

# **Оценка помехозащищенности канала управления беспилотным летательным аппаратом в условиях воздействия помех от движущегося источника на основе имитационного моделирования**

А. А. Молев, email: alexei\_molev@mail.ru<sup>1</sup>

И. В. Зайцев, email: igorwz@mail.ru<sup>1</sup>

А. А. Воронов, email: raven.vrn@mail.ru<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж)

**Аннотация.** Разработана динамическая имитационная модель функционирования канала управления беспилотным летательным аппаратом в условиях воздействия непреднамеренных помех от движущегося источника. При моделировании учитываются частотно-энергетические и пространственно-временные характеристики аппаратуры управления оператора, беспилотного летательного аппарата и источника непреднамеренных помех. Выходным показателем является вероятность успешного управления беспилотным летательным аппаратом за время полета. Модель реализована в среде Anylogic с визуальным отображением объектов в трехмерном пространстве.

**Ключевые слова:** канал управления, беспилотный летательный аппарат, воздействие помех, движущийся источник помех, имитационное моделирование.

## **Введение**

Активное применение дистанционно управляемых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) во многих областях как гражданской, так и военной деятельности обуславливает необходимость обеспечения надежного канала управления ими на требуемом расстоянии от оператора. За счет низкой стоимости и простоты конструкции, широкое распространение получили малоразмерные БПЛА типа Phantom, Mavic, радиолиния управления и передачи данных которых работает в симплексном режиме с временным разделением каналов управления (от оператора на БПЛА) и канала передачи данных (с БПЛА на оператора).

Применительно к решению задач БПЛА в экстремальных и сложных природно-географических условиях, например, в интересах автоматизированных систем управления экологически опасными объектами, системы обеспечения ликвидации последствий масштабных

чрезвычайных ситуаций [1, 2] необходимо обеспечение непрерывного управления БпЛА для любых условий рельефа местности, надежности связи при высокой мобильности абонентов, защищенности каналов связи от несанкционированного доступа.

В таких условиях наличие непреднамеренных помех от различных источников на входе приемника БпЛА, препятствует поступлению соответствующих команд управления на БпЛА и приему информации от БпЛА, что может приводить к срыву выполнения задачи. Источники непреднамеренных помех могут располагаться в произвольных местах и излучать сигналы различной мощности, в том числе превышающей уровень сигнала от оператора, на частотах, близких к рабочей или на ее гармонических составляющих. При этом наиболее сложными условиями для выполнения полета будет являться излучение непреднамеренных помех с применением антенн, с автоматическим ориентированием в направлении БпЛА.

Необходимость учета большого количества факторов, влияющих на эффективность функционирования канала управления (в том числе траектории движения БпЛА и источника помех, случайные факторы расположения источников помех и характеристики мешающих сигналов), определяет целесообразность применения имитационного моделирования для оценки помехозащищенности канала управления БпЛА. Целью работы является разработка имитационной модели выполнения полета беспилотным летательным аппаратом в условиях воздействия непреднамеренных помех от движущегося источника.

### **1. Общее описание имитационной модели**

Рассматриваемая модель представлена системой из трех основных объектов: БпЛА, оператор и источник непреднамеренных помех. При этом БпЛА и источник помех движутся по заданной траектории с постоянной скоростью. Помимо этого, от источника помех передающая антенна ориентируется в направлении БпЛА с некоторой ошибкой наведения. Иллюстрация пространственных характеристик объектов имитационной модели представлена на рисунке 1.

В разработанной имитационной модели приняты следующие допущения:

- в рассматриваемой системе функционируют один БпЛА и один источник непреднамеренных помех;
- между БпЛА и оператором, а также БпЛА и источником непреднамеренных помех отсутствуют объекты, препятствующие распространению радиоволн;
- источник помех движется по абсолютно ровной поверхности (без перепада высот), БпЛА на протяжении полета не меняет высоту;

- БПЛА не меняет траекторию движения в случае эффективного помехового воздействия на его канал управления;
- каналы управления и передачи данных работают в симплексном режиме с временным разделением;
- потери энергии в антенно-фидерных трактах считаются пренебрежительно малыми;
- антенны БПЛА и оператора имеют вертикальную поляризацию.

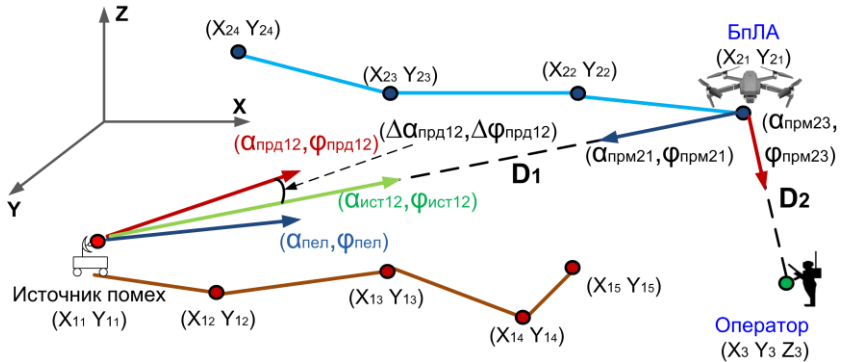


Рис. 1. Пространственные характеристики объектов имитационной модели

В качестве исходных данных задаются:

- координаты точек траекторий перемещения источника непреднамеренных помех  $(x_i, y_i)_i, i = 1 \dots n$  и БПЛА  $(x_j, y_j)_j, j = 1 \dots m$ ;
- скорости движения источника непреднамеренных помех  $v_1$  и БПЛА  $v_2$ ;
- координаты оператора  $(x_3, y_3)$ ;
- высоты поднятия передающих антенн источника непреднамеренных помех  $h_1$  и пульта управления оператора  $h_3$ , высота полета БПЛА  $h_2$ ;
- рабочая частота  $f$  сигнала радиолинии управления и передачи данных;
- значение выходной мощности передатчиков источника непреднамеренных помех  $P_1$  и пульта управления оператора  $P_2$ ;

– критериальный уровень воздействия непреднамеренных помех на канал управления БпЛА  $K_n$  ;

– коэффициенты усиления антенн в направлении главного лепестка диаграммы направленности (ДН) передающих антенн ИПП  $G_1$  и ПУ оператора  $G_2$  ;

– нормированные ДН передающих антенн, заданные двумерными матрицами, в которых номер столбца соответствует азимуту  $\alpha$  , номер строки – углу места  $\varphi$  , а значение ячейки – коэффициенту усиления антенны  $K_u$  в заданном направлении  $(\alpha, \varphi)$  . При этом, значения  $K_u$  могут быть получены с использованием выражения аппроксимации диаграммы направленности параболической зеркальной антенны [3] с эквивалентным усилением  $K_{0\text{ dB}}$  [дБ]:

$$K_u(K_{0\text{ dB}}, \alpha) = \begin{cases} K_{0\text{ dB}} - 0,0025(D_\lambda \cdot \alpha)^2, & \text{если } 0 \leq \alpha \leq \alpha_m(D_\lambda) \\ 2 + 15 \lg(D_\lambda), & \text{если } \alpha_m(D_\lambda) \leq \alpha \leq \alpha_1(D_\lambda) \\ 52 - 10 \lg(D_\lambda) - 25 \lg(\alpha), & \text{если } \alpha_1(D_\lambda) \leq \alpha \leq 48^\circ \\ -10 - 10 \lg(D_\lambda), & \text{если } 48^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \end{cases} \quad (1)$$

где  $D_\lambda = 10^{0,05(K_{0\text{ dB}} - 7,7)}$  – диаметр параболического зеркала;  
 $\alpha_m(D_\lambda) = 20/D_\lambda \sqrt{5,7 + 5 \lg(D_\lambda)}$  [град.] – направление на границе интервала аппроксимации;  $\alpha_1(D_\lambda) = 100/D_\lambda$  [град.] – направление на первый боковой лепесток.

Нормированная диаграмма направленности антенн с вертикальной поляризацией, применяемых на БпЛА, в угломестной плоскости может определяться выражением:

$$K_u(\varphi) = \cos \varphi \quad (2)$$

где  $\varphi$  – угол места, а в азимутально-угломестной системе координат может быть задана выражением:

$$K_u(\alpha, \varphi) = K_u(\alpha) \cdot K_u(\varphi) \quad (3)$$

При наличии заданной информации о типе и геометрических параметрах антенн, значения  $K_u$  могут быть получены с применением средств моделирования пакета Antenna Toolbox среды Matlab [4]. Также,

может использоваться нормированная диаграмма направленности реальной антенны, значения  $K_u$  которой получены экспериментально.

Выходным показателем является вероятность успешного управления БЛА, равная отношению суммарной длительности интервалов времени, в течение которых значение сигнал/ помеха превышало заданный уровень, к общей продолжительности эксперимента:

$$P_{ynp} = \frac{1}{t_k} \cdot \sum_{i=1}^N \Delta t_{ynp i} \quad (4)$$

В основу работы имитационной модели положен алгоритм, схема которого изображена на рисунке 2. Он представляет собой цикл с постусловием и включает следующие процедуры.

В первую очередь вводятся исходные данные модели, перечисленные выше.

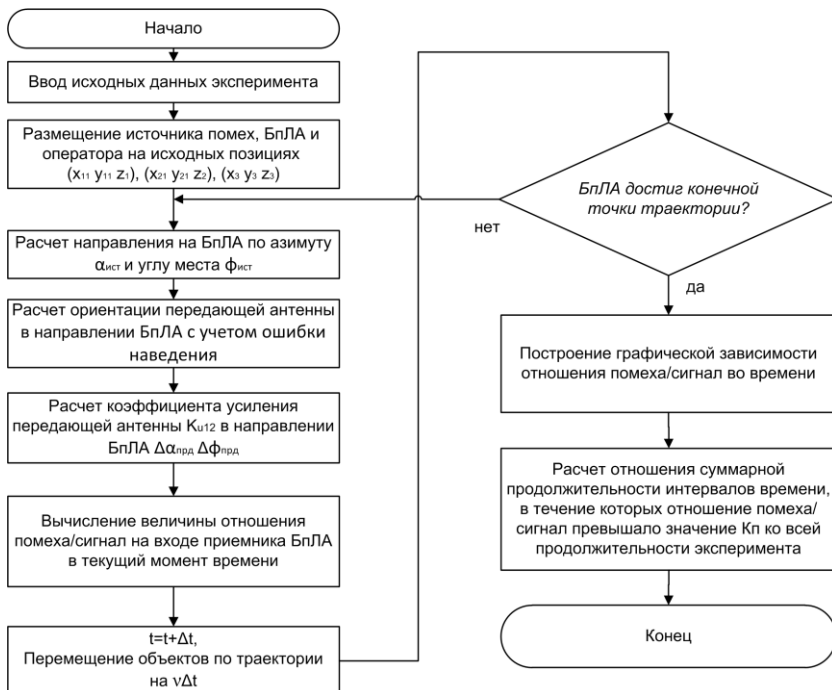


Рис. 2. Общий алгоритм работы имитационной модели

Следующим шагом осуществляется размещение имитируемых объектов системы в заданных координатах виртуального трехмерного пространства (подвижные объекты размещаются в начальной точке траекторий движения), после чего начинается цикл расчета параметров системы в заданные моменты времени (с периодичностью  $\Delta t$ ) в следующем порядке:

- расчет значений истинного ( $\alpha_{ист}, \varphi_{ист}$ ) и измеренного ( $\alpha_{изм}, \varphi_{изм}$ ) пеленгов с источника помех на БПЛА в текущий момент времени. Измеренный пеленг определяется как сумма истинного значения пеленга и случайной ошибки, значение которой генерируется снова для каждого момента времени по нормальному закону с учетом заданной среднеквадратической ошибки;

- расчет углов ориентации передающей антенны;

- расчет  $K_u$  передающей антенны источника помех в направлении на БПЛА ( $\Delta \alpha_{npd}, \Delta \varphi_{npd}$ );

- расчет отношения сигнал/помеха на входе приемника БПЛА с фиксацией в памяти полученного значения для текущего момента времени с применением уравнения радиопротиводействия для линий радиосвязи на основе уравнения радиопередачи [5]:

$$\frac{P_1 \cdot G_1 \cdot K_{U12}^2 \cdot K_{U21}^2 \cdot D_{23}^2(t) \cdot F_{12}(t)}{P_3 \cdot G_3 \cdot K_{U32}^2 \cdot K_{U23}^2 \cdot D_{12}^2(t) \cdot F_{32}(t)} \geq K_{II} \quad (5)$$

Затем, производится перемещение подвижных объектов по траектории движения на расстояние  $v \Delta t$ , присвоение новых значений их координат и времени  $t = t + \Delta t$ , после чего проверяется условие достижения БПЛА конечной точки траектории движения. Если БПЛА не достиг конечной точки траектории, цикл расчетов продолжается, в противном случае цикл прерывается и проводится расчет вероятности успешного управления БПЛА,

Значение вероятности успешного управления БПЛА и график изменения значения помеха/сигнал во времени выводятся на экран в окне результатов эксперимента.

## **2. Реализация имитационной модели.**

В соответствии с приведенными алгоритмами была разработана имитационная модель в среде Anylogic, выбор которой обусловлен следующими факторами:

- возможность одновременного использования различных подходов имитационного моделирования;

- возможности проектирования и визуализации, присущие пакетам моделирования высокого уровня (OPNET Modeler, QUALNet, Network Simulator, ns2 и др.) и глубокой проработки функционирования отдельных элементов с использованием языка Java, характерной для низкоуровневых сред программирования (Eclipse, CodeGear RAD Studio, Microsoft Visual Studio и др.);

- наличие средств автоматизации планирования и проведения исследовательских экспериментов;

- возможность построения в автоматическом режиме зависимостей характеристик модели от различных параметров;

- возможность управления ходом эксперимента во время его выполнения;

- возможность визуализации процессов динамических систем с помощью трехмерной презентации, способствующей лучшему восприятию модели при ее отладке и демонстрации работы.

Программная реализация выполнена на основе использования агентного подхода, заключающегося в представлении исследуемой системы в виде совокупности взаимодействующих активных объектов. Аргументами в пользу применения агентного подхода являются наличие в системе активных объектов с отчетливо выраженным индивидуальным поведением, рассмотрение глобального поведения системы как результата совокупной деятельности активных объектов.

Активными объектами (агентами) в рамках решаемой задачи заданы БПЛА (агент UAV), оператор БПЛА (агент Operator), источник помех (агент SourceRad). Кроме того, агент SourceRad содержит внутри себя агент Antenna, включающий параметры углов ориентации антенны. Внутри агента Antenna, в свою очередь, создан агент DNA, содержащий параметры диаграммы направленности антенны. Общий вид разработанной модели представлен на рисунке 3. Для более удобного восприятия модели при ее отладке и демонстрации работы, активные объекты, а также трехмерное пространство, в котором они перемещаются, были визуализированы с помощью трехмерной презентации Anylogic.

Перед началом эксперимента задаются траектории движения БПЛА и источника помех путем изменения положения точек кривых Polyline1 и Polyline2. После этого производится запуск модели и на экран выводится форма ввода основных исходных данных рассматриваемой системы (рисунок 7). После ввода исходных данных и установки параметров на исходные позиции начинается эксперимент, в течение которого на основном экране эксперимента наблюдается перемещение БПЛА и источника непреднамеренных помех (рисунок 6), а также

текущие значения переменных, используемых при расчетах. В ходе эксперимента производится расчет отношения сигнал/ помеха на входе приемника БПЛА с учетом текущей ориентации передающей антенны источника непреднамеренных помех. Эксперимент продолжается до момента прибытия БПЛА в конечную точку траектории.

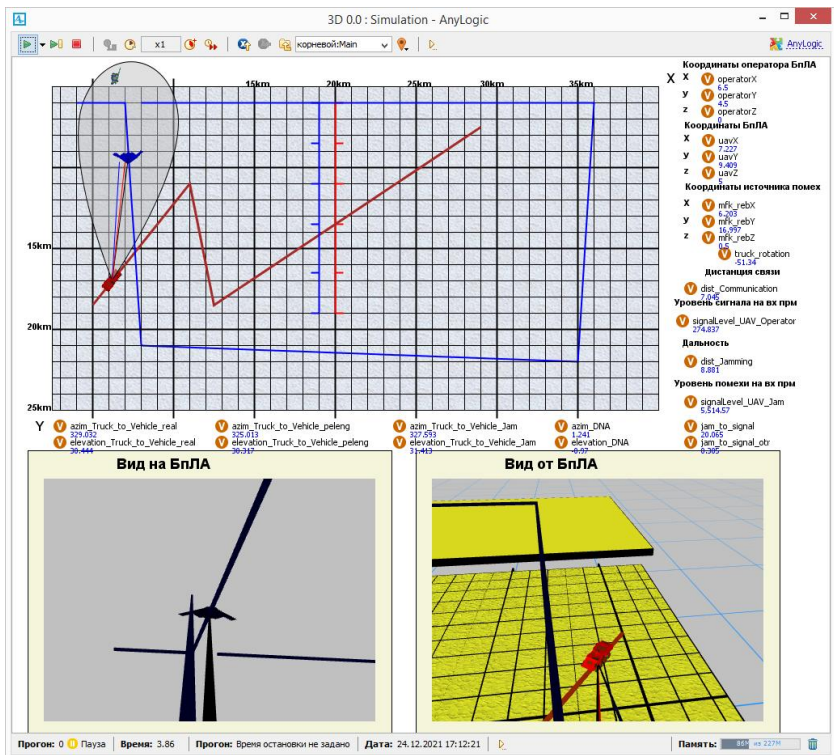


Рис. 3. Общий вид имитационной модели в среде Anylogic

По достижении БПЛА конечной точки траектории эксперимент останавливается и на экран выводятся результаты, экранная форма которых представлена на рисунке 4. В результатах проведенного эксперимента отображается график изменения отношения сигнал/помеха в ходе эксперимента, а также значение направления от источника помех на БПЛА по азимуту и углу места и значение вероятности успешного управления БПЛА.

Для обеспечения требуемой точности исследования проводятся сериями экспериментов, для усреднения результатов и анализа



зависимостей между характеристиками источников помех, приемопередающей аппаратуры БПЛА и пульта управления оператора, и эффективностью воздействия помех на канал управления при заданных пространственно-энергетических характеристиках системы.

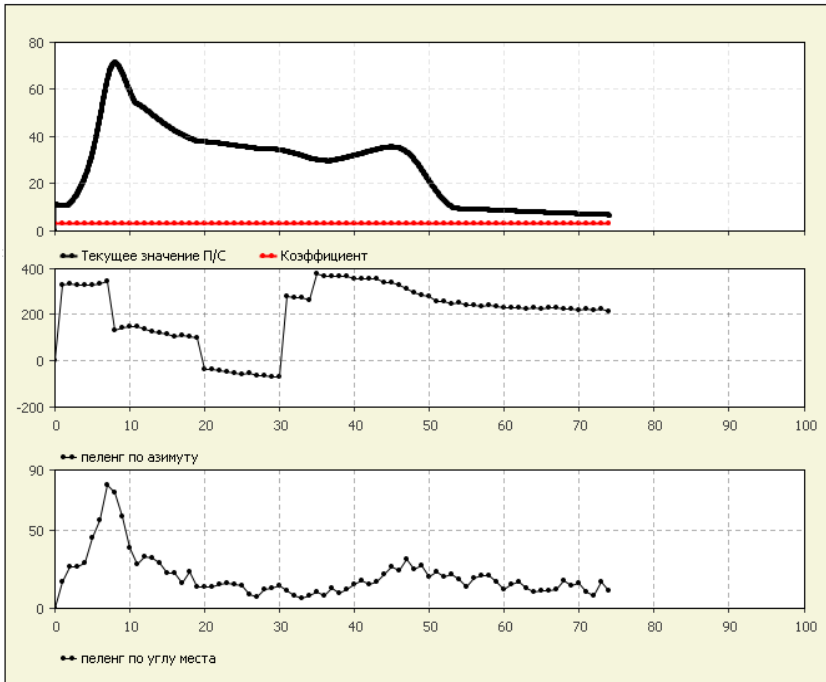


Рис. 4. Отображение выходных результатов моделирования

Необходимое количество реализаций рассчитывается с применением выражения для количества независимых опытов, в каждом из которых событие появляется с заданной вероятностью [6]:

$$N = \frac{p(1-p)}{\varepsilon^2} \left[ \Phi^{-1} \left( \frac{1}{2} \varrho \right) \right]^2 \quad (6)$$

где  $\varrho$  – «уровень доверия», т.е. вероятность того, что частота события отклонится от заданной вероятности  $p$  менее чем на  $\varepsilon$ ,  $\Phi^{-1}$  –

функция, обратная функции Лапласа, а значение функции  $\left[ \Phi^{-1}\left(\frac{1}{2}Q\right) \right]^2$  определяется значением из таблицы для заданного  $Q$ .

Таблица

Значения функции при заданном «уровне доверия»

$Q$	0,80	0,85	0,90	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99
$\left[ \Phi^{-1}\left(\frac{1}{2}Q\right) \right]^2$	1,64	2,08	2,71	3,84	4,21	4,49	5,43	6,61

Выходным показателем является средняя вероятность успешного управления БПЛА, вычисляемая с применением выражения (4) по результатам проведения серии экспериментов, для заданного множества вариантов пространственных характеристик системы.

### Заключение

Разработана динамическая имитационная модель, позволяющая оценить эффективность функционирования канала управления БПЛА в условиях воздействия непреднамеренных помех от движущегося источника с учетом изменения во времени отношения помеха/сигнал на входе приемника БПЛА при заданных траекториях и скоростях движения объектов, частотно-энергетических и пространственно-временных характеристиках аппаратуры управления оператора, беспилотного летательного аппарата и источника непреднамеренных помех. Разработанная модель применима для БПЛА, канал управления и передачи данных, которых работает в симплексном режиме с временным разделением. Выходным показателем является вероятность успешного управления беспилотным летательным аппаратом за время полета. Модель реализована в среде Anylogic с визуальным отображением объектов в трехмерном пространстве. Модель может быть использована для проведения научно-исследовательских экспериментов для сравнительного анализа различных вариантов построения аппаратуры управления БПЛА, при их проектировании и в ходе эксплуатации.

### Список литературы

1. Агалаков, Ю. Г. Особенности моделирования телекоммуникационных компонентов автоматизированных систем управления / Ю. Агалаков // Журнал РАН: Информационные технологии и вычислительные системы. – 2014. – №2. – С. 26 – 36.

2. Рябов, К. Азербайджан и Армения: беспилотное противостояние [Электронный ресурс] / Военное обозрение. – Режим доступа: <https://topwar.ru/176924-azerbajdzhan-i-armenija-bespilotnoe-protivostojanie.html>

3. Основы проектирования цифровых радиорелейных линий связи. Учебное пособие для вузов / М.А. Быховский [и др.]; под ред. М.А. Быховского.- М. : Горячая линия-Телеком, 2014. – 332 с.

4. Типикин, А.А. Моделирование антенных устройств в Matlab с использованием пакета расширения Antenna Toolbox / А.А. Типикин. – М.: Солон-Пресс, 2016. – 116 с.

5. Осипов, А.С. Военно-техническая подготовка. Военно-технические основы построения средств и комплексов РЭП: учебник / А.С. Осипов; под науч. ред. Е.Н. Гарина. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. – 344 с.

6. Вентцель, Е.С. Исследование операций / Е.С. Вентцель. – М. : Сов. Радио, 1972. – 552 с.