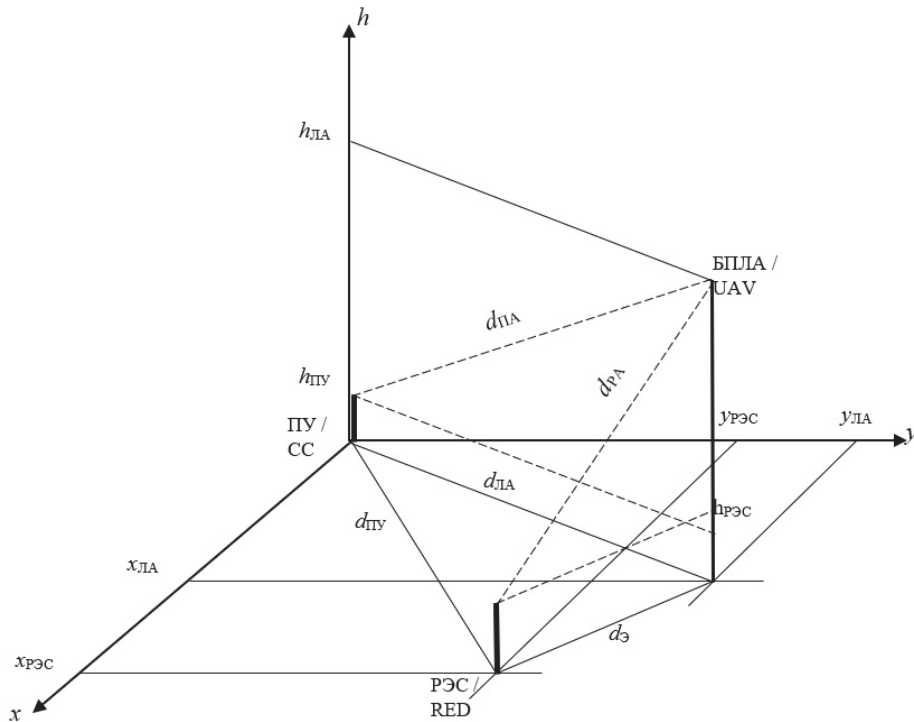


Рис. 2 – Вариант расположения ПУ БПЛА, РЭС и координаты их антенн

Fig. 2 – Option for the location of the UAV Control Center, RED and coordinates of their antennas

Исходные данные, описывающие антенну и ее ДНА и используемые для определения областей взаимодействия диаграмм направленности антенн РЭС и БПЛА, включают:

- азимутальное направление ГЛ ДНА, $\varphi: 0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$;
- угломестное направление ГЛ ДНА, $\theta: -90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$;
- ширину ГЛ ДНА в горизонтальной плоскости α ;
- ширину ГЛ ДНА в вертикальной плоскости β ;
- координаты местоположения антенн (x, y, h) .

Угол φ отсчитывается от оси x , а θ – от плоскости xOy .

Расстояние $d_{\mathcal{E}}$ между РЭС и БПЛА на плоскости xOy :

$$d_{\mathcal{E}} = \sqrt{(x_{\text{ЛА}} - x_{\text{РЕС}})^2 + (y_{\text{ЛА}} - y_{\text{РЕС}})^2}.$$

Определение областей взаимодействия ДНА РЭС и БПЛА

Главный лепесток ДНА передатчика или приемника направлен на интересующий объект, если линия, соединяющая антенну с объектом, лежит в пределах главного лепестка диаграмм направленности антенны как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости. Если эта линия находится за пределами ГЛ хотя бы одной из указанных диаграмм, то ДНА направлена на объект боковым лепестком. Угол, под которым в вертикальной плоскости из точки расположения РЭС виден БПЛА, определяет выражение (рис. 3):

$$\Delta_{РЭС} = \left[\arctg \left(\frac{h_{ЛА} - h_{РЭС}}{d_{\Sigma}} \right) \right]. \quad (4)$$

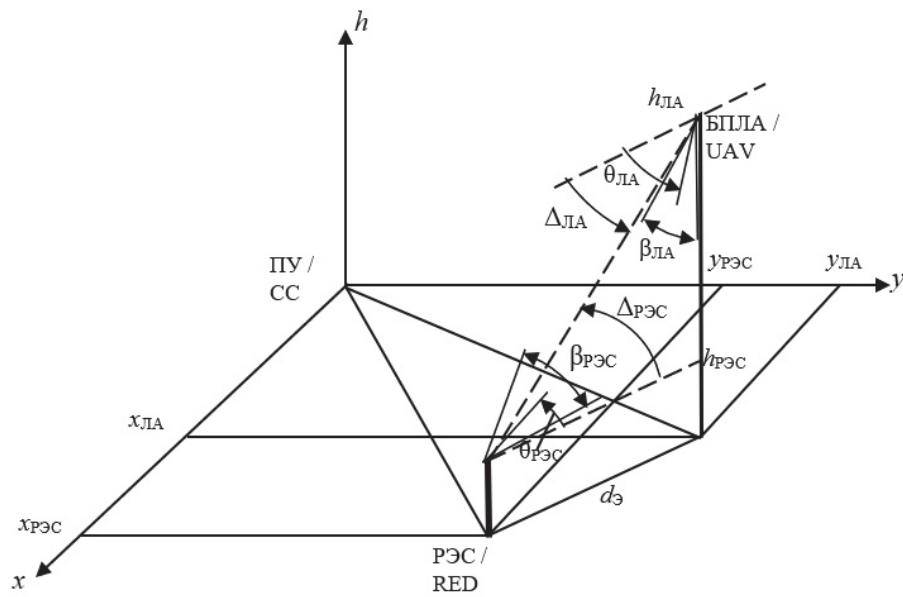


Рис. 3 – Определение областей взаимодействия ДНА РЭС и БПЛА в вертикальной плоскости

Fig. 3 – Determination of interaction areas between the RED ARP and the UAV in the vertical plane

Учитывая принятое правило отсчета углов в угломестной плоскости, угол в вертикальной плоскости, под которым из точки расположения БПЛА видно РЭС, определяется как

$$\Delta_{ЛА} = - \Delta_{РЭС}. \quad (5)$$

Теперь, если $\alpha_{РЭС} = 360^\circ$ и выполняется неравенство

$$\theta_{РЭС} - \beta_{РЭС} / 2 \leq \Delta_{РЭС} \leq \theta_{РЭС} + \beta_{РЭС} / 2, \quad (6)$$

то ГЛ ДНА РЭС направлен на БПЛА. Если неравенство (6) не выполняется, то ДНА РЭС направлена на БПЛА боковым лепестком.

Поскольку ДНА БПЛА и ПУ направлены друг на друга главными лепестками, то

$$\theta_{\text{ПУ}} = \left[\arctg \left(\frac{h_{\text{ЛА}} - h_{\text{ПУ}}}{d_{\text{ЛА}}} \right) \right];$$

$$d_{\text{ЛА}} = \sqrt{x_{\text{ЛА}}^2 + y_{\text{ЛА}}^2};$$

$$\theta_{\text{ЛА}} = -\theta_{\text{ПУ}}.$$

Если $\alpha_{\text{ЛА}} = 360^\circ$ и выполняется неравенство

$$\theta_{\text{ЛА}} - \beta_{\text{ЛА}} / 2 \leq \Delta_{\text{ЛА}} \leq \theta_{\text{ЛА}} + \beta_{\text{ЛА}} / 2, \quad (7)$$

то ГЛ ДНА РПУ БПЛА направлен на РЭС. Если неравенство (7) не выполняется, то на РЭС направлен боковой лепесток ДНА РПУ БПЛА.

На рис. 4 представлено расположение проекций антенн объектов, приведенных на рис. 2, и главных лепестков диаграмм направленности РЭС и БПЛА в плоскости xOy . В дальнейшем для разного взаимного положения будет использоваться угол, обозначенный на рис. 4 как ψ_1 , значение которого, как следует из рисунка, определяется как

$$\psi_1 = \arctg \left(\frac{y_{\text{ЛА}} - y_{\text{РЭС}}}{x_{\text{ЛА}} - x_{\text{РЭС}}} \right). \quad (8)$$

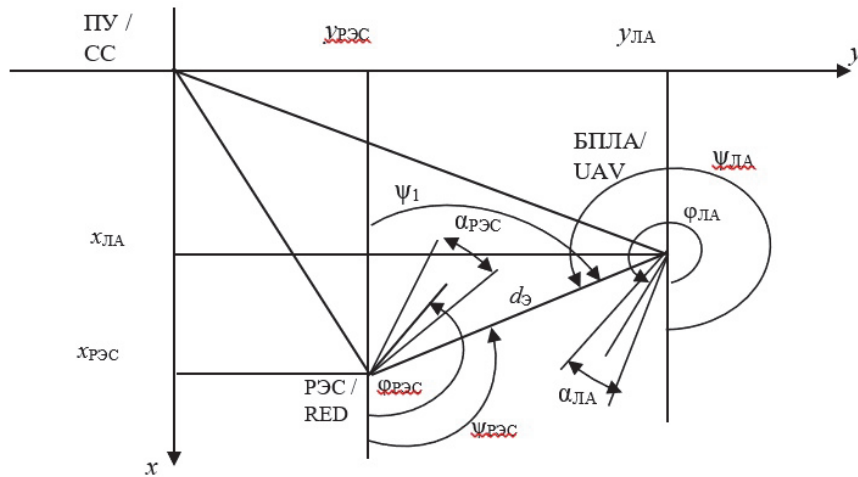


Рис. 4 – Определение областей взаимодействия ДНА РЭС и БПЛА в горизонтальной плоскости

Fig. 4 – Determination of interaction areas between the RED ARP and the UAV in the horizontal plane

Рассмотрим процедуру определения области ДНА РЭС, направленной на БПЛА для этого случая. В данном частном случае угол $\psi_{\text{РЭС}}$, определяющий направление от РЭС на БПЛА, учитывая, что, как следует из (8) и принятого направления отсчета углов в плоскости xOy , $\psi_1 < 0$, имеет значение

$$\psi_{\text{РЭС}} = 180^\circ + \psi_1.$$

Теперь, если удовлетворяется неравенство

$$\varphi_{РЭС} - \alpha_{РЭС} / 2 \leq \psi_{РЭС} \leq \varphi_{РЭС} + \alpha_{РЭС} / 2 \quad (9)$$

и неравенство (6), то ГЛ ДНА РЭС направлен на БПЛА. Если хотя бы одно из указанных неравенств не удовлетворяется, то на БПЛА направлен боковой лепесток ДНА РЭС.

Что касается направления БПЛА – РЭС, то, как следует из рис. 4,

$$\psi_{ЛА} = 360^\circ + \psi_1.$$

Если в это или в последующие выражения вида $360^\circ + \psi_1$ будет входить $\psi_1 \geq 0$, то результат следует считать равным ψ_1 .

С другой стороны, ГЛ ДНА БПЛА всегда направлен на ПУ. Рассматривая ПУ как РЭС с координатами $x_{РЭС} = y_{РЭС} = 0$, найдем для этого случая из (8):

$$\psi_1 = \arctg(y_{ЛА} / x_{ЛА});$$

$$\varphi_{ЛА} = 180^\circ + \psi_1, \text{ если } x_{ЛА} > 0;$$

$$\varphi_{ЛА} = 360^\circ + \psi_1, \text{ если } x_{ЛА} < 0.$$

Теперь, если удовлетворяется неравенство

$$\varphi_{ЛА} - \alpha_{ЛА} / 2 \leq \psi_{ЛА} \leq \varphi_{ЛА} + \alpha_{ЛА} / 2 \quad (10)$$

и неравенство (6), то ГЛ ДНА РПУ БПЛА направлен на РЭС. Если хотя бы одно из указанных неравенств не удовлетворяется, то на РЭС направлен боковой лепесток ДНА РПУ БПЛА.

Аналогично рассмотренному примеру можно провести оценку углов $\psi_{РЭС}$ и $\psi_{ЛА}$ для других ситуаций. Результаты оценки представлены в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

Углы в плоскости xOy , определяющие положение отрезка РЭС – БПЛА
Angles in the xOy plane that determine the position of the RED - UAV segment

Положение объектов на оси x / Position of objects on the x -axis	Направление / Direction	
	РЭС – БПЛА / RED – UAV	БПЛА – РЭС / UAV – RED
$x_{РЭС} < x_{ЛА}$	$\psi_{РЭС} = 360^\circ + \psi_1$	$\psi_{ЛА} = 180^\circ + \psi_1$
$x_{РЭС} > x_{ЛА}$	$\psi_{РЭС} = 180^\circ + \psi_1$	$\psi_{ЛА} = 360^\circ + \psi_1$

Для любого положения РЭС и БПЛА, удовлетворяющего условиям первого столбца табл. 2, уравнения (4), (5) и (8) и выполнение или невыполнение неравенств (6), (7), (9) и (10) определяют области взаимодействия диаграмм направленности антенн передатчика РЭС и приемника БПЛА.

Особые случаи взаимного положения рассматриваемых объектов представляют ситуации, когда совпадают одна или две координаты местоположения РЭС и БПЛА, кроме высоты. В случае, когда $x_{РЭС} = x_{ЛА}$ и $y_{РЭС} = y_{ЛА}$, для рассматриваемого типа средств имеет место взаимодействие обеих ДНА по боковым лепесткам. Для других ситуаций по значениям углов $\psi_{РЭС}$ и $\psi_{ЛА}$ области взаимо-

действия диаграмм направленности определяют так, как это происходит с параметрами, представленными в табл. 2. Значения $\Psi_{РЭС}$ и $\Psi_{ЛА}$ для этих ситуаций приведены в табл. 3.

Таблица 3 / Table 3

Особые случаи взаимного положения РЭС и БПЛА
Special cases of mutual position of RED and UAV

Положение объектов / Position of objects							
$x_{РЭС} = x_{ЛА}$				$y_{РЭС} = y_{ЛА}$			
$y_{РЭС} < y_{ЛА}$		$y_{РЭС} > y_{ЛА}$		$x_{РЭС} < x_{ЛА}$		$x_{РЭС} > x_{ЛА}$	
$\Psi_{РЭС} = 90^\circ$	$\Psi_{ЛА} = 270^\circ$	$\Psi_{РЭС} = 270^\circ$	$\Psi_{ЛА} = 90^\circ$	$\Psi_{РЭС} = 0^\circ$	$\Psi_{ЛА} = 180^\circ$	$\Psi_{РЭС} = 180^\circ$	$\Psi_{ЛА} = 0^\circ$

Заметим, что $\varphi_{РЭС}$ является исходным данным при проведении расчетов, связанных с определением области ДНА РЭС, направленной на БПЛА. Значение $\varphi_{ЛА}$, используемое для определения области ДНА РПУ БПЛА, направленной на РЭС, рассчитывается по приведенным выше формулам, поскольку ГЛ ДНА РПУ БПЛА всегда направлен на ПУ для приема полезного сигнала

Потери в пространстве распространения между антеннами РЭС, ПУ и антенной приемника БПЛА зависят от расстояния между объектами и частоты сигналов, поступающих на вход РПУ БПЛА. Как следует из графиков, приведенных в [8], погонное затухание электромагнитных волн в газах атмосферы в области частот 5..6 ГГц составляет от 0,01 до 0,03 дБ/км и убывает с уменьшением частоты. Учитывая, что в современных гражданских БПЛА используются частоты, не превышающие 6 ГГц, а дальность передачи сигналов распространенных БПЛА общего пользования в открытом пространстве по требованиям Совета Европы составляет 3,5 км, а по требованиям Федеральной комиссии связи (США) она может составлять от 5 до 7 км [9], потерями на трассе, связанными с поглощением электромагнитной энергии в газах атмосферы, можно пренебречь. В качестве модели, определяющей потери на трассе, используется модель свободного пространства, где

$$L(f_{0R}) = 32,4 + 20 \lg(f_{0R}) + 20 \lg(d_{ПА}) \quad (11)$$

потери на трассе ПУ – БПЛА, дБ, на частоте полезного сигнала f_{0R} , МГц, а $d_{ПА}$ – протяженность трассы ПУ – БПЛА, км (см. рис. 2):

$$d_{ПА} = \sqrt{x_{ЛА}^2 + y_{ЛА}^2 + (h_{ЛА} - h_{ПУ})^2}. \quad (12)$$

Потери на трассе РЭС – БПЛА на частоте помехи f_i определяем аналогично:

$$L(f_i) = 32,4 + 20 \lg(f_i) + 20 \lg(d_{РА}) \quad (13)$$

и

$$d_{РА} = \sqrt{d_{\Xi}^2 + (h_{ЛА} - h_{РЭС})^2}. \quad (14)$$

В табл. 4 представлены данные о потерях из-за несовпадения поляризационных состояний приемной антенны и поступающих в нее помех [6, 7]. Оценка потерь из-за несовпадения поляризаций антенны приемника и поступающих в нее мешающих сигналов проводится только, если взаимодействие антенн мешающего

передатчика и приемника БПЛА происходит по ГЛ их ДНА. Потери на рассогласование поляризаций в области бокового усиления обычно не рассматривают, поскольку в этой области поляризация может быть совершенно иной, чем по ГЛ ДНА, и обычно она неизвестна.

Таблица 4 / Table 4

**Ослабление мешающих сигналов при несовпадении поляризации
с приемной антенной**

**Attenuation of interfering signals when the polarization does not match
with the receiving antenna**

Поляризация антенны приемника / Receiver antenna polarization		Поляризация антенны источника помехи / Antenna polarization of the interfering source					
		Горизонтальная / Horizontal		Вертикальная / Vertical		Круговая / Circular	
		$G_0 < 10$ дБ	$G_0 < 10$ дБ	$G_0 < 10$ дБ	$G_0 < 10$ дБ	левая / left	правая / right
Горизонтальная / Horizontal	$G_0 < 10$ дБ	0	0	16	16	3	3
	$G_0 > 10$ дБ	0	0	16	20	3	3
Вертикальная / Vertical	$G_0 < 10$ дБ	16	16	0	0	3	3
	$G_0 > 10$ дБ	16	20	0	0	3	3
Круговая / Circular	Левая / Left	3	3	3	3	0	16
	Правая / Right	3	3	3	3	16	0

Определение коэффициента частотной коррекции $CF(\Delta f_{ij})$ проведем, используя рекомендацию МСЭ [10], представив коэффициент в виде двух слагаемых

$$CF(\Delta f_{ij}) = CF_1 + CF_2(\Delta f_{ij}),$$

где

$$CF_1 = \begin{cases} 0, & \text{если } B_{Ti} \leq B_R; \\ 10 \lg(B_{Ti}/B_R), & \text{если } B_{Ti} > B_R \end{cases} \quad (15)$$

и

$$CF_2(\Delta f_{ij}) = D(\Delta f_{ij}).$$

Здесь $D(\Delta f_{ij})$ избирательность приемника, дБ; Δf_{ij} – отстройка i -й частоты помехи от j -й частоты полезного сигнала (1).

В выражении (15) B_{Ti} – ширина полосы частот источника помехи по уровню минус 3 дБ на входе тракта промежуточной частоты (ПЧ) после преобразователя частоты. При использовании БПЛА в линии вверх сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты ширина спектра источника помехи B_{Ti} после смесителя становится равной ширине канала, который занимал полезный сигнал до его сжатия. В этом случае B_R – ширина полосы полезного сигнала после сжатия.

В качестве математической модели избирательности приемника по частоте используется выражение

$$D(\Delta f_{ij}) = \begin{cases} 0, & |\Delta f_{ij}| \leq B_R / 2; \\ \alpha \frac{\lg(2|\Delta f_{ij}| / B_R)}{\lg(\Pi_\alpha)}, & |\Delta f_{ij}| > B_R / 2, \end{cases} \quad (16)$$

где Π_α – коэффициент прямоугольности характеристики избирательности тракта ПЧ по уровню α , дБ.

Если выражение (16) дает значение больше, чем 100 дБ, то принимаем $D(\Delta f_{ij}) = 100$ дБ.

Как отмечалось ранее, оценка качества принимаемого сигнала проводится с использованием защитного отношения. Если защитное отношение напрямую не задано, но известно минимальное отношение сигнал/помеха, которое требуется на входе демодулятора для получения сигнала заданного качества $(S/I)_{\text{дем}}$, а мощность помехи рассчитана с учетом избирательности тракта, предшествующего демодулятору (уравнение (2)), то это отношение можно рассматривать как защитное отношение.

Используя (2) и (3), найдем значения S и I . Если имеется несколько источников помех, например n , создающих помеху данному элементу сигнала, то, используя (2), найдем значения I_i для каждого i -го источника помех и далее:

$$I = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{I_i/10} \right). \quad (17)$$

Теперь можно найти расчетное значение отношения сигнал/помеха $(S/I)_{\text{расч}}$ ((3)/(17)) и сравнить с защитным отношением $(S/I)_{\text{защ}}$. Если

$$(S/I)_{\text{расч}} = S - I < (S/I)_{\text{защ}}, \quad (18)$$

то помеха недопустимо искажает элемент полезного сигнала, имеющий частоту f_j . Учитывая, что сигнал ППРЧ может на одной частоте передавать один или несколько символов, которые в свою очередь содержат один или несколько бит информации, искажения сигнала могут быть значительными. Несколько помех, разнесенных по частоте, могут привести к поражению нескольких элементов сигнала, имеющих разные частоты, и к недопустимому снижению качества принимаемого сигнала. Информация о допустимом числе пораженных частот полезного ППРЧ сигнала и результатах проведенного анализа может быть использована для принятия решения о возможном применении БПЛА в данной электромагнитной обстановке.

Описанная процедура может быть представлена последовательностью следующих шагов.

1. Выбор местоположения БПЛА на планируемой траектории полета.
2. Определение области на земной поверхности под точкой, где находится БПЛА, в которой рассматриваются РЭС, излучения которых могут представлять помеху для приема сигнала приемником БПЛА.
3. Отбор потенциально опасных РЭС по частотному признаку, используя неравенство (1).

4. Оценка уровня полезного сигнала на входе РПУ БПЛА, используя уравнения (3), (11), (12).

5. Оценка уровня помех, создаваемых РЭС, признанных потенциально опасными по результатам частотного отбора, для чего:

- определяют области взаимодействия ДНА РЭС и РПУ БПЛА (выражения (4)–(10) и табл. 2 и 3);
- оценивают потери на трассах РЭС – БПЛА (уравнения (13), (14));
- определяют коэффициент частотной коррекции, используя (15) и (16);
- рассчитывают уровень мешающего сигнала на входе приемника, используя (2) и табл. 4;
- используя (17), определяют суммарную помеху (при наличии нескольких источников помех).

7. Оценка отношения сигнал/помеха и степени опасности помехи, используя (18).

Последовательно просматривая выбранные точки траектории, определяют качество приема сигналов в канале управления вдоль этой траектории.

Заключение

Предложена процедура, позволяющая оценить работоспособность радиоаппаратуры, размещенной на борту БПЛА, в электромагнитной обстановке, формируемой излучениями стационарных наземных РЭС. В основе лежит допущение, что снижение качества приема полезных сигналов в канале радиоуправления ниже определенного значения (например, роста BER для цифровых сигналов) из-за низкого отношения сигнал/помеха на входе приемника БПЛА в полосе его пропускания, приведет к ошибкам в командах управления полетом БПЛА и запуску бортовой специализированной аппаратуры. Как следствие, к невыполнению поставленной задачи.

Процедура может быть использована при решении более общей задачи анализа электромагнитной совместимости радиосредств БПЛА, пульта управления и наземных РЭС, поскольку, по существу, является составной частью решения этой задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Штаев Д.В.** Анализ технологии управления беспилотными летательными аппаратами // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. – 2019. – Т. 11, № 2. – С. 113–119. – DOI: 10.24866/VVSU/2073-3984/2019-2/113-119.
2. **Семенова Л.Л.** Современные методы навигации беспилотных летательных аппаратов // Наука и образование сегодня. – 2018. – № 4 (27). – С. 6–8.
3. Особенности обнаружения и распознавания малых беспилотных летательных аппаратов / В.М. Карташов, В.Н. Олейников, С.А. Шейко, С.И. Бабкин, И.В. Корытцев, О.В. Зубков // Радиотехника. – Харьков, 2018. – № 4 (195). – С. 235–243.
4. Применение коммерческих дронов для выполнения задач МСЭ-R по контролю за использованием спектра. Отчет МСЭ-R SM.2486-0 (06/2021). Серия SM. Управление использованием спектра. – ITU, 2021. – 13 с.
5. **Боев Н.М., Шаршавин П.В., Нигруца И.В.** Построение систем связи беспилотных летательных аппаратов для передачи информации на большие расстояния // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 3 (152). – С. 147–158.
6. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. Вып. 1. Общие вопросы ЭМС. Межсистемные помехи / сост. Д.Р.Ж. Уайт. – М.: Советское радио, 1977. – 352 с.

7. **Виноградов Е.М.** Анализ электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. – 301 с.
8. Recommendation ITU-R P.676-13. Attenuation by atmospheric gases and related effects.
9. **Бондарев А.Н., Киричек Р.В.** Обзор беспилотных летательных аппаратов общего пользования и регулирования воздушного движения БПЛА в разных странах // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2016. – Т. 4 (4). – С. 13–23.
10. Recommendation ITU-R SM.337-6. Frequency and distance separations.

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF UNINTENTIONAL INTERFERENCE ON THE UPLINK OF THE CONTROL CHANNEL OF AN UNMANNED AIRCRAFT

Antipin B.M., Vinogradov E.M., Tumanova E.I.

*The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
Saint-Petersburg, Russia*

Modern unmanned aerial vehicles (UAVs) are becoming increasingly important in solving many problems, for example, when delivering goods, video recording, conducting aerial monitoring of the condition of remote and hard-to-reach objects, etc. When solving these problems, UAVs may experience unintentional interference from other radio-electronic equipment (RES). Currently, virtually no attention is paid to issues related to the analysis of the quality of operation of civilian UAVs in the presence of unintentional interference from other civil electronic distribution systems. The proposed method is intended to somewhat fill this gap. It is based on the assumption that a decrease in the quality of reception of useful signals in the radio control channel below a certain value due to the low signal-to-noise ratio at the input of the UAV receiver in its bandwidth will lead to errors in the UAV flight control commands and the wrong starting of on-board specialized equipment. The level of the interfering signal delivered to the UAV receiver from a stationary land-based transmitter depends on interaction areas between transmitter and receiver antenna patterns. A method for determining these areas, consisting of main and side lobes of antenna patterns, is proposed. This method can be used to solve the more general problem of analyzing the electromagnetic compatibility of UAV radio stations, control panels and ground-based electronic devices, as it is an integral part of solving this problem.

Keywords: unmanned aerial vehicle, radio control channel, uplink, frequency-hopping spread spectrum, unintentional interference, protection ratio.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-4-18-33

REFERENCES

1. Shtaev D.V. Analiz tekhnologii upravleniya bespilotnymi letatel'nyimi apparatami [Analysis of control technology of unmanned aerial vehicles]. *Territoriya novykh vozmozhnostei. Vestnik Vladivostokskogo gosudarstvennogo universiteta ekonomiki i servisa = The Territory of New Opportunities. The Herald of Vladivostok State University of Economics and Service*, 2019, vol. 11 (2), pp. 113–119. DOI: 10.24866/VVSU/2073-3984/2019-2/113-119.
2. Semenova L.L. Sovremennyye metody navigatsii bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Modern methods of navigation of unmanned aerial vehicles]. *Nauka i obrazovanie segodnya = Science and education today*, 2018, no. 4 (27), pp. 6–8.
3. Kartashov V.M., Oleinikov V.N., Sheiko S.A., Babkin S.I., Korytsev I.V., Zubkov O.V. Oso-bennosti obnaruzheniya i raspoznavaniya mal'kh bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Features of detection and recognition of small unmanned aerial vehicles]. *Radiotekhnika = Radio-engineering*, Kharkiv, 2018, no. 4 (195), pp. 235–243. (In Russian).
4. Report ITU-R SM.2486-0 (06/2021). *Use of commercial drones for ITU-R spectrum monitoring tasks*. ITU, 2021.

5. Boev N.M., Sharshavin P.V., Nigruca I.V. Postroenie sistem svyazi bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya peredachi informatsii na bol'shie rasstoyaniya [UAVs communication systems for long-distance information transmission]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya Southern Federal University. Engineering sciences*, 2014, no. 3 (152), pp. 147–158.
6. White D.R.J., comp. *Elektromagnitnaya sovmestimost' radioelektronnykh sredstv i neprednamerennye pomekhi*. Vyp. 1. *Obshchie voprosy EMS. Mezhsistemnye pomekhi* [Electromagnetic compatibility of radio-electronic equipment and unintentional interference. Vol. 1]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1977. 352 p. (In Russian).
7. Vinogradov E.M. *Analiz elektromagnitnoi sovmestimosti radioelektronnykh sredstv* [Analysis of electromagnetic compatibility of radio-electronic equipment.]. St. Petersburg, St. Petersburg Electrotechnical University "LETI" Publ., 2010. 301 p.
8. Recommendation ITU-R P.676-13. *Attenuation by atmospheric gases and related effects*.
9. Bondarev A.N., Kirichuk R.V. Obzor bespilotnykh letatel'nykh apparatov obshchego pol'zovaniya i regulirovaniya vozdušnogo dvizheniya BPLA v raznykh stranakh [Overview of unmanned aerial apparatus for general use and regulation of air UAV movement in different countries]. *Informa-tsionnye tekhnologii i telekommunikatsii = Telecom IT*, 2016, vol. 4 (4), pp. 13–23.
10. Recommendation ITU-R SM.337-6. *Frequency and distance separations*.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Антипин Борис Маврович – родился в 1955 году, канд. техн. наук, доцент, начальник Научно-исследовательской лаборатории радиоконтроля и электромагнитной совместимости, доцент кафедры телевидения и метрологии, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Область научных интересов: обработка сигналов в системах радиосвязи для решения задач обеспечения электромагнитной совместимости и мониторинга использования радиочастотного ресурса. Опубликовано 46 научных работ. (Адрес: 194223, Россия, Санкт-Петербург, ул. Жака Дюкло, 8. E-mail: boris_antipin@mail.ru).

Antipin Boris Mavrovich (b. 1955) – Candidate of Sciences (Eng.), Associate Professor, Head of the Research Laboratory of Radio Monitoring and Electromagnetic Compatibility, Associate Professor of the Department of Television and Metrology, SUT. His research interests are currently focused on signal processing in radio communication systems to solve problems of ensuring electromagnetic compatibility and monitoring the use of radio frequency resources. He is author of 46 scientific papers. (Address: 8, Jak Duklo Street, Saint-Petersburg, 194223, Russia Federation. E-mail: boris_antipin@mail.ru).



Виноградов Евгений Михайлович – родился в 1936 году, канд. техн. наук, доцент, Научно-исследовательская лаборатория «Радиоконтроль и электромагнитная совместимость», СПбГУТ. Область научных интересов: электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. Опубликовано 107 научных работ. (Адрес: 198205, Россия, Санкт-Петербург, ул. Партизана Германа, 18. E-mail: vinog1936@mail.ru).

Vinogradov Evgenii Mihailovich (b. 1936) – Candidate of Sciences (Eng.), Associate Professor, Research Laboratory of Radio Monitoring and Electromagnetic Compatibility SPbSUT. His research interests are currently focused on electromagnetic compatibility of radio-electronic equipment. He is author of 108 scientific papers. (Address: 18, Partizan German Street, Saint-Petersburg, 198205, Russia. E-mail: vinog1936@mail.ru).



Туманова Евгения Ивановна – родилась в 1987 году, канд. техн. наук, доцент, кафедра телевидения и метрологии, СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. Область научных интересов: иммерсивная реальность, ольфакторная модальность, генеративная графика. Опубликовано 35 научных работ. (Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, ул. Пулковская, 6. E-mail: evjeny@gmail.com).

Tumanova Evgeniya Ivanovna (b. 1987) – Candidate of Sciences (Eng.), Associate Professor of the Department of Television and Metrology, SUT. Her research interests are currently focused on immersive reality, olfactory modality, generative graphics. She is author of 35 scientific papers. (Address: 6, Pulkovskaya Street, Saint-Petersburg, 196158, Russia. E-mail: evjeny@gmail.com).

*Статья поступила 26 сентября 2023 г.
Received September 26, 2023*

To References:

Antipin B.M., Vinogradov E.M., Tumanova E.I. Otsenka vliyaniya neprednamerennykh pomekh na liniyu vverkh kanala upravle niya bespilotnogo letatel'nogo apparata [Assessment of the impact of unintentional interference on the uplink of the control channel of an unmanned aircraft]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2023, no. 4 (61), pp. 18–33. DOI: 10.17212/1727-2769-2023-4-18-33.