

Оценка электромагнитной совместимости радиоборудования гражданского беспилотного летательного аппарата и пункта управления с окружением

Б. М. Антипин¹, Е. М. Виноградов²

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

¹boris_antipin@mail.ru, ²vinog1936@mail.ru

Аннотация. Работа радиоаппаратуры, размещенной на борту гражданского беспилотного летательного аппарата, в пункте управления и в местах расположения окружающих наземных РЭС, происходит в условиях непреднамеренных взаимных помех, которые могут привести к ошибкам и сбоям в работе этой аппаратуры. Возникающая ситуация требует оценки электромагнитной совместимости радиосредств, вовлеченных в это взаимодействие. Настоящая работа рассматривает один из возможных подходов к решению этой задачи.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, электромагнитная совместимость, непреднамеренные помехи, псевдослучайная перестройка частоты, защитное отношение

I. ВВЕДЕНИЕ

Современные гражданские беспилотные аппараты (БПЛА) решают много важных народнохозяйственных задач. Их использование простирается от наблюдения за состоянием удаленных и труднодоступных объектов (газопроводы, линии электропередач и т. п.) до получения информации, связанной с экологическими катастрофами (лесные пожары, наводнения, землетрясения).

Управление полетом БПЛА, сбор информации, выполняемый аппаратурой БПЛА, передача этой информации потребителю происходит с использованием радиоэлектронных средств (РЭС), в состав которых входят радиопередатчики (РПД) и радиоприемные устройства (РПУ) и осуществляется с пункта управления (ПУ) через канал радиоуправления (КРУ), а перечисленные РЭС размещаются как на БПЛА, так и в ПУ.

БПЛА имеет с ПУ прямую и обратную связь. Посредством прямой связи (по восходящей линии) осуществляется управление полетом БПЛА и работой аппаратуры, размещенной на его борту. Посредством обратной связи (по нисходящей линии) передается на ПУ информация о степени выполнения полученных команд, а также телеметрическая информация, получаемая с измерительных приборов, установленных на БПЛА.

Наземные радиоэлектронные средства (РЭС), не участвующие в работе системы ПУ – БПЛА, также

имеют в своем составе радиопередатчики и РПУ. Излучения передатчиков, входящих в состав БПЛА, ПУ и наземных РЭС, могут создать недопустимые помехи работе РПУ, размещенных на этих объектах. Возникающая ситуация требует оценки электромагнитной совместимости (ЭМС) рассматриваемых радиосредств.

Наземные радиоэлектронные средства могут быть подвижными или стационарными. Ниже в качестве возможных источников помех рассматриваются только стационарные наземные РЭС, в состав которых входят РПД и РПУ. Рассмотрение также ограничено только каналом радиоуправления, но учитывает наличие в канале двух линий: линии вверх и линии вниз. При этом на линии вверх РПД располагается в ПУ, а РПУ на БПЛА. На линии вниз наоборот: РПД расположен на БПЛА, а РПУ в ПУ.

Между линиями существует некоторое различие, касающееся помех в этих линиях. Различие состоит в том, что при полете БПЛА источники и рецепторы помех для линии вверх в разных точках траектории полета меняются и, соответственно, меняется электромагнитная обстановка (ЭМО), в которой происходит работа радиоаппаратуры БПЛА. Это может привести к тому, что в некоторых точках траектории полета БПЛА электромагнитная совместимость (ЭМС) аппаратуры, установленной на БПЛА, с окружением будет отсутствовать. Что касается линии вниз, то поскольку ПУ и окружающие его стационарные наземные передатчики не изменяют своего положения с течением времени, то можно считать, что за время полета БПЛА ЭМО, в которой работает радиоаппаратура ПУ, не меняется. Однако при полете БПЛА изменятся уровень полезных сигналов, поступающих на вход приемников ПУ. В отсутствии внешних помех дальность, с которой приемники ПУ принимают полезные сигналы с требуемым качеством, определяется расстоянием от ПУ до БПЛА, при котором на вход приемников ПУ поступают сигналы равные чувствительности приемников. Наличие внешних помех снижает расстояние, с которого полезный сигнал принимается с требуемым качеством.

Цель работы состоит в том, чтобы предложить вариант оценки ЭМС радиопередатчиков и РПУ, входящих в состав БПЛА, ПУ и окружающих их наземных РЭС.

Научная статья подготовлена в рамках прикладных научных исследований СПбГУТ, регистрационный номер 1023031600087-9 в ЕГИСУ НИОКТР.

II. ПРИНЯТЫЕ ДОПУЩЕНИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

При решении задачи учитываем четыре вида взаимодействий между рассматриваемыми средствами: РПД РЭС → РПУ БПЛА, РПД РЭС → РПУ ПУ, РПД БПЛА → РПУ РЭС и РПД ПУ → РПУ РЭС.

Принятые ограничения:

- в РПУ не рассматриваются нелинейные явления;
- рассматриваются только наземные стационарные РЭС, которые располагаются на ограниченной территории и, рабочие частоты которых, находятся в ограниченной полосе частот.

Последнее ограничение требует отбора источников помех (ИП) по дальности и частоте. Отбор потенциально опасных РПД для ПУ осуществляется один раз. Потенциально опасными передатчиками по дальности рассматриваются РПД, расположенные в пределах радиогоризонта. Отбор потенциально опасных РПД для приемника БПЛА выполняется в каждой точке траектории полета, где намечена оценка ЭМС. Если известна максимальная мощность наземного стационарного РПД вдоль трассы полета БПЛА, то граница территории может быть определена расстоянием до передатчика, при котором в свободном пространстве этот передатчик создаст на входе приемника БПЛА уровень сигнала, равный его чувствительности

Что касается отбора ИП по частоте, то из РПД, отобранных по расстоянию, потенциально опасными считаются передатчики, частоты которых f_{Ti} удовлетворяют неравенству

$$\Delta f_{ij} = |f_{Ti} - f_j| \leq 2,5B_R$$

где f_j – текущая частота полезного сигнала РПУ; B_R – ширина полосы пропускания приемника

Информация о передатчиках включает сведения о мощности РПД, их рабочих частотах и поляризации излучаемых сигналов. В КРУ, как в восходящей, так и в нисходящей линии используются сигналы с псевдослучайной перестройкой частоты (сигналы ППРЧ), поэтому в исходные данные включено значение полосы B_S , занимаемой сигналом ППРЧ. Сигналы наземных передатчиков считаются узкополосными.

Информация о приемниках включает сведения о ширине полосы пропускания тракта промежуточной частоты (ПЧ), B_R , приемника и коэффициенте прямоуглольности по уровню 60 дБ его характеристики избирательности.

Диаграмма направленности антенны (ДНА) разбивается на две области: область главного лепестка (ГЛ) и область боковых лепестков (БЛ), куда включена и задняя полусфера. Переходной областью между ГЛ и БЛ пренебрегаем. В угловом выражении область ГЛ определена шириной ДНА по уровню –3дБ.

Описание диаграмм направленности антенн и их местоположения включает:

- усиление антенны по ГЛ ДНА, G_0 , дБи;
- азимутальное направление ГЛ ДНА, φ : $0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$;

- угломестное направление ГЛ ДНА, θ : $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$;
- ширину ГЛ ДНА в горизонтальной плоскости, α° ;
- ширину ГЛ ДНА в вертикальной плоскости, β° ;
- координаты местоположения антенн, (x, y, h) , где h высота антенны, м.

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

В дальнейшем параметры ДНА и координаты антенн, относящиеся к БПЛА, имеют индекс ЛА, к пульту управления – ПУ, к наземным передатчикам – РЭС.

Полагаем также, что для сигналов, поступающего на вход приемника БПЛА, известно защитное отношение.

В качестве критериев ЭМС используем:

- в ситуации РПД РЭС → РПУ БПЛА – защитное отношение;
- в ситуации РПД РЭС → РПУ ПУ – допустимое снижение дальности связи между БПЛА и ПУ;
- в ситуациях РПД БПЛА → РПУ РЭС и РПД ПУ → РПУ РЭС – допустимое снижение чувствительности приемника.

III. ПРОЦЕДУРА ОЦЕНКИ ЭМС

Для оценки ЭМС в первых двух ситуациях, перечисленных выше, необходимо знать мощность полезных сигналов на входе РПУ БПЛА и РПУ ПУ, а также эквивалентную мощность помехи, приведенную к входу каждого приемника на его рабочей частоте в полосе пропускания приемника. Основное уравнение, решающее последнюю задачу, имеет вид:

$$I(f_j) = P_{Ti}(f_{Ti}) + G_{TiRj}(f_{Ti}) + G_{RjTi}(f_{Ti}) - L(f_{Ti}) - \gamma - CF(\Delta f_{ij}), \quad (1)$$

где I – эквивалентная мощность помехи, приведенная к входу РПУ R_j на его рабочей частоте f_j , дБм; P_{Ti} – мощность передатчика T_i , дБм; G_{TiRj} , G_{RjTi} – коэффициенты усиления антенны РПД T_i в направлении на РПУ R_j и антенны РПУ R_j в направлении на РПД T_i соответственно, дБи; L – потери на трассе распространения РПД–РПУ, дБ; γ – потери из-за несовпадения поляризаций антенны РПУ и помехи, дБ; $CF(\Delta f_{ij})$ – коэффициент частотной коррекции, дБ.

Важным этапом вычислений уровней мешающих сигналов на входе РПУ является определение областей взаимодействия диаграмм направленности передающей и приемной антенн. 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.

Рассмотрим ситуацию РПД РЭС → РПУ БПЛА. Здесь РПД РЭС – источник, а РПУ БПЛА – жертва помехи.

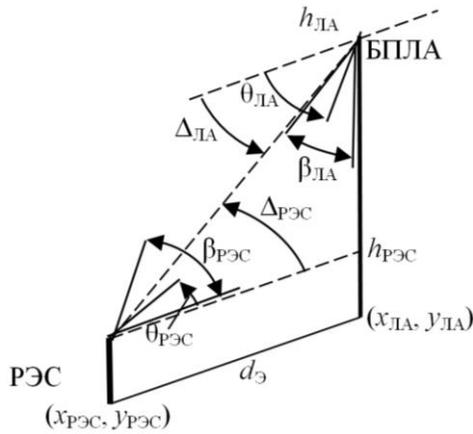


Рис. 1. Определение областей взаимодействия ДНА РЭС и БПЛА в вертикальной плоскости

На рис. 1 представлено взаимное положение БПЛА с координатами $(x_{ЛА}, y_{ЛА}, h_{ЛА})$ и стационарного наземного передатчика РЭС с координатами $(x_{РЭС}, y_{РЭС}, h_{РЭС})$.

Угол, под которым в вертикальной плоскости из точки расположения РЭС виден БПЛА, определяет выражение [1]

$$\Delta_{РЭС} = \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{h_{ЛА} - h_{РЭС}}{d_{Э}} \right) \right], \quad (2)$$

$$\text{где } d_{Э} = \sqrt{(x_{ЛА} - x_{РЭС})^2 + (y_{ЛА} - y_{РЭС})^2} \quad (3)$$

Теперь, если

$$\theta_{РЭС} - \beta_{РЭС}/2 \leq \Delta_{РЭС} \leq \theta_{РЭС} + \beta_{РЭС}/2, \quad (4)$$

то ГЛ ДНА РЭС в вертикальной плоскости направлен на БПЛА. Иначе ДНА РЭС «смотрит» на БПЛА боковым лепестком. Что касается положения ДНА РПУ БПЛА, то нужно учесть, что антенна передатчика ПУ и приемника БПЛА направлены друг на друга главными лепестками. Считая, что ПУ находится в точке с координатами $(0,0,h_{ПУ})$ найдем

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

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

и $\theta_{ЛА} = -\theta_{ПУ}$, а $\Delta_{ЛА} = -\Delta_{РЭС}$

ГЛ ДНА РПУ БПЛА направлен на РЭС, если

$$\theta_{ЛА} - \beta_{ЛА}/2 \leq \Delta_{ЛА} \leq \theta_{ЛА} + \beta_{ЛА}/2 \quad (5)$$

Для определения областей взаимодействия диаграмм направленности антенн в горизонтальной плоскости, рассмотрим их положение на плоскости xOy (рис. 2) [1].

Из рис. 2 найдем

$$\psi_1 = \operatorname{arctg} \left(\frac{y_{ЛА} - y_{РЭС}}{x_{ЛА} - x_{РЭС}} \right) \quad (6)$$

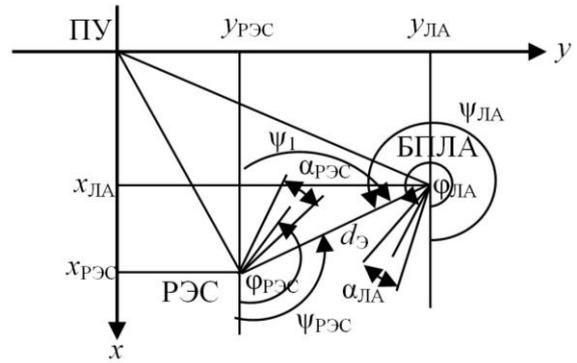


Рис. 2. Определение областей взаимодействия ДНА РЭС и БПЛА в горизонтальной плоскости

Углы, определяющие в общем случае положение отрезка, соединяющего точки РЭС и БПЛА, представлены в табл. I.

ТАБЛИЦА I.

Положение объектов на оси x	Направление	
	РЭС \rightarrow БПЛА	БПЛА \rightarrow РЭС
$x_{РЭС} < x_{ЛА}$	$\psi_{РЭС} = 360^\circ + \psi_1$	$\psi_{ЛА} = 180^\circ + \psi_1$
$x_{РЭС} > x_{ЛА}$	$\psi_{РЭС} = 180^\circ + \psi_1$	$\psi_{ЛА} = 360^\circ + \psi_1$

Если $x_{РЭС} < x_{ЛА}$ и $\psi_1 > 0$, то принимаем $360^\circ + \psi_1 = \psi_1$

Теперь, если

$$\varphi_{РЭС} - \alpha_{РЭС}/2 \leq \psi_{РЭС} \leq \varphi_{РЭС} + \alpha_{РЭС}/2, \quad (7)$$

то ГЛ ДНА РЭС в горизонтальной плоскости направлен на БПЛА. Если

$$\varphi_{ЛА} - \alpha_{ЛА}/2 \leq \psi_{ЛА} \leq \varphi_{ЛА} + \alpha_{ЛА}/2, \quad (8)$$

то ГЛ ДНА РПУ БПЛА в горизонтальной плоскости направлен на РЭС.

Используя соотношения (2)–(8), найдем:

- если удовлетворяются неравенства (4) и (7), то на БПЛА направлен ГЛ ДНА РПД РЭС, иначе БЛ;
- если удовлетворяются неравенства (5) и (8), то на РЭС направлен ГЛ ДНА РПУ БПЛА, иначе БЛ.

Рассмотрим теперь ситуацию РПД РЭС \rightarrow РПУ ПУ.

Области взаимодействия ДНА определяются аналогично предыдущей ситуации с заменой параметров антенны РПУ летательного аппарата на параметры антенны РПУ пункта управления. В результате получим:

$$\Delta_{ПУ} = \operatorname{arctg} \left(\frac{h_{РЭС} - h_{ПУ}}{d_{РЭС}} \right),$$

$$\text{где } d_{РЭС} = \sqrt{x_{РЭС}^2 + y_{РЭС}^2}$$

$$\Delta_{РЭС} = -\Delta_{ПУ}$$

ГЛ ДНА РПД РЭС в вертикальной плоскости направлен на ПУ, если выполняется неравенство (4).

ГЛ ДНА РПУ ПУ в вертикальной плоскости направлен на РЭС, если выполняется неравенство

$$\theta_{ПУ} - \beta_{ПУ}/2 \leq \Delta_{ПУ} \leq \theta_{ПУ} + \beta_{ПУ}/2 \quad (9)$$

Для определения областей взаимодействия ДНА в горизонтальной плоскости обратимся к рис. 3.

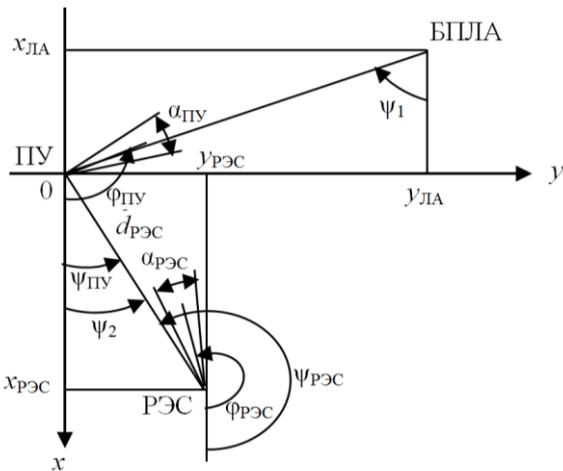


Рис. 3. Определение областей взаимодействия ДНА РЭС и ПУ в горизонтальной плоскости

Определим два угла

$$\psi_1 = \arctg(y_{ЛА}/x_{ЛА})$$

$$\psi_2 = \arctg(y_{РЭС}/x_{РЭС})$$

Теперь ГЛ ДНА РПД РЭС в горизонтальной плоскости направлен на ПУ, если

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

а ГЛ ДНА приемника ПУ в горизонтальной плоскости направлен на РЭС, если

$$\varphi_{ПУ} - \alpha_{ПУ}/2 \leq \psi_{ПУ} \leq \varphi_{ПУ} + \alpha_{ПУ}/2 \quad (11)$$

Значения углов $\varphi_{ПУ}$, $\psi_{ПУ}$ и $\varphi_{РЭС}$, входящих в (10) и (11), можно найти из табл. II, где (x, y) координаты РЭС (при вычислении $\psi_{РЭС}$ и $\psi_{ПУ}$) или БПЛА (при вычислении $\varphi_{ПУ}$).

ТАБЛИЦА II.

$x > 0$			
$y > 0$		$y < 0$	
$\varphi_{ПУ} = \psi_1$	$\varphi_{РЭС} = 180^\circ + \psi_2$	$\varphi_{ПУ} = 360^\circ + \psi_1$	$\varphi_{РЭС} = 180^\circ + \psi_2$
$\psi_{ПУ} = \psi_2$		$\psi_{ПУ} = 360^\circ + \psi_2$	
$x < 0$			
$y > 0$		$y < 0$	
$\varphi_{ПУ} = 180^\circ + \psi_1$	$\varphi_{РЭС} = 360^\circ + \psi_2$	$\varphi_{ПУ} = 180^\circ + \psi_1$	$\varphi_{РЭС} = \psi_2$
$\psi_{ПУ} = 180^\circ + \psi_2$		$\psi_{ПУ} = 180^\circ + \psi_2$	

Теперь, используя (4), (9)–(11) и табл. 2, найдем области взаимодействия ДНА приемника ПУ и передатчика РЭС.

В ситуациях РПД БПЛА → РПУ РЭС и РПД ПУ → РПУ РЭС определение областей взаимодействия ДНА производится аналогично рассмотренному выше с заменой параметров приемных антенн БПЛА и ПУ на параметры передающих антенн этих объектов, и передающих антенн РЭС на параметры их приемных антенн.

Максимальное значение коэффициентов усиления антенн по ГЛ можно получить из спецификаций технических характеристик антенн. Что касается

усиления по боковым лепесткам ДНА, то при отсутствии данных по конкретной антенне следует воспользоваться статистическими параметрами антенн, представленными в [2, 3]. Здесь же можно получить информацию о потерях, связанных с несовпадением поляризаций приемной антенны и поступающих в нее сигналов.

В качестве модели, определяющей потери на трассах ПУ–БПЛА и БПЛА–РЭС, используется модель свободного пространства

$$L(f) = 32,4 + 20 \lg(f) + 20 \lg(d),$$

где L – потери на трассе, дБ; f – частота полезного или мешающего сигнала МГц, а d – протяженность трассы между БПЛА и ПУ или БПЛА и РЭС.

Для оценки потерь на трассе РЭС–ПУ могут быть предложены разные модели. В полосе частот 30 – 3000 МГц может быть использована относительно простая модифицированная модель Хата [4], а на частотах до 4 ГГц модель рекомендации [5]. Более сложной, но охватывающей диапазон частот до 50 ГГц, является модель [6]. Перечень не охватывает всех возможных моделей для оценки потерь радиосигналов на трассах распространения, но указанные модели позволяют в большинстве случаев выполнить оценку L для трасс, связанных с окружением ПУ.

Определение коэффициента частотной коррекции $CF(\Delta f_{ij})$ для (1) проведем, используя рекомендацию МСЭ [7], которая представляет этот коэффициент в виде двух слагаемых

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

где в общем случае

$$CF_1 = \begin{cases} 0, & \text{если } B_{Ti} \leq B_{Rj} \\ 10 \lg(B_{Ti}/B_{Rj}), & \text{если } B_{Ti} > B_{Rj} \end{cases} \quad (12)$$

Здесь B_{Ti} – ширина спектра сигнала i -го передатчика, поступающего на вход j -го приемника с полосой B_{Rj}

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

$$D(\Delta f_{ij}) = \begin{cases} 0, & |\Delta f_{ij}| \leq B_{Rj}/2 \\ 60 \frac{\lg(2|\Delta f_{ij}|/B_{Rj})}{\lg(\Pi_{60})}, & |\Delta f_{ij}| > B_{Rj}/2 \end{cases}$$

Π_{60} – коэффициент прямоугольности характеристики избирательности РПУ $D(\Delta f)$ по уровню 60 дБ.

Поскольку полезный сигнал является сигналом ППРЧ с полосой B_S , то, учитывая, что при обработке полезного сигнала спектр помехи расширяется до значения B_S , вычисляя значение слагаемого CF_1 в (12), следует принять $B_{Ti} = B_S$.

Чтобы для оценки ЭМС использовать защитное отношение или снижение дальности связи между ПУ и БПЛА, вызванное помехами от наземных стационарных передатчиков, нужно знать мощность полезного сигнала на входе приемника БПЛА (линия вверх) и на входе приемника ПУ (линия вниз). Из (1) для полезного сигнала S , дБм, получим

$$S(f_{0R}) = P_T(f_{0R}) + G_{0T} + G_{0R} - L(f_{0R}), \quad (13)$$

где f_{0R} – частота полезного сигнала; $P_T(f_{0R})$ – мощность передатчика полезного сигнала, дБм; G_{0T} , G_{0R} –

коэффициенты усиления антенн передатчика и приемника полезного сигнала соответственно, дБ; $L(f_{0R})$ – потери на трассе ПУ–БПЛА, дБ.

При наличии нескольких источников помех суммарная помеха, приведенная к входу РПУ, составит

$$I = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{I_i/10} \right), \quad (14)$$

где n – число помех; I_i – мощность i -ой помехи, дБм.

Используя (13) и (14), найдем отношение $S/I = S - I$. Сравнивая его с защитным отношением $(S/I)_{\text{заш}}$, получим оценку ЭМС для ситуации РПД РЭС → РПУ БПЛА.

Снижение дальности связи между БПЛА и ПУ в ситуации РПД РЭС → РПУ ПУ учитывает не только внешнюю помеху, но и собственный шум приемника. Значение помехи в этом случае составит

$$I_1 = 10 \lg \left(\sum_{k=1}^K 10^{I_k(f_{0R})/10} + 10^{N/10} \right),$$

где собственный шум РПУ N , дБм

$$N = -174 + 10 \lg(B_R) + NF$$

Здесь B_R – ширина полосы приемника, предшествующая демодулятору, Гц (полоса наиболее узкополосного тракта ПЧ); NF – коэффициент шума приемника, дБ.

Оценить дальность d , км, связи БПЛА с ПУ для сигнала ППРЧ в нисходящей линии можно, используя выражение

$$d = 10^{(P_T(f_{0R}) + G_{0T} + G_{0R} - I_1 - (S/I)_{\text{заш}} - 20 \lg(f_{0R}) - 32,4) / 20} \quad (15)$$

Максимальная дальность связи соответствует ситуации, когда внешняя помеха отсутствует. Выражение (15) определяет дальность связи между БПЛА и ПУ при наличии помехи I_1 и когда помехой является только собственный шум приемника, тем самым определяя изменение дальности связи из-за помехи.

В ситуациях РПД БПЛА → РПУ РЭС и РПД ПУ → РПУ РЭС уровень полезного сигнала на входе приемника РЭС неизвестен. Поэтому влияние помехи на рабочую характеристику системы можно

охарактеризовать значением снижения чувствительности РПУ под действием помехи.

Снижение чувствительности приемника ΔP_R , дБ, оценим, используя уравнение

$$\Delta P_R = -10 \lg(1 + i/n),$$

где i и n соответственно мощности помехи и шума приемника, приведенные к входу приемника, мВт.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена процедура, позволяющая оценить ЭМС структуры ПУ–БПЛА с окружением в виде стационарных РЭС, содержащих радиоприемные устройства и радиопередатчики. Особое внимание уделено определению областей взаимодействия ДНА радиоприемных устройств и радиопередатчиков, потенциальных источников помех. Предложены критерии для оценки степени влияния излучений передатчиков на качество приема полезных сигналов радиоприемными устройствами, размещенными на БПЛА, в ПУ и входящими в состав наземных РЭС. Оценка выполнена с использованием детерминистских моделей. Процедура позволяет на этапе планирования провести анализ предполагаемых траекторий полета БПЛА и выбрать наиболее подходящий маршрут или оценить уже намеченный маршрут на предмет возможных помех и вероятности решения намеченной задачи с использованием БПЛА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Антипин Б.М., Виноградов Е.М., Туманова Е.И. Оценка влияния непреднамеренных помех на линию вверх канала управления беспилотного летательного аппарата // Доклады АН ВШ РФ. 2023. № 4 (61). С. 18–33. doi: 10.17212/1727-2769-2023-4-18-33
- [2] Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. Составитель Д.Р.Ж. Уайт. Джермантаун, Мериленд, 1971–1973. Вып. 1.
- [3] Виноградов Е.М. Анализ электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010.
- [4] ECC Report 252 SEAMCAT Handbook. Edition 2. Approved 29 April 2016.
- [5] Рек. МСЭ-R P.1546-6 Метод прогнозирования для трасс связи пункта с зоной для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 4000 МГц.
- [6] Рек. МСЭ-R P.452-17 Процедура прогнозирования для оценки помех между станциями, находящимися на поверхности Земли, на частотах выше приблизительно 0,1 ГГц.
- [7] Рек. МСЭ-R SM.337-6 Частотный и территориальный разнос.