

УДК 621.391.6; 621.396.13; 621.396.67.012.12

doi: 10.53816/23061456_2025_5–6_65

МОДЕЛЬ ПОДАВЛЕНИЯ ПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ В СОСТАВНЫХ РАДИОЛИНИЯХ НАЗЕМНО-ВОЗДУШНЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ

MODEL FOR SUPPRESSION OF DELIBERATE INTERFERENCE IN COMPOSITE RADIO LINKS OF GROUND-TO-AIR COMMUNICATION NETWORKS

Д.Н. Поляков

D.N. Polyakov

Военная академия связи им. С.М. Буденного

В статье представлена разработка модели наземно-воздушной сети радиосвязи, обеспечивающей новый подход к помехоустойчивости в составных радиолиниях с применением беспилотных летательных аппаратов. Данная модель предлагает применение метода адаптивных антенных решеток совместно с методом псевдослучайной или программной перестройки рабочих частот на корпусе беспилотных летательных аппаратов, с учетом моделей сред распространения, которые наиболее комплексно и полно описывают все имеющиеся воздействия на систему связи наземно-воздушной сети и различного рода затухания в каналах связи. Разработанная модель позволяет получить все необходимые значения для расчета вероятности связи, как показателя помехоустойчивости, и в дальнейшем стать основой для реализации методики расчета помехоустойчивости в составных радиолиниях наземно-воздушных сетей связи.

Ключевые слова: сеть радиосвязи, помехоустойчивость, беспилотный летательный аппарат, адаптивная антенная решетка, среда распространения, затухание и замирание радиоволн, вероятность связи.

The paper presents the development of a ground-to-air radio communication network model that provides a new approach to noise immunity in composite radio links using unmanned aerial vehicles. This model proposes the application of the method of adaptive antenna arrays together with the method of pseudo-random or software tuning of operating frequencies on the drone body, taking into account the models of propagation environments, which most comprehensively and fully describe all the available effects on the communication system of the ground-air network and various kinds of attenuation in the communication channels. The developed model allows to get all necessary values for calculation of probability of connection, as an indicator of noise immunity, and further to become a basis for realization of methodology of calculation of noise immunity in composite radio lines of ground-air communication networks.

Keywords: radio communication network, noise immunity, unmanned aerial vehicle, adaptive antenna array, propagation environment, fading and fading of radio waves, communication probability.

В современных системах радиосвязи и радиолокации крайне необходимо эффективное подавление помех, чтобы обеспечить заданное

качество сигнала для устойчивой связи. Эта ключевая задача особенно актуальна для осуществления связи с беспилотными летательными

аппаратами (БПЛА) в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки.

Методы противодействия воздействию на сеть радиосвязи, характеризующему внесением преднамеренных искажений сигнала, можно разделить на следующие направления.

1. Снижение допустимого превышения уровня радиосигнала над уровнем радиопомех и при соблюдении требуемой достоверности радиосвязи.

2. Повышение энергетического потенциала радиоканала.

3. Увеличение длительности интервалов пригодного состояния радиоканалов.

Первое направление включает в себя такие методы, как:

- методы разнесенного приема в линиях радиосвязи (пространственного, временного, частотного, комбинированного);

- метод применения радиосигналов сложной структуры (системы с фазоманипулированными псевдослучайными сигналами (ФМн-ПСП) и системы с псевдослучайной или программной перестройкой рабочих частот (ППРЧ)).

Второе направление включает в себя такие методы, как:

- увеличение мощности радиопередающих устройств;

- повышение коэффициентов усиления передающих антенн;

- повышение коэффициентов направленного действия приемных антенн;

- использование активных фазированных антенных решеток (АФАР);

- использование адаптивных приемных антенных систем с управляемой диаграммой направленности.

Третье направление включает в себя различные методы адаптации, такие как:

- адаптация по частоте;

- адаптация по мощности;

- адаптация по виду радиосигнала;

- адаптация по скорости передачи информации.

Каждый из приведенных выше методов имеет свои преимущества и недостатки. Однако, наиболее подходящим для подавления преднамеренных помех в наземно-воздушной сети с использованием беспилотных летательных аппаратов с энергетической точки зрения является

использование адаптивных антенных решеток (ААР) с управляемой диаграммой направленности [1]. Использование ААР позволяет подавлять помехи любого вида и управлять положением диаграммы направленности в обеих плоскостях, что позволяет уменьшить влияние мешающих сигналов и повысить отношение сигнал/шум. ААР позволяют производить подавление помех, не прибегая к увеличению мощности и расширению спектра полезного сигнала. Современная электронная база и правильно выбранный алгоритм обработки сигналов дают возможность качественного приема сигналов на фоне помех, в разы превышающих по мощности уровень полезного сигнала. Число подавляемых помех определяется числом элементов в антенне [2].

В качестве объекта исследования будет рассмотрена сценарная модель представленная на рис. 1. В данной модели рассматривается БПЛА-носитель FPV-дронов «ударников», который служит ретранслятором между оператором и дронами-ударниками. Он должен выполнить задачу разведки с определением целей для поражения в заданном районе. При этом в режиме разведки между оператором и БПЛА-носителем используются два канала связи: канал управления и канал видео и данных телеметрии (рис. 1, а). Если цель обнаружена, «носитель» переходит в режим ретрансляции для ударных дронов. В этом режиме составная радиолиния между оператором и дронами-ударниками образуется при помощи ретрансляции через БПЛА-носитель (рис. 1, б).

Для подавления помех будет рассмотрена адаптивная антенная решетка, состоящая из 4 штыревых антенных элементов, расположенных в одной плоскости по «квадрату» со стороной квадрата d , равной половине длины волны радиочастоты 2,4 ГГц, то есть равной 62,46 мм (рис. 2).

Для формирования диаграммы направленности используется метод смещения фазы принимаемых сигналов [3]. На каждом антенном элементе индивидуально настраивается сдвиг фазы. После смещения фазы все сигналы суммируются и формируется итоговый сигнал, считываемый приемником.

На первом этапе система переводится в режим сканирования направления на источник

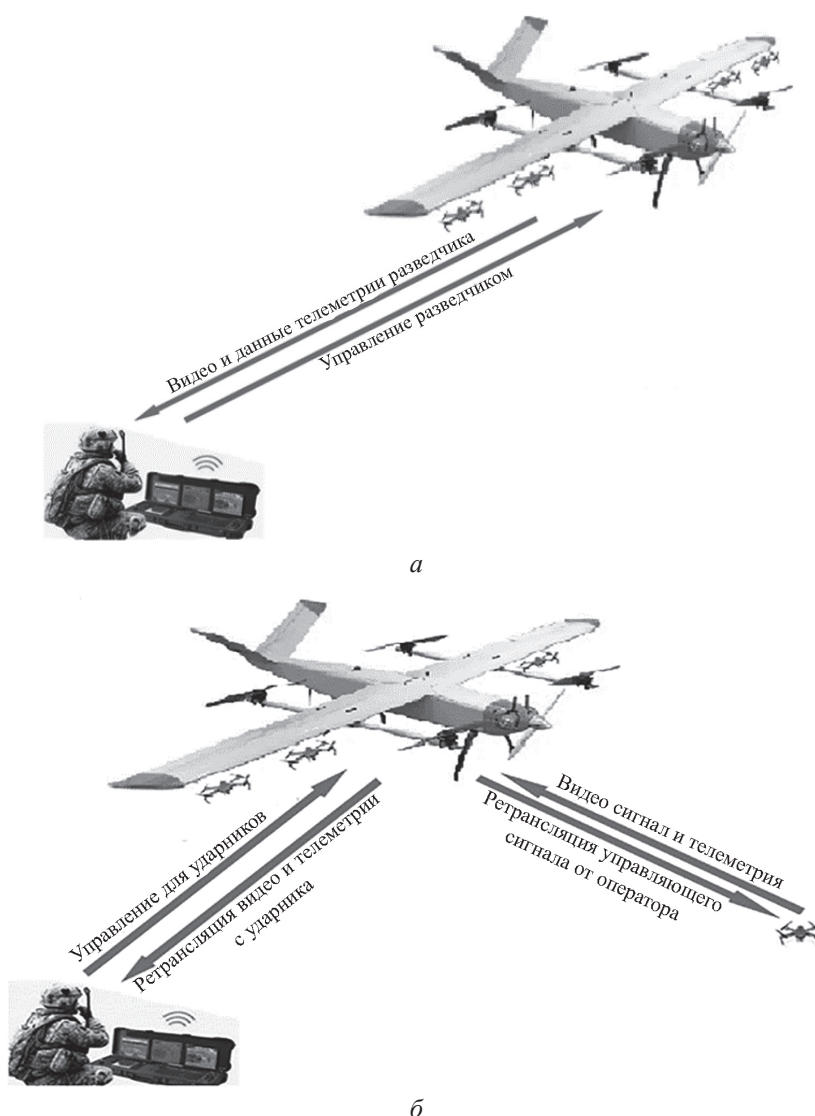


Рис. 1. Сценарная модель: а — режим разведки до обнаружения цели; б — режим ретрансляции для уничтожения цели

помехи — направления на источник излучения наибольшей мощности. Для этого сдвинем фазы антенных элементов так, чтобы сигналы с заданного направления были синфазны и складывались. Это позволит сформировать максимум диаграммы направленности в заданном направлении. Этот максимум охватывает всю плоскость на 360 градусов, за счет чего определяется направление прихода наибольшей мощности, которое принято за направление на источник помехи. Визуализация этого процесса показана на рис. 3, построенного через функцию `figure` программы Matlab [4].

На втором этапе при помощи аналитического метода можно сформировать сдвиги фаз ан-

тенных элементов таким образом, чтобы «ноль» диаграммы направленности был сформирован в точности на источник помехи (рис. 4).

На рис. 2 показана схема размещения антенных элементов. Одним из способов сформировать «ноль» диаграммы направленности в определенном направлении является формирование такого смещения фазы, чтобы сигналы с двух антенн оказались синфазны друг с другом, а с других двух антенн были в противофазе указанным ранее синфазным сигналам. Таким образом при сумме 4 сигналов итоговый принятый сигнал будет равен нулю, если не учитывать неточности и наводимые в системе шумы.

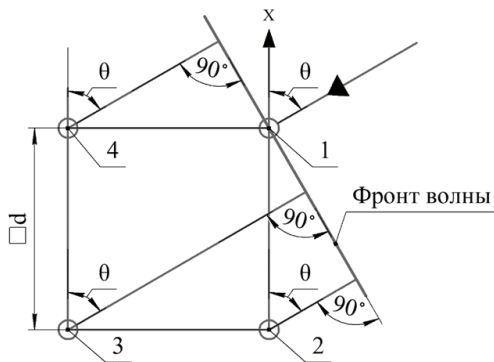


Рис. 2. Схема расположения штыревых антенных элементов

В каждый момент времени амплитуду сигнала на i -м антенном элементе можно описать по формуле

$$a_i = A_0 \cdot \cos(\omega t + \varphi),$$

где A_0 — максимальная амплитуда принимаемого сигнала;

ω — круговая частота принимаемого сигнала.

Примем следующее правило для формирования «нуля» диаграммы направленности: сдвиг фаз будем формировать таким образом, чтобы

сигналы с антенных элементов 1 и 4 были синфазны друг другу и были в противофазе сигналам на антенных элементах 2 и 3, рис. 2.

Выберем 1-й антенный элемент в качестве исходного, то есть его фаза не будет изменяться. Исходя из геометрической схемы расположения антенных элементов, приведенной на рис. 2, и принятого выше правила, получим следующие формулы для сдвигов фаз антенных элементов 2–4:

$$\begin{cases} \Delta\varphi_{12} = \frac{2\pi d \cdot \cos(\theta)}{\lambda} + \pi; \\ \Delta\varphi_{13} = \frac{2\pi d \cdot \cos(\theta) \cdot (1 + \operatorname{tg}(\theta))}{\lambda} + \pi; \\ \Delta\varphi_{14} = \frac{2\pi d \cdot \sin(\theta)}{\lambda}. \end{cases}$$

В связи с тем, что использование ААР позволяет подавлять ограниченное число преднамеренных воздействий одновременно и показывает низкую эффективность подавления помех, приходящих с направлений, близких к направлению прихода полезного сигнала, предлагается также в комплексе с ААР применить метод ППРЧ, который будет использоваться при низкой эффективности ААР. На дронах-ударни-

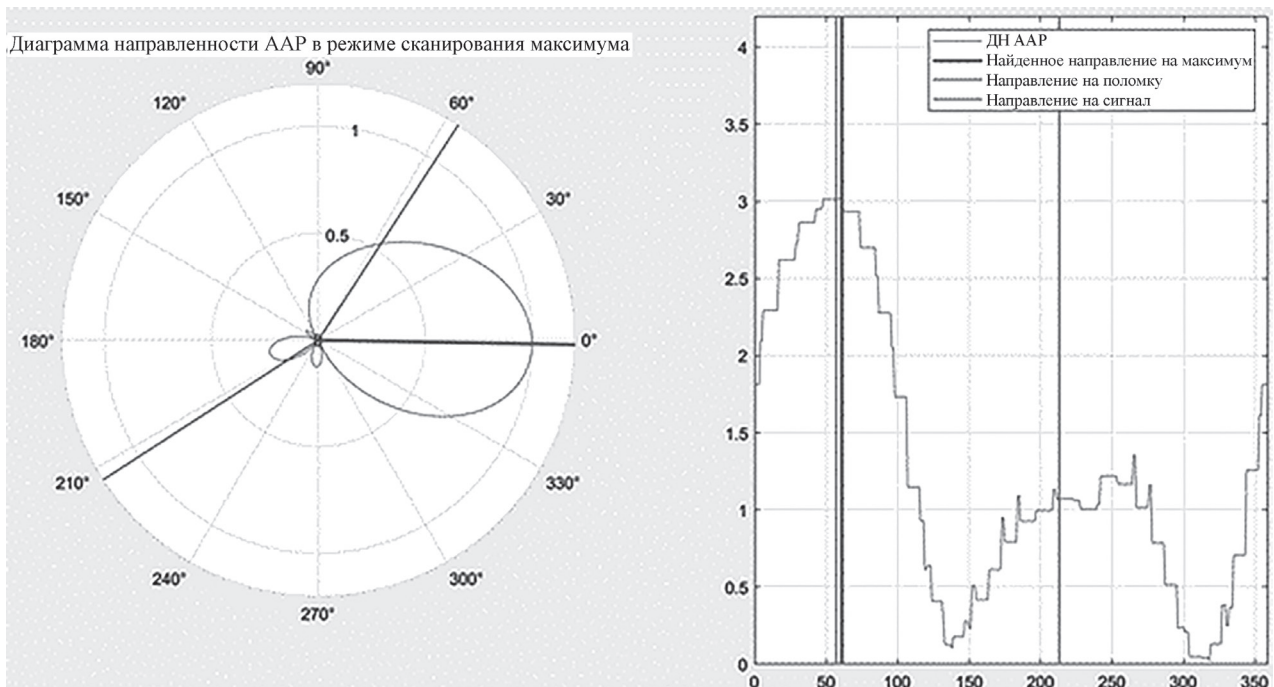


Рис. 3. Результат работы алгоритма по поиску направления на источник помехи



Рис. 4. Сформированная диаграмма направленности ААР

ках мы тоже будем использовать только метод ППРЧ при воздействии помех в связи с тем, что они используются как расходный материал для уничтожения цели, которую обнаружил БПЛА-носитель, и находятся в прямой видимости с носителем.

Процесс работы данной системы представлен на рис. 5.

Данная схема соответствует следующим этапам.

1. На первом этапе команда с пульта оператора поступает на дрон-разведчик.

2. Далее на этапе обработки поступивший сигнал анализируется исходя из имеющейся базы знаний.

3. На основе проведенного анализа делается вывод о наличии или отсутствии в поступившем сигнале преднамеренных помех.

4. Если помехи в канале управления зафиксированы, осуществляется анализ воздействующих помех и по результатам применяется один из двух возможных вариантов противодействия (ААР или ППРЧ) до тех пор, пока помеха не будет устранена.

5. По результатам выбора варианта противодействия оператору поступает уведомление. Если уведомление сигнализирует об использовании ППРЧ для борьбы с преднамеренной помехой, то данный тип противодействия применяется так же и на пульте оператора.

6. Если преднамеренных помех в сигнале не обнаружено, осуществляется поиск цели с передачей видео и телеметрии на пульт оператора, до момента обнаружения цели.

7. Когда цель обнаружена, осуществляется переключение управления от оператора на БПЛА-ударник посредством ретрансляции через БПЛА-разведчик.

8. На самих ударниках при получении команды от оператора, так же, как и на БПЛА-разведчике, осуществляется обработка полученного сигнала на предмет наличия преднамеренных помех исходя из имеющейся базы знаний.

9. Если помехи не обнаружено, БПЛА-ударник приступает к выполнению поступившей команды с пульта оператора. При этом оператор осуществляет контроль за выполнением задания

посредством получаемых от ударника данных видео и телеметрии.

10. Если помехи в канале управления зафиксированы, осуществляется применение метода ППРЧ до тех пор, пока помеха не будет устранена.

11. По результатам противодействия дроно-разведчику и оператору поступает уведомление об использовании ППРЧ для борьбы с преднамеренной помехой, и данный тип противодействия применяется как на дроне-разведчике, так и на пульте оператора.

Ввиду того, что распределение уровней сигнала и помех во времени подчиняется случайному закону, вероятность связи определяется выражением [5]:

$$P_{\text{св}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^U e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

В случае, когда значение вероятности связи неизвестно, расчетный параметр U находится по формуле:

$$U = (\bar{z} - z_{\text{тр}}) / \sigma_z,$$

где U — некоторый расчетный параметр;

σ_z — среднеквадратическое отклонение превышения уровня сигнала над уровнем помех;

$z_{\text{тр}}$ — требуемое превышение уровня сигнала над уровнем помех на входе приемника;

$\bar{z}$ — отношение медианных значений мощности сигнала к мощности шумов и помех на входе приемника:

$$\bar{z} = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{ш}} + P_{\text{п}}} \right).$$

Мощность полезного сигнала на входе приемника определяется при помощи уравнения радиопередачи. При расчетах значение удобно выражать в децибелах относительно ватта.

$$P_{\text{ш}} = k_{\text{Б}} B (T_{\text{А}} + T_{\text{ПРМ}}),$$

где $k_{\text{Б}} = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/(Гц·К) — постоянная Больцмана;

B — полоса частот;

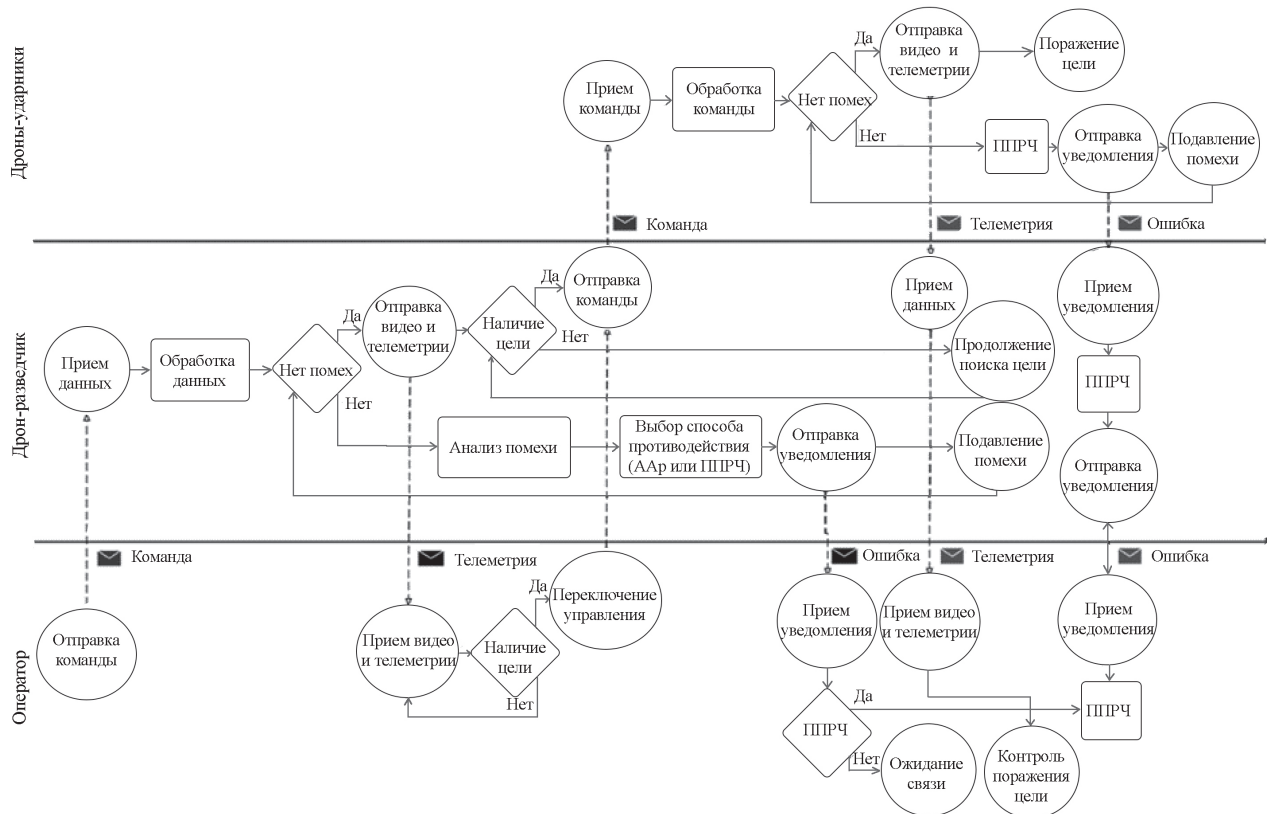


Рис. 5. Поведенческая диаграмма UML, описывающая взаимодействие элементов в системе и процесс ее работы

T_A — шумовая температура антенны;

$T_{\text{ПРМ}}$ — шумовая температура приемника.

Нахождение значений шумовых температур антенны и приемника подробно описано в работе [5].

В случае, когда на вход приемника воздействуют преднамеренные или непреднамеренные помехи, их значения вычисляются при помощи уравнений радиопередачи, за исключением того, что все переменные, имеющие отношение к передающему тракту, берутся из тактико-технических характеристик «мешающих» радиоэлектронных средств.

В связи с тем, что наша сеть наземно-воздушная, необходимо учитывать и распространение сигнала в различных средах («земля–воздух», «воздух–воздух», «воздух–земля»).

Канал радиосвязи между БПЛА и наземным пунктом управления относится к авиационному каналу, который описывается многолучевой моделью с явлениями переотражения, рассеивания и дифракции [6].

На рис. 6 можно наблюдать дальность связи D , радиусы областей минимального $\rho_{\min}$, среднего ρ_{sign} и максимального ρ_l распространения радиоволн, конфокальные соответствующим эллипсоидам зон Френеля. Радиусы $\rho_{\min}$ и ρ_{sign} определяются соотношениями:

$$\rho_{\min} \approx \sqrt{\lambda R / 12};$$

$$\rho_{\text{sign}} \approx \sqrt{[2\pi]^{-1} \sin^{-1}(0,8)\lambda R}.$$

Взаимосвязь переменных D и d устанавливается при аппроксимации земной поверхности сферой радиуса $R_3 = 6366,1977$ км соотношением:

$$d = 2R_3 \sin(0,5D / R_3).$$

Для расчета мощности принимаемого сигнала на БПЛА и наземном пункте связи (НПС) справедливы следующие соотношения (уравнения радиопередачи [7]:

$$P_{\text{прм}}^{\text{БПЛА}} = P_{\text{прд}}^{\text{НПС}} - \eta_{\text{прд}}^{\text{НПС}} + G_{\text{прд}}^{\text{НПС}} + G_{\text{прм}}^{\text{БПЛА}} - \eta_{\text{прм}}^{\text{БПЛА}} - W_{\Sigma}^{\Pi};$$

$$P_{\text{прм}}^{\text{НПС}} = P_{\text{прд}}^{\text{БПЛА}} - \eta_{\text{прд}}^{\text{БПЛА}} + G_{\text{прд}}^{\text{БПЛА}} + G_{\text{прм}}^{\text{НПС}} - \eta_{\text{прм}}^{\text{НПС}} - W_{\Sigma}^{\text{O}},$$

где $P_{\text{прм}}^{\text{БПЛА}}$ и $P_{\text{прм}}^{\text{НПС}}$ — уровень сигнала на входе приемников БПЛА и НПС, дБ·Вт;

$\eta_{\text{прд}}^{\text{БПЛА}}$, $\eta_{\text{прм}}^{\text{БПЛА}}$ и $\eta_{\text{прд}}^{\text{НПС}}$, $\eta_{\text{прм}}^{\text{НПС}}$ — затухания в трактах передачи, приема для БПЛА и НПС, дБ;

$G_{\text{прд}}^{\text{БПЛА}}$, $G_{\text{прм}}^{\text{БПЛА}}$ и $G_{\text{прд}}^{\text{НПС}}$, $G_{\text{прм}}^{\text{НПС}}$ — коэффициенты усиления антенн в режимах передачи и приема для БПЛА и НПС, дБ;

$P_{\text{прд}}^{\text{НПС}}$ и $P_{\text{прд}}^{\text{БПЛА}}$ — мощность передатчиков БПЛА и НПС, дБ·Вт;

W_{Σ}^{Π} , W_{Σ}^{O} — затухание в среде распространения для прямого и обратного каналов, дБ [8, 9].

$$W_{\Sigma} = W_{\text{св}} + W_{\text{ат}} + W_{\text{р}},$$

где $W_{\text{св}}$ — величины затуханий в свободном пространстве;

$W_{\text{ат}}$ — затухание в газах атмосферы;

$W_{\text{р}}$ — затухание, учитывающее степень влияния земной поверхности на энергетические параметры интервала с учетом тропосферной рефракции.

$$W_{\text{св}} = 20 \lg(4\pi R f / c),$$

где R — эталонное расстояние в свободном пространстве, которое обычно выбирается равным рабочей высоте БПЛА или рассчитывается как

$$R = \sqrt{d^2 + (H - h)^2};$$

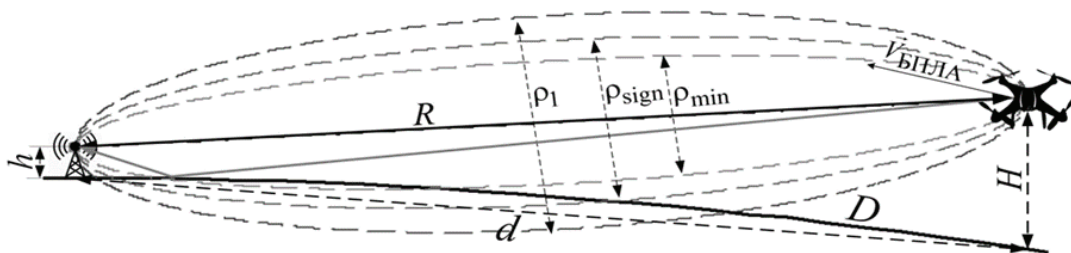


Рис. 6. Геометрическое представление канала связи с БПЛА для сред воздух–земля и земля–воздух

f — частота, на которой происходит прием сигнала;

c — скорость света в вакууме, м/с.

Затухание в газах атмосферы $W_{ат}$ вычисляется в соответствии с рекомендацией МСЭ ITU-R P.676-9 приближенным соотношением, верифицированным в диапазоне частот 1–350 ГГц:

$$W_{ат} = R(\gamma_0 + \gamma_w) \times 10^{-3},$$

где γ_0 и γ_w — погонное затухание в сухом воздухе и в водяных парах соответственно.

$$W_p = 10\gamma \lg(R_d / R) + X_\sigma,$$

где γ — экспонента потери на трассе, которая зависит от окружающей среды;

R_d — расстояние между приемником и передатчиком с учетом дифракции;

X_σ — логарифмически нормальное замирание вследствие затенения.

Затухания W_p обусловлены влиянием земной поверхности на энергетические параметры интервала связи. Характер влияния земной поверхности существенным образом определяется ее электрическими параметрами — удельной проводимостью σ , относительными диэлектрической ϵ и магнитной μ проницаемостями и их естественным различием от аналогичных параметров атмосферы [10].

Основу вычисления W_p при заданных геометрических параметрах представления канала связи с БПЛА составляют следующие подзадачи:

- определение влияния гладкой поверхности Земли при представлении этой поверхности сферическим сегментом или плоскостью;
- определение влияния переотражений от гладкой поверхности Земли;
- определение влияния рельефа местности.

Так, при $X_\sigma = 0$ потери на трассе в зависимости от расстояния между БПЛА и НПС для разных частот (0,9 ГГц; 2,4 ГГц; 5,8 ГГц) представлены на рис. 7.

Из рис. 7 видно, что при расстоянии между БПЛА и НПС 30 км затухания сигнала в свободном пространстве в диапазонах 0,9 ГГц; 2,4 ГГц и 5,8 ГГц равны 121 дБ, 130 дБ и 136 дБ соответственно. В худших условиях распространения ($\gamma = 3$) затухание сигнала сильно увеличивается. Для компенсации такого ослабления сигнала можно использовать различные способы, в том числе повышение коэффициента усиления антенн (главным образом, наземной), использование энергетически выгодных видов модуляции, повышение выходной мощности передатчиков (до максимально разрешенной).

Поскольку для выполнения задания подразумевается перемещение БПЛА-разведчика на достаточно большие расстояния относительно

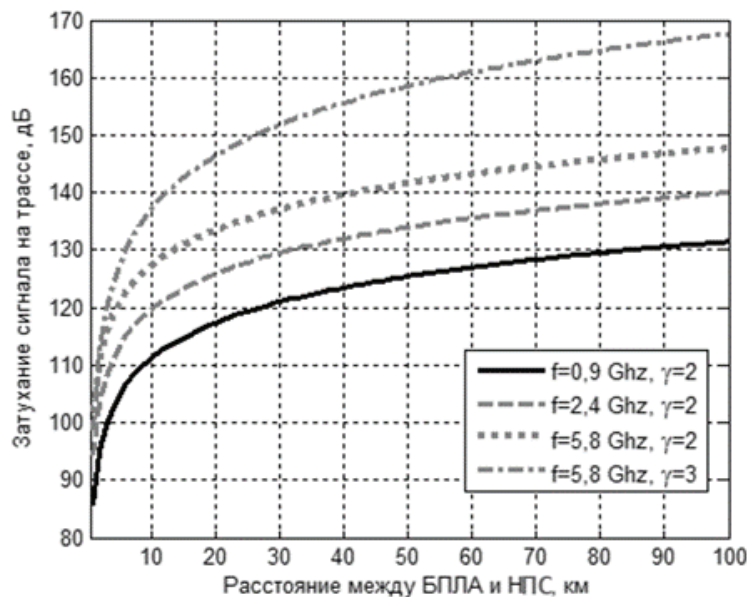


Рис. 7. Затухание сигнала на трассе в зависимости от расстояния между БПЛА и НПС для трех разных частот

оператора, следует учесть характеристику максимально возможной дальности связи $D_{\max}$:

$$D_{\max} = \frac{c}{4\pi f} 10^{\frac{P_{Tx} + G_{Tx} + \eta_{Tx} + G_{Rx} + \eta_{Rx} + W_{\Sigma} - P_{Rx}}{20}},$$

где P_{Tx} и P_{Rx} — мощность сигнала на передатчике и приемнике;

G_{Tx} и G_{Rx} — коэффициент усиления антенны передатчика и приемника;

η_{Tx} и η_{Rx} — затухания в трактах передачи и приема.

Таким образом, разработанная модель наземно-воздушной сети радиосвязи позволяет получить все необходимые значения для расчета вероятности связи, как показателя помехоустойчивости, и в дальнейшем стать основой для реализации методики расчета помехоустойчивости передачи информации в составных радиоперелиниях наземно-воздушных сетей связи.

Список источников

1. Риглер, Комптон Р.Т. Адаптивная антенная решетка для подавления помех // ТИИЭР. 1973. Том 61. № 6. С. 75–86.
2. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: введение в теорию; пер. с англ. М.: Радио и связь, 1986, 446 с.
3. Тузов Г.И. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
4. Лазарев Ю.Ф. Начала программирования в среде MatLAB: учеб. пособие. К.: НТУУ «КПИ», 2003. 424 с.
5. Мешалкин В.А., Сосунов Б.В. Основы энергетического расчета радиоканалов. Л.: воен. акад. связи, 1991. 110 с.
6. Haas E. Aeronautical channel modeling // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2002. V. 51. № 2. Pp. 254–264.
7. Калинин А.И. Распространение радиоволн на трассах наземных и космических радиоперелиний. М.: Связь, 1976. 296 с.
8. Bing L. Study on modeling of communication channel of UAV // Procedia Computer Science. 2017. Vol. 107. Pp. 550–557.

9. X. Cai et al. Low altitude UAV propagation channel modelling // 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). 2017. Pp. 1443–1447.

10. Архипов Н.С., Полянский И.С., Яковлев Ю.Н., Субботенко А.В. Математическая модель канала связи с беспилотным летательным аппаратом // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2021. № 24 (3). С. 71–79.

References

1. Rigler, Compton R.T. Adaptive antenna array for interference suppression // TIIEE. 1973. Vol 61. No 6. Pp. 75–86.
2. Monzingo R.A., Miller T.U. Adaptive antenna arrays: Introduction to Theory: transl. from English. M.: Radio and Communications, 1986. 446 p.
3. Tuzov G.I. Noise immunity of radio systems with complex signals. M.: Radio and Communications, 1986. 264 p.
4. Lazarev Y.F. The beginning of programming in the MatLAB environment: A textbook. K.: NTUU «KPI», 2003. 424 p.
5. Meshalkin V.A., Sosunov B.V. Fundamentals of energy calculation of radio channels. Leningrad: VAS, 1991. 110 p.
6. Haas E. Aeronautical channel modeling // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2002. V. 51. No 2. Pp. 254–264.
7. Kalinin A.I. Propagation of radio waves on the routes of terrestrial and space radio lines. M.: Svyaz, 1976. 296 p.
8. Bing L. Study on modeling of communication channel of UAV // Procedia Computer Science. 2017. Vol. 107. Pp. 550–557.
9. X. Cai et al. Low altitude UAV propagation channel modelling // 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). 2017. Pp. 1443–1447.
10. Arkhipov N.S., Polyansky I.S., Yakovlev Yu.N., Subbotenko A.V. Mathematical model of a communication channel with an unmanned aerial vehicle. Physics of wave processes and radio engineering systems. 2021. No 24 (3). Pp. 71–79.