

# Влияние внешних помех на дальность связи беспилотного воздушного судна с пунктом управления по линии вниз

Б. М. Антипин<sup>1</sup>, Е. М. Виноградов<sup>2</sup>

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

<sup>1</sup>boris\_antipin@mail.ru, <sup>2</sup>vinog1936@mail.ru

**Аннотация.** Излучения стационарных наземных передатчиков, расположенных вокруг пункта управления беспилотной авиационной системы и вдоль трассы полета беспилотного воздушного судна, могут влиять на качество приема полезного сигнала как приемником беспилотного воздушного судна, так и приемником пункта управления. При определении возможности применения воздушного судна для решения практических гражданских задач важным этапом является оценка дальности связи беспилотного судна с пунктом управления. В работе рассмотрена процедура получения такой оценки. При этом отмечено, что такая оценка может быть получена только для линии вниз, т. е. для направления от беспилотного воздушного судна к пункту управления, когда имеют место помехи приему сигнала на пункте управления.

**Ключевые слова:** беспилотная авиационная система, беспилотное воздушное судно, пункт управления, псевдослучайная перестройка рабочей частоты, защитное отношение

## I. ВВЕДЕНИЕ

Гражданские беспилотные авиационные системы (БАС) работают в условиях, когда радиоприемные устройства (РПУ), установленные на борту беспилотного воздушного судна (БВС) и в пункте управления (ПУ), в реальных условиях эксплуатации подвергаются воздействию непреднамеренных внешних помех. Помехи создают наземные радиопередатчики (РПД), работающие в тех же полосах частот, что БАС, и не предназначенные для создания специально организованных помех.

В зависимости от плотности РПД, их мощностей и их рабочих частот РПУ БВС в разных точках траектории полета БВС будет испытывать разный уровень внешних помех, вследствие чего будет изменяться качество сигнала, принимаемого от передатчика ПУ. Оценка влияния помех на работу РПУ для такой ситуации рассмотрена в [1]. Однако вопрос оценки максимальной дальности связи между ПУ и БВС по линии вверх не ставится. Возможна ситуация, когда сильная помеха при небольшом расстоянии между БВС и ПУ может, воздействуя на приемник БВС, нарушить связь этих объектов. И в то же время в более удаленных от ПУ точках траектории БВС уровень помехи может быть намного меньше и при достаточной мощности полезного сигнала, поступающего от передатчика ПУ, связь может быть хорошего качества. В этом случае вопрос о выполнении БВС поставленной перед ним задачи решается посредством выбора траектории полета.

Иначе обстоит дело с ПУ. Пункт управления является стационарным объектом. По крайней мере, его можно считать таковым при решении некоторой конкретной задачи. Стационарные передатчики, окружающие ПУ, создают на входе приемника ПУ помеху, уровень которой в течение сеанса работы БВС меняется мало, в то время как уровень полезного сигнала по мере удаления БВС от ПУ на входе приемника ПУ падает. Это приводит к уменьшению отношения сигнал/помеха и снижению качества принимаемого сигнала. Отбор источников помех по дальности и частоте происходит как в [2], т. е. потенциально опасными рассматриваются передатчики, которые находятся в пределах радиогоризонта приемника ПУ и частоты которых лежат в полосе частот, занимаемой сигналом ППРЧ. В [2, 3] рассмотрена процедура оценки электромагнитной совместимости (ЭМС) радиооборудования ПУ с окружением. При этом предполагалось, что полезные сигналы, которыми обмениваются ПУ и БВС, являются сигналами с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (сигналами ППРЧ). В дальнейшем также предполагаем, что сохраняется указанный вид сигнала, в том числе в нисходящей линии связи БВС→ПУ.

В указанных выше работах в качестве критериев ЭМС радиоприемного устройства пункта управления с окружением и радиоприемников РЭС окружения с передатчиком ПУ использовались такие параметры, как допустимое число пораженных каналов сигнала ППРЧ или допустимое снижение чувствительности приемника РЭС при воздействии на него излучений передатчика ПУ. Однако, не менее важным параметром, который можно использовать для оценки ЭМС в этих условиях является снижение дальности связи по линии вниз, т. е. по линии БВС→ПУ, параметр, которому ранее не было уделено должного внимания. В работе делается попытка исправить эту ситуацию.

Что касается исходных данных необходимых для выполнения расчетов, то отметим следующее. Излучения передатчиков, выделенных для анализа по результатам отбора в качестве потенциально опасных, попадают в основной канал приема приемника ПУ. Узкополосная помеха может поступать в приемник ПУ с некоторой отстройкой от рабочей частоты приемника. Для оценки степени подавления помехи в приемнике и построения модели характеристики избирательности по основному каналу приема нужно знать полосу пропускания и коэффициент прямоугольности тракта промежуточной частоты приемника. Нелинейные эффекты в приемнике при этом не рассматриваются.

Исходные данные включают также координаты антенн приемника ПУ и передатчиков окружения ПУ, а также информацию о параметрах диаграмм направленности антенн (ДНА) и положении главных лепестков ДНА в пространстве. Кроме того, для достижения цели работы необходимо располагать информацией о координатах траектории движения БВС, параметрах приемника ПУ и передатчиков-источников помех.

Сигнал ППРЧ занимает широкую полосу частот и во временной области представляет собой, в общем случае, последовательность модулированных импульсов со скачкообразным изменением несущей частоты. Для оценки влияния помехи на качество приема полезного сигнала в число исходных данных должно быть включено защитное отношение для данного вида сигнала и помехи. Более подробно перечень необходимых исходных данных представлен в [2].

## II. ПРОЦЕДУРА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ПОМЕХ НА ДАЛЬНОСТЬ СВЯЗИ ПО ЛИНИИ ВНИЗ

Оценка изменения дальности связи БВС с ПУ по линии вниз при наличии внешних помех приемнику ПУ относительно ситуации, когда помехи отсутствуют, может быть выполнена с использованием отношения сигнал/помеха.

Рассмотрим сначала ситуацию, когда внешние помехи приемнику ПУ отсутствуют. В этом случае, чтобы на выходе приемника был воспроизведен сигнал некоторого минимального требуемого качества необходимо, чтобы на входе его уровень был равен чувствительности приемника. Пусть чувствительность приемника ПУ равна  $P_R$ , дБм. Поскольку с увеличением расстояния между БВС и ПУ полезный сигнал передатчика БВС на входе приемника ПУ убывает, то расстояние между БВС и ПУ, при котором сигнал от передатчика БВС на входе приемника ПУ имеет значение, равное чувствительности приемника, соответствует максимальной дальности связи по линии вниз между рассматриваемыми объектами. Это позволяет записать связь максимального расстояния между передатчиком БВС и приемником ПУ в виде следующего уравнения

$$P_R = S(f_{0R}) = P_T(f_{0R}) + G_{0T} + G_{0R} - L(f_{0R}, d_{\max}), \quad (1)$$

где  $S(f_{0R})$  – сигнал на входе приемника ПУ на частоте  $f_{0R}$ , дБм;  $P_T(f_{0R})$  – мощность передатчика БВС на частоте  $f_{0R}$ , дБм;  $G_{0T}$ ,  $G_{0R}$  – коэффициенты усиления антенн по главному лепестку ДНА передатчика БВС и приемника ПУ соответственно, дБи;  $L(f_{0R}, d_{\max})$  – потери на трассе между БВС и ПУ длиной  $d_{\max}$ , км, на частоте  $f_{0R}$ , дБ.

Значения параметров, входящих в (1), получают из спецификаций соответствующих приборов. Частота  $f_{0R}$  является рабочей частотой передатчика БВС и приемника ПУ. Что касается потерь на трассе БВС→ПУ, то, полагая, что распространение происходит в свободном пространстве, найдем:

$$L(f_{0R}, d_{\max}) = 32,45 + 20 \lg(f_{0R}[\text{МГц}]) + 20 \lg(d_{\max}[\text{км}]) \quad (2)$$

Из (1) и (2) следует

$$d_{\max} = 10^{(P_T - P_R + G_{0T} + G_{0R} - 20 \lg(f_{0R}) - 32,45) / 20} \quad (3)$$

Выражение (3) определяет максимальную дальность связи между БВС и ПУ в отсутствие внешних помех.

Рассмотрим теперь ситуацию, когда на приемник ПУ поступают мешающие сигналы от передатчиков, окружающих пункт управления. При перестройке рабочих частот сигнала ППРЧ каждая новая частота является центральной частотой некоторого частотного канала. Частота мешающего сигнала, лежащая в полосе сигнала ППРЧ, от передатчика, прошедшего отбор, попадает в полосу, по крайней мере, одного частотного канала сигнала ППРЧ и может недопустимо снизить качество сигнала в этом канале. Происходит это в том случае, если отношение сигнал/помеха в канале будет ниже защитного отношения.

Пусть полезный сигнал занимает  $K$  частотных каналов, т. е. псевдослучайная перестройка рабочей частоты передатчика БВС происходит по  $K$  частотам, а  $M$  есть число передатчиков в окружении ПУ, подлежащих анализу. Пусть  $i$  номер передатчика из множества  $M$ , сигнал которого попадает в канал  $j$  из множества  $K$ . Эквивалентная мощность помехи  $I_{ij}$ , дБм, с частотой  $f_{Ti}$ , приведенная к входу приемника на частоте его настройки  $f_{0R}$ , создаваемая элементу ППРЧ сигнала, имеющего частоту  $f_j$ , составляет [2]:

$$I_{ij}(f_{0R}) = P_{Ti}(f_{Ti}) + G_{TR}(f_{Ti}) + G_{RT}(f_{Ti}) - L(f_{Ti}, d_{TR}) - \gamma - CF(\Delta f_{ij}), \quad (4)$$

где  $P_{Ti}(f_{Ti})$  – мощность  $i$ -го передатчика на частоте  $f_{Ti}$ , дБм;  $G_{TR}(f_{Ti})$ ,  $G_{RT}(f_{Ti})$  – коэффициенты усиления антенн на частоте  $f_{Ti}$  соответственно антенны передатчика  $T_i$  в направлении на приемник пункта управления  $R$  и антенны приемника  $R$  в направлении на передатчик  $T_i$ , дБи;  $L(f_{Ti}, d_{TR})$  – потери в пространстве распространения на трассе передатчик  $T_i$ →приемник  $R$  на частоте  $f_{Ti}$ , дБ;  $d_{TR}$  – расстояние между передатчиком  $T_i$  и приемником  $R$ , км;  $\gamma$  – потери из-за несовпадения поляризаций сигнала передатчика  $T_i$  и приемной антенны, дБ;  $CF(\Delta f_{ij})$  – коэффициент частотной коррекции, учитывающий ослабление  $i$ -ой помехи из-за ее отстройки от частоты  $j$ -го элемента сигнала ППРЧ и соотношения ширины спектра помехи и ширины полосы пропускания приемника, дБ;  $\Delta f_{ij} = |f_{Ti} - f_j|$  – отстройка между частотами  $f_{Ti}$  и  $f_j$ .

Выбор математической модели для оценки потерь на трассе передатчик наземной РЭС→приемник ПУ зависит от рабочей частоты передатчика и его окружения. Обычно для этой цели используют модели, предлагаемые в рекомендациях МСЭ. Так для устройств с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты решение ГКРЧ [4] допускает использование полосы частот 2400–2483,5 МГц. В БАС гражданского применения эта полоса применяется в звене БВС→ПУ. В этом случае для оценки потерь на трассе РЭС→ПУ может быть использована модель, предложенная в рекомендации МСЭ-R P.1546-6 [5]. На частотах, превышающих 4 ГГц возможно применение рекомендации МСЭ-R P.452-18 [6]. Наконец полные потери на трассе для гражданских БВС можно оценить как сумму потерь, определяемых рекомендациями [7–10].

Поскольку рассматриваемые передатчики из окружения ПУ стационарные, положение их ДНА в пространстве фиксировано и известно. Что касается антенны приемника ПУ, то главный лепесток ее диаграммы направленности всегда направлен на БВС и его положение в пространстве определяется траекторией движения БВС.

Задавая координатами траектории БВС, можно в выбранной для анализа точке пространства определить расстояние между БВС и ПУ и положение ДНА приемника ПУ в пространстве. Это, в свою очередь, позволяет найти области взаимодействия ДНА приемника ПУ  $R$  и ДНА передатчика  $T_i$ , т. е. установить, происходит ли излучение передатчика в направлении на приемник по главному или боковому лепестку и прием этого излучения антенной приемника по главному или боковому лепестку, как это сделано в [2]. Там же представлены математические модели, описывающие коэффициенты усиления антенн по боковым лепесткам, коэффициент частотной коррекции и ослабление помехи при несовпадении ее поляризации с поляризационным состоянием приемной антенны.

Мощность полезного сигнала  $S(f_{0R})$  на расстоянии  $d$  от БВС получим, заменив в (1) и (2)  $d_{\max}$  на  $d$ . Естественно при этом  $S(f_{0R}) \neq P_R$ . Используя полученную таким образом информацию о полезном сигнале и оценив из (4) уровень помехи  $I_{ij}(f_{0R})$ , который имеет место от  $i$ -го передатчика в  $j$ -ом канале полезного сигнала, найдем расстояние, начиная с которого помеха недопустимо снижает качество сигнала в этом канале. Это происходит когда отношение сигнал/помеха ( $S/I_{ij}$ ) становится меньше защитного отношения  $(S/I)_{\text{защ}}$ , т. е. имеет место неравенство

$$(S/I_{ij}) < (S/I)_{\text{защ}} \quad (5)$$

Поскольку  $I_{ij}$  не зависит от длины трассы между БВС и ПУ, то предельное расстояние, при котором еще имеет место требуемое качество сигнала, может быть получено из равенства

$$(S/I_{ij}) [\text{дБ}] = S[\text{дБм}] - I_{ij}[\text{дБм}] = (S/I)_{\text{защ}}[\text{дБ}]$$

Теперь, учитывая сказанное выше о полезном сигнале, найдем для  $d = d_{TR(j)}$

$$P_T(f_{0R}) + G_{0T} + G_{0R} - L(f_{0R}, d_{TR(j)}) = I_{ij} + (S/I)_{\text{защ}}, \quad (6)$$

где  $d_{TR(j)}$  – расстояние между передатчиком БВС ( $T$ ) и приемником ПУ ( $R$ ), при котором отношение сигнал/помеха в  $j$ -ом канале сигнала равно защитному отношению.

Обозначим  $I_{ij} + (S/I)_{\text{защ}} = \Sigma_{ij}$ . Из (6) и (2) с заменой в (2)  $d_{\max}$  на  $d_{TR(j)}$ , получим

$$d_{TR(j)} = 10^{(P_T + G_{0T} + G_{0R} - \Sigma_{ij} - 20 \lg(f_{0R}) - 32,45) / 20} \quad (7)$$

Выражение (7) определяет максимальное расстояние между ПУ и БВС, при котором при наличии помехи в  $j$ -ом канале от  $i$ -го передатчика еще имеет место требуемое качество сигнала.

Передатчики окружения работают на разных частотах. Их излучения попадают в разные каналы ППРЧ сигнала. Поскольку уровень помех в месте расположения ПУ от каждого стационарного

передатчика окружения будет разным, но остается в течение сеанса связи примерно постоянным, а полезный сигнал по мере удаления БВС от ПУ убывает, то вместе с ним в каналах ППРЧ сигнала, куда попадают излучения окружающих передатчиков, падает отношение сигнал/помеха. Последовательно просматриваем точки траектории полета БВС и для каждой точки определяем число каналов, для которых имеет место (5). Если в исходных данных указано допустимое число каналов, пораженных помехой, то по достижении этого числа плюс единица выполняем описанную выше процедуру определения  $d_{TR(j)}$  для последнего передатчика. Это и будет максимальное расстояние между БВС и ПУ, при котором в нисходящей линии обеспечивается требуемое качество связи, а число пораженных каналов равно допустимому числу.

Если в исходных данных не указано допустимое число каналов, пораженных помехами, то анализ проводится до тех пор, пока число пораженных каналов не будет изменяться. Это будет означать, что при полученном числе пораженных каналов дальность связи БВС и ПУ составит  $d_{\max}$ . Если помехами будут поражены все каналы, то связь невозможна.

Относительное изменение дальности из-за помех составит

$$\Delta d\% = (1 - d_{TR(j)} / d_{\max}) \cdot 100$$

До сих пор рассматривалась ситуация, когда в канал ППРЧ сигнала поступала помеха от одного внешнего передатчика. Если в канале присутствует несколько помех от нескольких передатчиков, то при рассмотрении такого канала в описанной выше процедуре оценки максимальной дальности связи следует  $I_{ij}$  заменить на  $I_j$ , где

$$I_j = 10 \lg \left( \sum_i 10^{I_{ij}/10} \right),$$

а суммирование происходит по  $i$  передатчикам, частоты которых попадают в  $j$ -й канал сигнала ППРЧ.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка максимальной дальности связи БВС с ПУ выполняется только для линии вниз. Эта оценка важна при планировании задач, решаемых с помощью БАС, и может быть использована при оценке ЭМС ПУ с окружением. В данной работе предложен способ получения этой оценки. Решение учитывает помехи радиоприему в пункте управления, создаваемые стационарными передатчиками окружения ПУ, поступающие по основному каналу приемника ПУ. Подвижные средства не рассматриваются, так как их помехи носят, как правило, случайный и кратковременный характер. Оценка такого рода помех является вероятностной и может быть рассмотрена в дальнейшем.

### 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] Антипин Б.М., Виноградов Е.М., Туманова Е.И., Мункуева О.Б. Расчет электромагнитной совместимости радиооборудования пункта управления беспилотной авиационной системы со

стационарными наземными радиоэлектронными средствами // Доклады АН ВШ РФ. 2024. № 3 (64). С. 7–24. doi: 10.17212/1727-2769-2024-3-7-24

- [3] Антипин Б.М., Виноградов Е.М. Оценка электромагнитной совместимости радиоборудования гражданского беспилотного летательного аппарата и пункта управления с окружением. // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. 2024. № 1 (79). С. 288-292.
- [4] Решение ГКРЧ от 07.05.2007 №07-20-03-001. О выделении полос радиочастот устройствам малого радиуса действия. Приложение 1.
- [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.452-18 Процедура прогнозирования для оценки помех между станциями, находящимися на поверхности Земли, на частотах выше приблизительно 100 МГц.
- [7] Рек. МСЭ-R P.525-5 Расчет ослабления в свободном пространстве.
- [8] Рек. МСЭ-R P.526-13 Распространение радиоволн за счет дифракции.
- [9] Рек. МСЭ-R P.833-8 Ослабление сигналов растительностью.
- [10] Рек. МСЭ-R P.676-12 Затухание в атмосферных газах и связанное с ним воздействие.