

УДК 621.396.7

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ РАДИООБОРУДОВАНИЯ ПУНКТА УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНОЙ АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ СО СТАЦИОНАРНЫМИ НАЗЕМНЫМИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫМИ СРЕДСТВАМИ

Б.М. Антипин, Е.М. Виноградов, Е.И. Туманова, О.Б. Мункуева
*Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича*

Рассмотрена процедура расчета электромагнитной совместимости радиооборудования пункта управления (ПУ) беспилотным воздушным судном (БВС), содержащим радиопередатчик (РПД) и радиоприемное устройство (РПУ), с окружением наземных стационарных радиоэлектронных средств (РЭС), в состав которых входят РПД и/или РПУ. Процедура включает анализ влияния помех от передатчиков окружения на прием сигнала БВС приемником ПУ и влияние излучения передатчика ПУ на прием сигналов приемниками РЭС, окружающими ПУ. Предполагается, что как в линии вверх, так и в линии вниз используются сигналы с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ). Для оценки влияния помех от передатчиков окружения на качество приема сигнала приемником ПУ используется защитное отношение. При оценке влияния излучений передатчика ПУ на работу радиоприемных устройств окружения оценивается ухудшение чувствительности приемника, вызванное помехой.

Ключевые слова: беспилотное воздушное судно, электромагнитная совместимость, псевдослучайная перестройка рабочей частоты, защитное отношение, ухудшение чувствительности приемника.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-3-7-24

Введение

Беспилотная авиационная система (БАС) состоит из двух основных структурных элементов: беспилотного воздушного судна (БВС), которое называют также беспилотным летательным аппаратом (БЛА) [1], и пункта управления (ПУ). ПУ является стационарным элементом БАС, по крайней мере, в течение сеанса работы БАС. Основными задачами ПУ являются передача сигналов управления оборудованию БВС и прием информации, передаваемой на ПУ с борта БВС. Минимальный состав радиооборудования ПУ включает радиопередатчик (РПД) и радиоприемное устройство (РПУ), которые совместно решают эти задачи.

Работа радиотехнического оборудования БАС обычно происходит в сложной электромагнитной обстановке (ЭМО), создаваемой излучениями электротехнического, радиоэлектронного и радиотехнического оборудования окружения. Однако для радиоприемника, осуществляющего прием сигналов от определенного передатчика, источником помехи обычно служит другой передатчик, особенно когда речь идет о полосах частот, используемых БАС. Гражданские БАС достаточно широко используют частоты в окрестности 2,4 и 5,8 ГГц. Причем одна из них (обычно 5,8 ГГц) используется на линии ПУ→БВС, а другая (2,4 ГГц) на линии БВС→ПУ. Полоса частот 5850–6425 МГц входит в состав официального частот-

Статья подготовлена в рамках прикладных научных исследований СПбГУТ, регистрационный номер 124040300004-8 в ЕГИСУ НИОКТР.

© 2024 Б.М. Антипин, Е.М. Виноградов, Е.И. Туманова, О.Б. Мункуева

ного ресурса БАС в Российской Федерации. Полоса частот 2400–2483,5 МГц является нелицензированной полосой радиочастот, используемой БАС и рекомендованной ГКРЧ [2] для устройств малого радиуса действия, в том числе для устройств, использующих псевдослучайную перестройку рабочей частоты (ППРЧ). В БАС гражданского применения как в линии вверх, так и в линии вниз используются сигналы ППРЧ. Если обратиться к Таблице распределения полос частот [3], то можно обнаружить, что источниками помех в полосах в окрестности частоты 2,4 ГГц будут радиопередатчики, принадлежащие подвижной, радиолокационной и фиксированной службам. Соответственно в этих полосах частот располагаются и приемные устройства этих радиослужб. Что касается частоты 5,8 ГГц, то здесь источники радиопомех и приемники радиосигналов принадлежат также фиксированной и радиолокационной службам, а также фиксированной спутниковой службе.

Радиотехническое оборудование ПУ работает в окружении наземных радиоэлектронных средств (РЭС), в состав которых входят как радиопередатчики, так и радиоприемные устройства. Передатчики РЭС могут создавать помехи приемнику ПУ, а приемники РЭС могут испытывать помеху от передатчика ПУ. Возникает проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) радиотехнического оборудования ПУ с окружением. Оценка ЭМС включает два этапа:

- анализ и оценка влияния помех от окружающих РПД на работу и качество приема полезного сигнала приемником ПУ;
- анализ и оценка влияния излучений передатчика ПУ на работу РПУ РЭС, окружающих ПУ.

Целью настоящей работы является процедура анализа ЭМС радиоаппаратуры ПУ с окружающими РЭС. Решение этой задачи рассмотрим при определенных ограничениях.

Гражданские БВС работают в условиях города, пригородной или сельской местности. При анализе ЭМС эти различия приводят к необходимости использовать разные модели для оценки потерь на трассах распространения как для полезного сигнала, так и для помех. В дальнейшем в окружении ПУ будем рассматривать только наземные стационарные РЭС в условиях сельской местности. При оценке влияния внешней помехи на качество приема полезного сигнала не рассматриваются нелинейные эффекты в РПУ ПУ и РЭС.

1. Анализ влияния помех от передатчиков РЭС, окружающих ПУ, на качество приема полезного сигнала приемником пункта управления

1.1. Исходные данные для анализа

По умолчанию координаты рассматриваемых объектов имеют северную широту и восточную долготу. Поэтому напрямую в обозначениях координат этот факт не отражается.

Координаты антенны приемника ПУ:

- широта η_R , град.;
- долгота φ_R , град.;
- высота подъема антенны над землей h_R .

Координаты антенны i -го передатчика, источника помех:

- широта η_{Ti} , град.;
- долгота φ_{Ti} , град.;
- высота подъема антенны над землей h_{Ti} .

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 . В этой области коэффициент усиления антенны принимаем равным максимальному значению усиления G_0 , указанному в спецификации антенны. Остальная область ДНА – это область БЛ.

Данные о положении ГЛ ДНА РПД и РПУ, окружающих ПУ:

- азимутальное направление ГЛ ДНА φ : $0^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$;
- угломестное направление ГЛ ДНА θ : $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$;
- ширина ГЛ ДНА в горизонтальной плоскости α ;
- ширина ГЛ ДНА в вертикальной плоскости β .

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

Текущие координаты БВС (летательного аппарата):

- широта $\eta_{\text{ЛА}}$, град.;
- долгота $\varphi_{\text{ЛА}}$, град.;
- высота антенны БВС над землей $h_{\text{ЛА}}$.

Индексы параметров и переменных, используемые в дальнейших 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;

i – номер рассматриваемого объекта;

ЛА – параметр или переменная относится к БВС (летательному аппарату).

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

Параметры РПУ ПУ:

- рабочая частота РПУ f_{0R} , МГц;
- вид модуляции сигнала БВС: ППРЧ;
- ширина полосы частот, занимаемая сигналом ППРЧ B_S , МГц;
- число каналов сигнала ППРЧ M ;
- ширина полосы пропускания тракта промежуточной частоты (ПЧ) РПУ B_R , МГц;
- коэффициент прямоугольности тракта ПЧ РПУ P_p по уровню p , дБ;
- коэффициент шума приемника NF , дБ.

Параметры РПД i -го РЭС:

- рабочая частота РПД f_{Ti} , МГц;
- мощность РПД P_{Ti} , дБм;
- ширина спектра излучения РПД B_{Ti} , МГц.

Защитное отношение $(S/I)_{\text{защ}}$, дБ.

Допустимое число пораженных частот (каналов) сигнала $J_{\text{доп}}$.

1.2. Отбор источников помех

Отбор выполняется по расстоянию от ПУ и по частоте [4].

Отбор по расстоянию. Источник помехи (передатчик РЭС) считается потенциально опасным, если он располагается в пределах радиогоризонта приемника ПУ. Предполагая Землю сферической, расстояние d_{Rpr} до радиогоризонта РПУ пункта управления

$$d_{\text{Rpr}} = 4,12\sqrt{h_R}. \quad (1)$$

Угол, образованный в центре Земли трассой между ПУ и точками радиогоризонта,

$$\delta_R = \arctg(d_{Rpr} / R_3),$$

где $R_3 = 8500$ км – эквивалентный радиус Земли.

Длина дуги большого круга между точкой, где размещается ПУ, и точками радиогоризонта

$$l_R = \delta_R R_3.$$

Здесь R_3 – средний радиус Земли, $R_3 = 6375$ км.

Угол, образованный в центре Земли трассой между ПУ и точкой размещения передатчика T_i ,

$$\delta_{Ti} = \arccos(\sin(\eta_{Ti})\sin(\eta_R) + \cos(\eta_{Ti})\cos(\eta_R)\cos(\alpha_{Ti} - \alpha_R)).$$

Углы δ_R и δ_{Ti} должны быть выражены в радианах. Расстояние между ПУ и передатчиком T_i по дуге большого круга

$$l_{Ti} = \delta_{Ti} R_3.$$

Излучение передатчика T_i подлежит анализу по критерию расстояния между ПУ и РПД T_i , если

$$l_{Ti} \leq l_R. \quad (2)$$

Отбор по частоте. Полоса частот, занимаемая сигналом ППРЧ, простирается в границах $(f_{\min}, f_{\max}) = (f_{0R} - B_S / 2, f_{0R} + B_S / 2)$. Эту полосу занимают M каналов. Ширина полосы B_R , занимаемая одним каналом (с учетом защитных интервалов), согласована с полосой РПУ ПУ и составляет

$$B_R = B_S / M.$$

Центральные частоты, по которым происходит перестройка сигнала:

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

Процесс частотного отбора состоит в выборе из передатчиков, прошедших отбор по дальности, тех из них, частоты которых f_{Ti} удовлетворяют неравенству

$$f_{0R} - B_S / 2 \leq f_{Ti} \leq f_{0R} + B_S / 2.$$

Пусть таких РПД будет k , т. е. $i = 1, 2, \dots, k$. При анализе воздействия излучений передатчиков РЭС на приемник ПУ ограничимся рассмотрением помех по основному и двум соседним каналам приема приемника ПУ. Поэтому для каждой из частот $f_{Ti} (i = 1, 2, \dots, k)$ находим подмножество частот $f_j (j = 1, 2, \dots, m)$, отстройки между которыми Δf_{ij} отличаются не более чем на $2,5B_R$, т. е.

$$\Delta f_{ij} = |f_{Ti} - f_j| \leq 2,5B_R. \quad (3)$$

Поскольку j -му элементу (каналу) ППРЧ сигнала может создавать помеху несколько передатчиков, для каждой из частот передатчиков f_{Ti} формируется

некоторое множество значений отстроек Δf_{ij} . Отобранные частоты f_{Ti} и их отстройки от элементов ППРЧ сигнала подлежат дальнейшему анализу на предмет их действительного влияния на качество приема полезного сигнала.

Для дальнейшего анализа перейдем к рассмотрению ситуации в декартовой системе координат.

Переход к декартовой системе координат. При переходе пункт управления будем считать точкой начала координат в плоскости xOy , а высота антенны приемника будет координатой на оси h , перпендикулярной плоскости xOy в точке, где размещается ПУ. Так что теперь координатами ПУ будут

$$(x_R, y_R, h_R) = (0, 0, h_R).$$

Часть поверхности, на которой располагаются ПУ и отобранный передатчик T_i , а также направление осей декартовой системы координат представлены на рис. 1, а, а на рис. 1, б приведено определение координаты x_{Ti} .

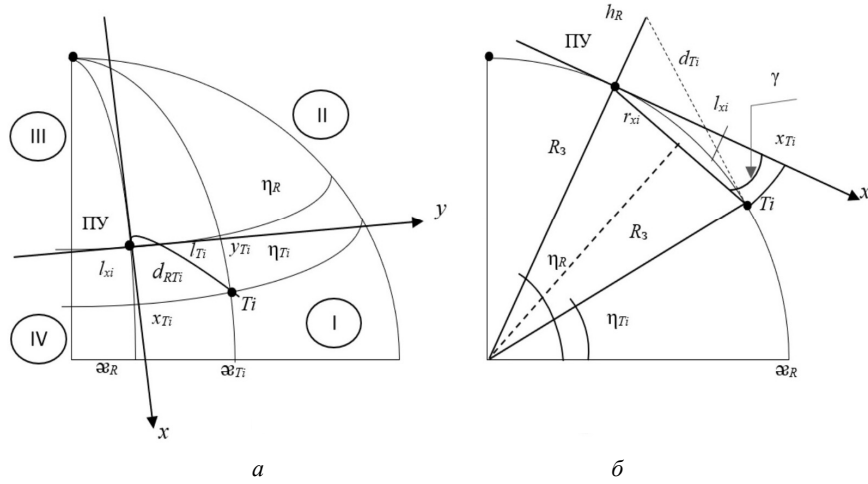


Рис. 1 – Определение декартовых координат передатчика T_i , потенциального источника помехи

Fig. 1. – Finding of Cartesian coordinates of a transmitter T_i , a probable interferer

Как следует из рис. 1, б, длина дуги l_{xi} , соединяющей точку расположения ПУ и точку пересечения меридиана ПУ и параллели η_{Ti} , составляет

$$l_{xi} = R_3(\eta_R - \eta_{Ti})(\pi/180), \text{ км.} \quad (4)$$

Длина хорды r_{xi} , соединяющей эти точки, равна

$$r_{xi} = 2R_3 \sin[(\eta_R - \eta_{Ti})/2].$$

Координаты ПУ и РПД T_i в исходных данных определены в градусах. Выражая аргумент синуса в радианах, получим

$$r_{xi} = 2R_3 \sin\left(\frac{\eta_R - \eta_{Ti}}{2} \frac{\pi}{180}\right), \text{ км.} \quad (5)$$

Учитывая, что угловое расстояние между рассматриваемыми объектами не превышает градуса, можно считать, что при таких значениях углов, выраженных в радианах, $\sin(\delta) \approx \delta$, и тогда, как следует из (4) и (5), $r_{xi} = l_{xi}$.

Ось x является проекцией меридиана, на котором находится ПУ, на плоскость xOy . При определении координаты x_{Ti} нужно в новых координатах сохранить значение расстояния d_{Ti} . Из рис. 1, б следует

$$d_{Ti}^2 = h_R^2 + r_{xi}^2 - 2h_R r_{xi} \cos(90 + \gamma).$$

Поскольку разность $(\eta_R - \eta_{Ti})$ значительно меньше градуса, а $\gamma = (\eta_R - \eta_{Ti})/2$, найдем, что $\cos(90 + \gamma) \approx \cos(90^\circ) = 0$, так что, с одной стороны, учитывая, что $r_{xi} = l_{xi}$, получим $d_{Ti}^2 = h_R^2 + r_{xi}^2 = h_R^2 + l_{xi}^2$. С другой стороны, сохраняя в декартовой системе координат высоту антенны ПУ h_R и расстояние d_{Ti} по оси x , получим $d_{Ti}^2 = h_R^2 + x_{Ti}^2$. Сравнивая приведенные значения d_{Ti} , найдем

$$x_{Ti} = r_{xi} = l_{xi}.$$

Для получения координаты y_{Ti} найдем, используя (3), значение l_{Ti} . Аналогично x_{Ti} определим, что d_{RTi} – расстояние между ПУ и T_i в плоскости xOy – с достаточной точностью равно

$$d_{RTi} = l_{Ti}. \quad (6)$$

При указанном на рис. 1, а направлении осей координат x и y , указанной нумерации квадрантов и принятом отсчете значений широты и долготы связь между номером квадранта и координатами передатчика в географической и декартовой системах координат дает табл. 1. Используя табл. 1, найдем квадрант, в котором располагается анализируемый передатчик.

Таблица 1 / Table 1

Связь координат передатчиков с номером квадранта, в котором находится передатчик

The relations between transmitter coordinates and the number of quadrant where the transmitter is located

Квадрант/ Quadrant	Исходные координаты РПД / Initial coordinates of transmitter	Знаки декартовых координат / Cartesian coordinate signs
I	$\eta_{Ti} \leq \eta_R, \ \varphi_{Ti} \geq \varphi_R$	$x_{Ti} \geq 0, \ y_{Ti} \geq 0$
II	$\eta_{Ti} > \eta_R, \ \varphi_{Ti} \geq \varphi_R$	$x_{Ti} < 0, \ y_{Ti} \geq 0$
III	$\eta_{Ti} > \eta_R, \ \varphi_{Ti} < \varphi_R$	$x_{Ti} < 0, \ y_{Ti} < 0$
IV	$\eta_{Ti} \leq \eta_R, \ \varphi_{Ti} < \varphi_R$	$x_{Ti} \geq 0, \ y_{Ti} < 0$

Теперь

$$y_{Ti} = \begin{cases} \sqrt{d_{RTi}^2 - x_{Ti}^2}, & \text{если РПД в I или II квадранте,} \\ -\sqrt{d_{RTi}^2 - x_{Ti}^2} & \text{если РПД в III или IV квадранте.} \end{cases} \quad (7)$$

1.3. Определение областей взаимодействия ДНА РПУ ПУ и РПД T_i

Области ДНА, через которые РПД излучает, а РПУ принимает внешние сигналы, влияют на уровни сигналов, поступающих в РПУ. 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.

Углы, под которыми в вертикальной плоскости ДНА i -го РПД РЭС и РПУ ПУ «видят» друг друга с учетом принятых направлений отсчета (рис. 2), связаны между собой, а именно:

$$\Delta_{Ti} = -\Delta_R.$$

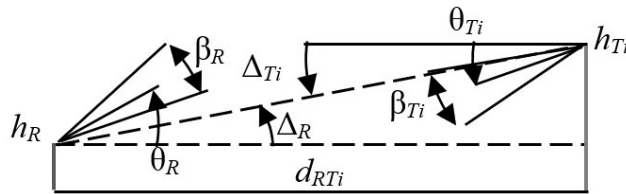


Рис. 2 – Определение областей взаимодействия ДНА РПД РЭС и РПУ ПУ в вертикальной плоскости

Fig. 2 – Finding of the interaction areas between transmitter and receiver antenna patterns in the vertical plane

Числовое значение углов определяет выражение

$$\Delta_R = \arctg \left(\frac{h_{Ti} - h_R}{d_{RTi}} \right). \quad (8)$$

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

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

то ГЛ ДНА РПД i -го РЭС направлен на ПУ. Если неравенство (9) не выполняется, то ДНА РПД i -го РЭС направлена на ПУ боковым лепестком. Если антенна РПД i -го РЭС имеет направленную ДНА в горизонтальной плоскости ($\alpha_{Ti} < 360^\circ$) и выполняется неравенство (9), то необходим дальнейший анализ взаимодействия диаграмм направленности исследуемых объектов в горизонтальной плоскости.

ПУ имеет всегда направленную антенну, ГЛ которой направлен на БПЛА. Поэтому

$$\theta_R = \arctg \left(\frac{h_{ЛА} - h_R}{d_{ЛА}} \right),$$

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

Здесь $h_{ЛА}$ – высота полета летательного аппарата, а $x_{ЛА}$, $y_{ЛА}$ – координаты аппарата на плоскости xOy , которые при известных географических координатах БВС $\eta_{ЛА}$ и $\varphi_{ЛА}$ вычисляются аналогично x_{Ti} и y_{Ti} , а именно:

$$x_{\text{ЛА}} = r_{x\text{ЛА}} = 2R_3 \cdot \sin[(\eta_R - \eta_{\text{ЛА}}) / 2] \text{ км},$$

$$\delta_{\text{ЛА}} = \arccos(\sin(\eta_{\text{ЛА}}) \cdot \sin(\eta_R) + \cos(\eta_{\text{ЛА}}) \cos(\eta_R) \cos(\alpha_{\text{ЛА}} - \alpha_R)),$$

$$d_{\text{ЛА}} = l_{\text{ЛА}} = R_3 \delta_{\text{ЛА}},$$

$$y_{\text{ЛА}} = \begin{cases} \sqrt{d_{\text{ЛА}}^2 - x_{\text{ЛА}}^2}, & \text{если БАС в I или II квадранте,} \\ -\sqrt{d_{\text{ЛА}}^2 - x_{\text{ЛА}}^2} & \text{если БАС в III или IV квадранте.} \end{cases}$$

Теперь, если не выполняется неравенство

$$\theta_R - \beta_R / 2 \leq \Delta_R \leq \theta_R + \beta_R / 2, \quad (10)$$

то ДНА приемника ПУ направлена на РЭС боковым лепестком. Если неравенство (10) выполняется, то необходим дальнейший анализ взаимодействия диаграмм направленности исследуемых объектов в горизонтальной плоскости.

На рис. 3 представлено одно из возможных расположений главных лепестков диаграмм направленности антенн ПУ, РПД T_i и местоположения БВС в плоскости xOy . Из рис. 3 найдем значения углов:

$$\psi_1 = \arctg(y_{\text{ЛА}} / x_{\text{ЛА}}), \quad (11)$$

$$\psi_2 = \arctg(y_{Ti} / x_{Ti}). \quad (12)$$

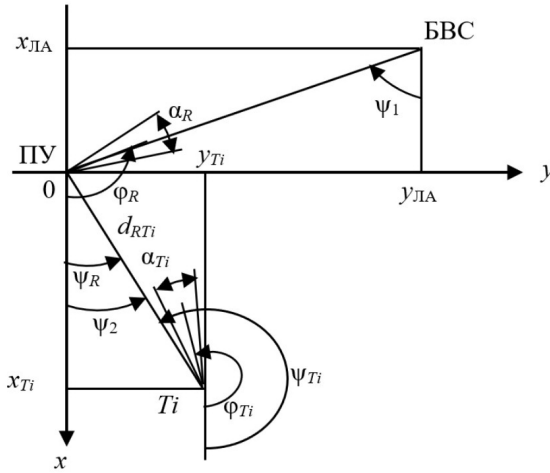


Рис. 3 – Определение областей взаимодействия ДНА РПД T_i и РПУ ПУ в горизонтальной плоскости

Fig. 3. – Finding of the interaction areas between transmitter and receiver antenna patterns in the horizontal plane

Обозначим: ϕ_R – угол, под которым из ПУ видна проекция БВС на горизонтальную плоскость; ψ_R – угол в горизонтальной плоскости, под которым из ПУ виден РПД T_i ; ψ_{Ti} – угол в горизонтальной плоскости, под которым из T_i виден ПУ.

Все углы отсчитываются от оси x , проведенной в горизонтальной плоскости через точку расположения соответствующего объекта в этой плоскости, как показано на рис. 3.

Теперь ГЛ ДНА T_i направлен на ПУ, если

$$\varphi_{Ti} - \alpha_{Ti} / 2 \leq \psi_{Ti} \leq \varphi_{Ti} + \alpha_{Ti} / 2. \quad (13)$$

а ГЛ ДНА приемника ПУ направлен на РПД T_i , если

$$\varphi_R - \alpha_R / 2 \leq \psi_R \leq \varphi_R + \alpha_R / 2. \quad (14)$$

Если неравенства (13), (14), оба или одно из них, не выполняются, то соответствующая ДНА направлена на другой объект боковым лепестком.

Значения углов φ_R , ψ_R , ψ_{Ti} через значения ψ_1 и ψ_2 , полученных с использованием (11) и (12), представлены в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

Углы в плоскости xOy , связывающие ПУ, РПД РЭС и БВС

Angles in the xOy plane associated with the control point, transmitter and unmanned aircraft

$x > 0$			
$y > 0$, квадрант I		$y < 0$, квадрант IV	
ПУ $\rightarrow$ БВС	ПУ $\leftrightarrow T_i$	ПУ $\rightarrow$ БВС	ПУ $\leftrightarrow T_i$
$\psi_R = \psi_1$	$\psi_R = \psi_2$	$\psi_R = 360^\circ + \psi_1$	$\psi_R = 360^\circ + \psi_2$
	$\psi_{Ti} = 180^\circ + \psi_2$		$\psi_{Ti} = 180^\circ + \psi_2$
$x < 0$			
$y > 0$, квадрант II		$y < 0$, квадрант III	
ПУ $\rightarrow$ БВС	ПУ $\leftrightarrow T_i$	ПУ $\rightarrow$ БВС	ПУ $\leftrightarrow T_i$
$\psi_R = 180^\circ + \psi_1$	$\psi_R = 180^\circ + \psi_2$	$\psi_R = 180^\circ + \psi_1$	$\psi_{Ti} = 180^\circ + \psi_2$
	$\psi_{Ti} = 360^\circ + \psi_2$		$\psi_{Ti} = \psi_2$

РПД T_i и БВС могут находиться в разных квадрантах. Это обстоятельство нужно учитывать при определении углов φ_R , ψ_R , ψ_{Ti} . Так, если РПД T_i находится в квадранте IV, а БВС в квадранте II, то $\varphi_R = 180^\circ + \psi_1$ (квадрант II), а $\psi_R = 360^\circ + \psi_2$, $\psi_{Ti} = 180^\circ + \psi_2$ (квадрант IV, здесь $\psi_2 < 0$). Заметим, что если $\psi_{R/Ti}(\varphi_R) = 360^\circ + \psi_2(\psi_1)$ и $\psi_{2/1} \geq 0$, то $\psi_{R/Ti}(\varphi_R) = \psi_2(\psi_1)$.

Используя табл. 2 и неравенства (13), (14) определяем области взаимодействия ДНА РПУ ПУ и РПД T_i .

1.4. Оценка потерь на трассе распространения

В самом общем случае потери на трассе РПД $T_i \rightarrow$ РПУ ПУ составляют L , дБ, где

$$L = L_{св} + L_{диф} + L_{раст} + L_{газ}, \quad (15)$$

здесь $L_{св}$ – потери при распространении в свободном пространстве, дБ; $L_{диф}$ – потери на дифракцию радиоволн на сферической земле, дБ; $L_{раст}$ – потери, связанные с поглощением радиоволн растительностью, дБ; $L_{газ}$ – потери, связанные с поглощением радиоволн газами атмосферы, дБ.

Как следует из графиков, приведенных в [5], погонное затухание электромагнитных волн в газах атмосферы $L_{газ}$ в области частот 5...6 ГГц составляет от 0,01 до 0,03 дБ/км и убывает с уменьшением частоты. Это позволяет в пределах дальностей до радиогоризонта, где по результатам отбора потенциально опасных передатчиков располагаются источники возможных помех, для частот, используемых гражданскими БАС, пренебречь потерями $L_{газ}$.

В настоящее время отсутствуют универсальные процедуры прогнозирования ослабления радиоволн растительностью. Некоторые модели, применимые в конкретных диапазонах частот и при определенных типах растительности, представлены в [6]. Как следует из [6], погонное ослабление, обусловленное лесистой местностью, в полосе частот от 1 до 6 ГГц составляет от 0,2 до 1,5 дБ/м. При значительных размерах лесных массивов между источником возможной помехи (РПД) и РПУ ПУ это обеспечивает достаточную развязку приемника от помехи. Помеха в этом случае может возникать в результате дифракции излучения передатчика на лесном массиве. При отсутствии необходимых данных для оценки ослабления растительностью $L_{раст}$ этим слагаемым часто пренебрегают, особенно, если окружение ПУ представляет собой открытую местность, лишенную древесных массивов. Это несколько увеличивает уровень помехи. Ситуация, характерная для анализа ЭМС.

Потери на дифракцию $L_{диф}$ рассчитывают, используя [7]. Рекомендация позволяет оценить потери на дифракцию для различных видов препятствий, в том числе на сферичность Земли.

Потери при распространении в свободном пространстве $L_{св}$, дБ, являются составляющей всех видов распространения радиоволн и основными на трассе ПУ ↔ БВС.

$$L_{св} = 32,45 + 20 \lg(f[\text{МГц}]) + 20 \lg(d[\text{км}]). \quad (16)$$

1.5. Оценка уровня помехи на входе РПУ ПУ и ее влияния на прием полезного сигнала

Эквивалентная мощность мешающего сигнала I_{ij} с частотой f_{Ti} , приведенная ко входу приемника на частоте его настройки f_{0R} , дБм, создаваемая элементу ППРЧ сигнала, имеющего частоту f_j , составляет

$$I_{ij}(f_{0R}) = P_{Ti}(f_{Ti}) + G_{TR}(f_{Ti}) + G_{RT}(f_{Ti}) - L(f_{Ti}) - \gamma - CF(\Delta f_{ij}), \quad (17)$$

где $P_{Ti}(f_{Ti})$ – мощность передатчика i -го РЭС на частоте f_{Ti} , дБм; $G_{TR}(f_{Ti})$, $G_{RT}(f_{Ti})$ – коэффициенты усиления антенн на частоте f_{Ti} соответственно, антенны передатчика в направлении на приемник и антенны приемника в направлении на передатчик, дБи; $L(f_{Ti})$ – потери в пространстве распространения на частоте f_{Ti} , дБ; γ – потери из-за несовпадения поляризаций приходящей электромагнитной волны и приемной антенны, дБ; $CF(\Delta f_{ij})$ – коэффициент частот-

ной коррекции, учитывающий ослабление помехи из-за ее отстройки от частоты полезного сигнала и соотношения ширины спектра помехи и ширины полосы пропускания приемника, дБ; Δf_{ij} – отстройка между частотами f_{Ti} и f_i , удовлетворяющая (3).

Результаты оценки областей взаимодействия ДНА РПД РЭС и ДНА РПУ ПУ определяют выбор коэффициентов усиления их антенн. Коэффициент усиления антенны по ГЛ принимают равным максимальному значению усиления G_0 , указанному в спецификации соответствующей антенны. В области бокового усиления используют статистические параметры антенн, представленные в табл. 3 [8, 9]. Усиление по боковым лепесткам ДНА принимают равным среднему значению m_G плюс среднеквадратическое отклонение σ_G с учетом поляризации взаимодействующих антенн по ГЛ их ДНА.

Таблица 3 / Table 3

Статистические параметры антенн в области бокового усиления

Antenna gain in the area of side lobes

Коэффициент усиления антенны/Antenna gain	Поляризация/Polarization	m_G , дБи/dBi	σ_G , дБ/dB
$G_0 > 25$ дБи/dBi	Любая/Any	–10	14
$10 < G_0 \leq 25$ дБи/dBi	Рабочая/Operating	–10	11
	Ортогональная/Orthogonal	–20	13
$10 < G_0 \leq 25$ дБи/dBi	Рабочая/Operating	0	6
	Ортогональная/Orthogonal	–13	8

Потери на трассе РПД T_i – ПУ оценивают, используя (15) и модели слагаемых этого выражения, как описано выше.

Потери γ из-за несовпадения поляризаций приходящей электромагнитной волны и приемной антенны оценивают только в том случае, если взаимодействие ДНА РПУ и ДНА РПД T_i происходит по главным лепесткам их ДНА. Значение потерь в децибелах для наиболее часто используемых видов поляризации представлены в табл. 4 [8, 9].

Таблица 4/ Table 4

Ослабление сигналов при несовпадении поляризации с приемной антенной

Signal attenuation due to polarization with receiving antenna

Поляризация антенны приемника/ Receiver antenna polarization		Поляризация антенны источника помехи/ Interference source antenna polarization					
		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

Коэффициент частотной коррекции $CF(\Delta f_{ij})$ можно представить в виде [9]

$$CF(\Delta f_{ij}) = CF_1 + CF_2(\Delta f_{ij}), \quad (18)$$

где CF_1 определяет ослабление помехи в РПУ, если полоса частот, занимаемая мешающим сигналом, превышает ширину полосы пропускания приемника, а $CF_2(\Delta f_{ij})$ определяет ослабление за счет отстройки помехи от частоты настройки РПУ. В качестве математических моделей слагаемых выражения (18) используются

$$CF_1 = \begin{cases} 0, & \text{если } B_S \leq B_R; \\ 10 \lg(B_S / B_R), & \text{если } B_S > B_R. \end{cases} \quad (19)$$

$$CF_2(\Delta f_{ij}) = \begin{cases} 0, & \text{если } |\Delta f_{ij}| \leq B_R / 2; \\ \rho \frac{\lg(2|\Delta f_{ij}| / B_R)}{\lg(\Pi_\rho)}, & \text{если } |\Delta f_{ij}| > B_R / 2, \end{cases} \quad (20)$$

где Π_ρ – коэффициент прямоугольности тракта ПЧ приемника по уровню ρ .

Обычно для тракта промежуточной частоты в спецификациях РПУ указывают $\rho = 60$ дБ. Если выражение (20) дает значение больше, чем 100 дБ, то принимаем $CF_2(\Delta f_{ij}) = 100$ дБ.

Если имеется k передатчиков, создающих помехи приему j -го элемента полезного сигнала, то общая внешняя помеха этому элементу, приведенная ко входу РПУ, составит

$$I_j(f_{0R}) = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^k 10^{I_{ij}(f_{0R})/10} \right), \text{ дБм.} \quad (21)$$

Мощность полезного сигнала $S(f_{0R})$ для конкретного положения БВС относительно ПУ

$$S(f_{0R}) = P_T(f_{0R}) + G_{0T} + G_{0R} - L(f_{0R}, d), \text{ дБм,} \quad (22)$$

где d – расстояние между БВС и ПУ:

$$d = \sqrt{x_{\text{ЛА}}^2 + y_{\text{ЛА}}^2 + (h_{\text{ЛА}}^2 - h_R^2)},$$

а координаты летательного аппарата $x_{\text{ЛА}}$, $y_{\text{ЛА}}$ определяются аналогично координатам x_{Ti} , y_{Ti} .

При оценке мощности полезного сигнала потери $L(f_{0R}, d)$ на трассе БВС→ПУ рассматриваются как потери в свободном пространстве (16).

Для оценки качества принимаемого элемента ППРЧ сигнала используем защитное отношение, установленное для сигналов, имеющих модуляцию несущей аналогичную модуляции элементов сигнала ППРЧ.

С этой целью для каждого значения j , подверженного воздействию помехи, вычисляем отношение $(S/I_j) = S(f_{0R}) - I_j(f_{0R})$, дБ, и сравниваем его с защитным отношением $(S/I)_{\text{защ}}$ для данного вида полезного сигнала. Если

$(S/I_j) < (S/I)_{\text{защ}}$, то j -й канал (частота f_j) ППРЧ сигнала поражен помехой и качество элементов ППРЧ сигнала, принимаемого по этому каналу, недопустимо низкое. Вычисляем общее число J пораженных каналов. Если $J > J_{\text{доп}}$, то помеха недопустимо снижает качество принимаемого сигнала.

2. Анализ влияния помех от передатчика ПУ на качество приема полезного сигнала приемниками РЭС, окружающими пункт управления

Анализ происходит во многом аналогично разделу 1, но теперь имеется только один источник помех, передатчик, размещенный в ПУ, и множество потенциальных жертв излучений этого передатчика, приемников, окружающих ПУ. Поскольку в рассматриваемой ситуации, как правило, нет возможности оценить уровень полезного сигнала на входе каждого из рассматриваемых приемников, то для оценки влияния помехи на качество работы РПУ используется значение допустимого ухудшения чувствительности приемника при действии на его входе внешней помехи.

2.1. Исходные данные для анализа

Координаты антенны передатчика ПУ, источника помех:

- широта η_T , град.;
- долгота α_T , град.;
- высота подъема антенны над землей h_T .

Поскольку передатчик и приемник ПУ находятся на одном объекте, можно считать $\eta_T = \eta_R$ и $\alpha_T = \alpha_R$.

Координаты антенны приемника-жертвы i -го РЭС:

- широта η_{Ri} , град.;
- долгота α_{Ri} , град.;
- высота подъема антенны над землей h_{Ri} .

Данные о положении главных лепестков диаграмм направленности и поляризации антенн приемников, окружающих ПУ, аналогичны данным для антенн радиопередатчиков, рассмотренным ранее. Это же относится к текущим координатам БВС и индексации параметров и переменных, используемых в дальнейших расчетах.

Параметры РПУ i -го РЭС:

- рабочая частота РПУ f_{0Ri} , МГц;
- чувствительность РПУ P_{Ri} , дБм;
- ширина полосы пропускания тракта промежуточной частоты (ПЧ) РПУ B_{Ri} , МГц;
- коэффициент шума приемника NF_i , дБ.

Параметры РПД ПУ:

- рабочая частота f_{0T} , МГц;
- мощность P_T , дБм;
- ширина полосы частот, занимаемая сигналом ППРЧ B_S , МГц;
- число каналов сигнала ППРЧ M .

Допустимое ухудшение чувствительности РПУ i -го РЭС ΔP_{Ri} , дБ.

2.2. Отбор приемников, потенциальных жертв помех от излучений РПД ПУ

Отбор выполняется по расстоянию от ПУ и по частоте.

Отбор по расстоянию. Источник помехи (передатчик ПУ) считается потенциально опасным, если РПУ РЭС располагается в пределах радиогоризонта РПД ПУ. Отбор выполняется с использованием процедуры, описанной выражениями в интервале от (1) до (2), с заменой в них индексов R на T , T на R , T_i на R_i и параметров, соответствующих этим индексам.

Отбор по частоте. Сигнал с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ), используемый передатчиком ПУ, занимает обычно очень широкую полосу частот и обладает низкой спектральной плотностью мощности в этой полосе. Учитывая, что восприимчивость РПУ по соседнему и побочным каналам приема на несколько десятков децибел хуже чувствительности приемника, ограничимся рассмотрением помех только по основному каналу приема приемников РЭС, окружающих ПУ. В этом случае рассмотрению подлежат приемники, прошедшие отбор по расстоянию, рабочие частоты которых f_{0Ri} удовлетворяют неравенству

$$f_{0T} - B_S / 2 \leq f_{0Ri} \leq f_{0T} + B_S / 2.$$

Переход к декартовой системе координат. Если разность широт ПУ и РПД T_i выразить в градусах, то

$$x_{Ri} = 2R_3 \sin[(\eta_T - \eta_{Ri}) / 2] \text{ км.}$$

Аналогично, используя (6), (7) и таблицу 1 с заменой в них индексов параметров $R \rightarrow T$, $T \rightarrow R$, $R_i \rightarrow T_i$ и $T_i \rightarrow R_i$, получим координаты отобранных РЭС, содержащих РПУ.

2.3. Определение областей взаимодействия ДНА РПУ ПУ и РПУ R_i

Продолжая сравнение ситуации, рассмотренной ранее в разделе 1 (РПУ ПУ – жертва, передатчики РЭС окружения – источники помех), с рассматриваемой ситуацией (РПД ПУ – источник помех, приемники РЭС окружения – жертвы), найдем, что в настоящей ситуации определение областей взаимодействия интересующих ДНА можно выполнить, используя процедуру, примененную для решения этой задачи в предыдущей ситуации. Получить необходимые соотношения можно, используя указанную выше замену индексов параметров и переменных в выражениях (8)–(14), в табл. 2 и на рис. 2 и 3. Кроме того в пояснениях к полученным таким образом формулам следует также выполнить некоторые замены, соответствующие новой ситуации, именно: РПД $T_i \rightarrow$ РПУ R_i , РПУ ПУ $\rightarrow$ РПД ПУ, РПД i -го РЭС $\rightarrow$ РПУ i -го РЭС, ГЛ ДНА приемника ПУ $\rightarrow$ ГЛ ДНА передатчика ПУ.

2.4. Оценка потерь на трассе распространения

Процедура оценки полностью совпадает с процедурой, рассмотренной в разделе 1.4.

2.5. Оценка степени опасности помехи для РПУ РЭС от передатчика ПУ

Поскольку в исследуемой ситуации рассматриваются помехи только по основному каналу приема, то мощность помехи $I(f_{0Ri})$, дБм, на входе РПУ i -го РЭС может быть вычислена как

$$I(f_{0Ri}) = P_T + 10\lg(B_{Ri} / B_S) + G_{TRi}(f_{0Ri}) + G_{RiT}(f_{0Ri}) - L(f_{0Ri}) - \gamma. \quad (23)$$

Здесь P_T – мощность передатчика ПУ в полосе B_S , дБм; B_{Ri} и B_S – полоса пропускания приемника i -го РЭС и ширина спектра излучения радиопередатчика ПУ соответственно (предполагается $B_{Ri} \leq B_S$); $G_{TRi}(f_{0Ri})$, $G_{RiT}(f_{0Ri})$ – коэффициенты усиления антенн на частоте f_{0Ri} соответственно, антенны передатчика T (ПУ) в направлении на приемник i -го РЭС R_i и антенны приемника R_i в направлении на передатчик T , дБ; $L(f_{0Ri})$ – потери на трассе распространения на частоте f_{0Ri} , дБ; γ – потери из-за несовпадения поляризаций проходящей электромагнитной волны и приемной антенны, дБ.

Значение мощности передатчика ПУ получают из спецификации технических параметров РПД.

Значения коэффициентов усиления антенн выбирают по результатам определения областей взаимодействия их ДНА. Если на интересующий объект направлен главный лепесток ДНА, то коэффициент усиления антенны принимают равным максимальному значению усиления G_0 , указанному в спецификации антенны. В области бокового усиления используют статистические параметры антенн, представленные в табл. 3 [8, 9], с пояснениями, приведенными к таблице.

Значения потерь γ из-за несовпадения поляризаций проходящей электромагнитной волны и приемной антенны в децибелах для наиболее часто используемых видов поляризации представлены в табл. 4. Используются только при взаимодействии антенн по главным лепесткам их диаграмм направленности.

Как отмечалось ранее, поскольку уровень полезного сигнала на входе приемника РЭС неизвестен, то для оценки качества принимаемого сигнала защитное отношение не может быть использовано. Ключевым параметром радиоприемника, влияющим на рабочую характеристику любой системы, в состав которой он входит, является его чувствительность. Поэтому влияние помехи на рабочую характеристику системы можно охарактеризовать значением ухудшения чувствительности РПУ РЭС под действием помехи. Ухудшение чувствительности приемника ΔP_{Rk} , дБ, можно оценить, используя уравнение

$$\Delta P_{Rk} = 10\lg(1 + i / n). \quad (24)$$

где k – номер рассматриваемого приемника, а i и n – соответственно мощности помехи и шума приемника, приведенные ко входу приемника, мВт. Мощность собственного шума РПУ определяет выражение

$$N = -174 + 10\lg(B_R) + NF, \text{ дБм}, \quad (25)$$

где B_R – полоса приемника, Гц; NF – коэффициент шума приемника, дБ. Мощность помехи дает выражение (23). Однако нужно учесть, что (25) и (23) определяют мощности в децибелах относительно милливатта (дБм), а в (24) мощности используются в метрических единицах. Поэтому перед использованием (24) их нужно перевести в милливатты (или ватты). Сравнивая результат, полученный из (24), с допустимым ухудшением чувствительности, заданным в исходных данных, определяют степень опасности помехи, создаваемой излучением передатчика ПУ.

Заключение

Рассмотренная процедура анализа ЭМС радиооборудования ПУ с окружением является составной частью общего алгоритма оценки ЭМС БАС с окружением. Процедура рассматривает в качестве окружения ПУ только стационарные РЭС, расположение которых в регионе, где используется БВС для решения каких-либо народнохозяйственных задач, обычно известно. При выборе места размещения ПУ анализ позволяет из нескольких возможных местоположений ПУ найти наиболее удобное место, в котором помимо технических требований, связанных с эксплуатацией ПУ, выполняются требования ЭМС радиооборудования ПУ с окружением.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 57258–2016. Системы беспилотные авиационные. Термины и определения: дата введения 2017–06–01. – М.: Стандартинформ, 2016.
2. Решение ГКРЧ при Мининформсвязи от 07 мая 2007 года № 07-20-03-001 «О выделении полос радиочастот устройствам малого радиуса действия» (в ред. от 23.12.2022).
3. Постановление Правительства Российской Федерации от 18.11.2019 № 1203-47 «Об утверждении Таблицы распределения полос радиочастот между радиослужбами Российской Федерации и признании утратившими силу некоторые постановления Правительства Российской Федерации».
4. Антипин Б.М., Виноградов Е.М., Терновая А.К. Отбор потенциально опасных источников помех для приемника пункта управления беспилотных авиационных систем // Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики (ПМК-2023): Всероссийская научно-техническая и научно-методическая конференция магистров и их руководителей: в 2 т. – СПб., 2023. – Т. 1. – С. 61–66.
5. Рекомендация МСЭ-R P.676-11. Затухание в атмосферных газах.
6. Рекомендация МСЭ-R P.833-10. Ослабление сигналов растительностью.
7. Рекомендация МСЭ-R P.526-13. Распространение радиоволн за счет дифракции.
8. 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.
9. Виноградов Е.М. Анализ электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. – 301 с.
10. Рекомендация МСЭ-R SM.337-6. Частотный и территориальный разнос.
11. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В.И. Борисов, В.М. Зинчук, А.Е. Лимарев, Н.П. Мухин, В.И. Шестопапов. – М.: Радио и связь, 2000. – 384 с.

CALCULATIONS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY BETWEEN RADIO EQUIPMENT OF A COMMAND AND CONTROL POINT OF UNMANNED AIRCRAFT SYSTEM AND STATIONARY LAND RADIO STATIONS

Antipin B.M., Vinogradov E.M., Tumanova E.I., Munkueva O.B.
*The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
 Saint-Petersburg, Russian Federation*

An analysis procedure of electromagnetic compatibility between radio equipment of a command and control point (CP) of unmanned aircraft (UA) carrying a radio transmitter (RT) and a radio receiver (RR) and stationary land radio electronic equipment (REE) stations containing radio transmitters and/or radio receivers and surrounding the CCP is considered. The procedure involves analysis of the scenarios where emissions produced by the surrounding transmitters may have an effect on the quality of the signal received by the CCP receiver and where the emission produced by the CCP transmitter may have effect on the quality of signals received by the recei-

vers surrounding the CCP. It assumed that frequency-hopping spread spectrum signals are applied in both downlink and uplink. To assess the interference effect from emissions of the surrounding transmitters on the quality of the signal received by the CCP receiver the protection ratio is used. To assess the interference effect from emissions of the CCP transmitter on the quality of the signal received by the surrounding receivers the receiver desensitization is used.

Keywords: unmanned aircraft, frequency-hopping spread spectrum, electromagnetic compatibility, protection ratio, receiver desensitization.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-3-7-24

REFERENCES

1. GOST R 57258–2016. *Sistemy bespilotnye aviatsionnye. Terminy i opredeleniya* [State Standart 57258–2016. Unmanned aircraft systems. Terms and definition]. Moscow, Standartinform Publ., 2016.
2. The decision of SCRF the Ministry of communications of Russia No. 07-20-03-001 "On the allocation of radio frequencies to devices of small radius of action" (as amended by 23.12.2022). (In Russian).
3. Decree of the Government of the Russian Federation of November 18, 2019 No. 1203-47 "On approval of the Table of distribution of radio frequency bands between radio services of the Russian Federation and recognition of certain decisions of the Government of the Russian Federation". (In Russian).
4. Antipin B.M., Vinogradov E.M., Ternovaya A.K. [Selection of potentially dangerous interference sources for the receiver of the control point of unmanned aircraft systems]. *Podgotovka professional'nykh kadrov v magistrature dlya tsifrovoi ekonomiki (PMK-2023)* [Training of professional personnel in master's programs for the digital economy (PMK-2023)]. All-Russian scientific technical and methodological conference of masters and their supervisors. In 2 vol.]. St. Petersburg, 2023, vol. 1, pp. 61–66. (In Russian).
5. Recommendation ITU-R P.676-11. Attenuation by atmospheric gases.
6. Recommendation ITU-R P.833-10. Vegetation signal weakening.
7. Recommendation ITU-R P.526-13. Propagation of radio waves due to diffraction.
8. White D.R.J., comp. *Elektromagnitnaya sovmestimost' radioelektronnykh sredstv i nerednamerennyye 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).
9. 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.
10. Recommendation ITU-R SM.337-6. Frequency and territorial diversity.
11. Borisov V.I., Zinchuk V.M., Limarev A.E., Mukhin N.P., Shestopalov V.I. *Pomekhozashchishchennost' sistem radiosvyazi s rasshireniem spektra signalov metodom psevdosluchainoi perestroiki rabochei chastoty* [Noise immunity of a radio communication system with signal expansion using the method of pseudorandom adjustment of the duty cycle]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 2000. 384 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Антипин Борис Маврович – родился в 1955 году, канд. техн. наук, доцент, начальник Научно-исследовательской лаборатории радио-контроля 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 52 научные работы. (Адрес: 193232, Россия, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, к. 1. 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 at 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 the author of 52 scientific papers. (Address: 22, Bolshevikov prospect, St Petersburg, 193232, Russia. E-mail: boris_antipin@mail.ru).



Виноградов Евгений Михайлович – родился в 1936 году, канд. техн. наук, доцент, Научно-исследовательская лаборатория радиоконтроля и электромагнитной совместимости СПбГУТ. Область научных интересов: электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. Опубликовано 108 научных работ. (Адрес: 193232, Россия, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, к. 1. E-mail: vinog1936@mail.ru).

Vinogradov Evgeny Mikhailovich (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 the author of 108 scientific papers. (Address: 22, Bolshevikov prospect, St Petersburg, 193232, Russia. E-mail: vinog1936@mail.ru).



Туманова Евгения Ивановна – родилась в 1987 году, канд. техн. наук, доцент, кафедра цифрового телевидения и метрологии, СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. Область научных интересов: иммерсивная реальность, ольфакторная модальность, генеративная графика. Опубликовано 35 научных работ. (Адрес: 193232, Россия, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, к. 1. E-mail: evjeny@gmail.com).

Tumanova Evgeniya Ivanovna (b. 1987) – Candidate of Sciences (Eng.), Associate Professor of the Department of Digital Television and Metrology, SUT. Her research interests are currently focused on immersive reality, olfactory modality, generative graphics. She is the author of 35 scientific papers. (Address: 22, Bolshevikov prospect, St Petersburg, 193232, Russia. E-mail: evjeny@gmail.com).



Мункеева Ольга Борисовна – родилась в 1988 году, аспирант, кафедра цифрового телевидения и метрологии, СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. Область научных интересов: электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. Опубликовано одна научная работа. (Адрес: 193232, Россия, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, к. 1. E-mail: munkuevaolga@gmail.com).

Munkueva Olga Borisovna (b. 1988) – Postgraduate at the Department of Digital Television and Metrology, SUT. Her research interests are electromagnetic compatibility of radio-electronic equipment. She is the author of 1 scientific paper. (Address: 22, Bolshevikov prospect, St Petersburg, 193232, Russia. E-mail: munkuevaolga@gmail.com).

Статья поступила 18 сентября 2024 г.
Received September 18, 2024

To Reference:

Antipin B.M., Vinogradov E.M., Tumanova E.I., Munkueva O.B. Raschet elektromagnitnoi sovmestimosti radiooborudovaniya punkta upravleniya bespilotnoi aviatsionnoi sistemy so statsionarnymi nazemnymi radioelektronnymi sredstvami [Calculations of electromagnetic compatibility between radio equipment of a command and control point of unmanned aircraft system and stationary land radio stations]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2024, no. 3 (64), pp. 7–24. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-3-7-24.