

УДК 621.391

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ
НА РАДИОЛОКАЦИОННОМ ИЗОБРАЖЕНИИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ
СТАНЦИЙ С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ****Р.В. Антипенский, Д.В. Смирнов (Воронеж)**

В настоящее время авиация армий иностранных государств, которая все больше использует беспилотные летательные аппараты (БПЛА) с различной дальностью действия, обеспечивает надежное обнаружение и эффективное поражение различных объектов высокоточным оружием (ВТО) на оперативную глубину построения войск. В этих условиях на первый план выдвигается необходимость защиты вооружения, военной техники, войск и объектов от воздушной радиолокационной разведки с использованием БПЛА, одним из путей решения которой является радиоэлектронное подавление (РЭП) [1-3] бортовых систем разведки, целеуказания и наведения. При этом наиболее перспективным способом РЭП разведывательно-ударных БПЛА, оснащенных РЛС с синтезированием апертуры антенны (РСА), является реализация бескомпроматных способов информационного противодействия путем формирования радиолокационных изображений (РЛИ) ложных наземных объектов на основе использования ретрансляционных или сигналоподобных помех [4]. В известных работах [5-8], посвященных способам маскирования защищаемых объектов на РЛИ, рассматриваются вопросы воздействия помех на РСА воздушного и космического базирования шумовыми и имитирующими помехами. При этом мало освещенной остается оценка влияния ошибок определения траекторных и сигнальных параметров РСА БПЛА на качество формирования ложных объектов на радиолокационном изображении. Цель работы – разработка модели и методики анализа влияния ошибок определения траекторных и сигнальных параметров РСА БПЛА подсистемой РТР перспективного комплекса подавления РСА на качество формирования ложных объектов на радиолокационном изображении, получаемым противником в результате ведения воздушной РЛР.

Имитационно-аналитическая модель для анализа влияния ошибок определения траекторных и сигнальных параметров РСА БПЛА на РЛИ объектов

В работах [5-8] на основе алгоритма обработки сигналов и помех в РСА получены аналитические выражения выходного сигнала оптимального устройства РСА при приеме сигналоподобных помех с неточностью в установке длительности, центральной частоты и девиации, определенных с некоторыми ошибками в результате ведения РТР. При этом не рассматривается влияние ошибок определения траекторных и сигнальных параметров РСА на качество РЛИ в результате воздействия сигналоподобных помех, сформированных по результатам ведения РТР, что не позволяет сформулировать детальные требования в точности оценки параметров зондирующих сигналов РСА.

На основе алгоритма формирования отраженного от имитируемой цели сигнала, представленного в работе [3], разработана модель и методика анализа влияния ошибок определения траекторных и сигнальных параметров РСА БПЛА подсистемой РТР перспективного комплекса подавления РСА с помощью сигналоподобных помех на качество формирования ложных объектов на РЛИ. Рассматривается перспективный комплекс РЭП РСА на основе малогабаритных пространственно-распределенных модулей с формированием сигналоподобных помех (подобных сигналам РСА). На рисунке 1 представлена геометрия наземной пространственно-распределенной подсистемы РТР БПЛА с РСА, которая осуществляет пеленгацию, определение координат БПЛА, оценку траекторных и сигнальных параметров РСА. Полагаем, что

одиночный разведывательный БПЛА типа RQ-4A(B) Global Hawk или MQ-9 Reaper с РСА выполняет полет на высоте H со скоростью V в направлении, перпендикулярном осевой линии наземного защищаемого объекта с координатами $(x_{об}, y_{об})$. Начальные координаты БПЛА $(0, Y_0, H)$, $Y_0 = y_{об} - L_c/2$, где L_c – длина участка синтезирования апертуры. Наземная пространственно-распределенная подсистема РТР включает N постов с координатами $(x_{пi}, y_{пi})$, где $i = 1...N$, при этом один из постов выполняет функции модуля управления подсистемой РТР и формирует сигналоподобные помехи. Ограничением модели является тот факт, что скорость и время формирования помех идеальны и не влияют на эффективность воздействия на РСА противника.

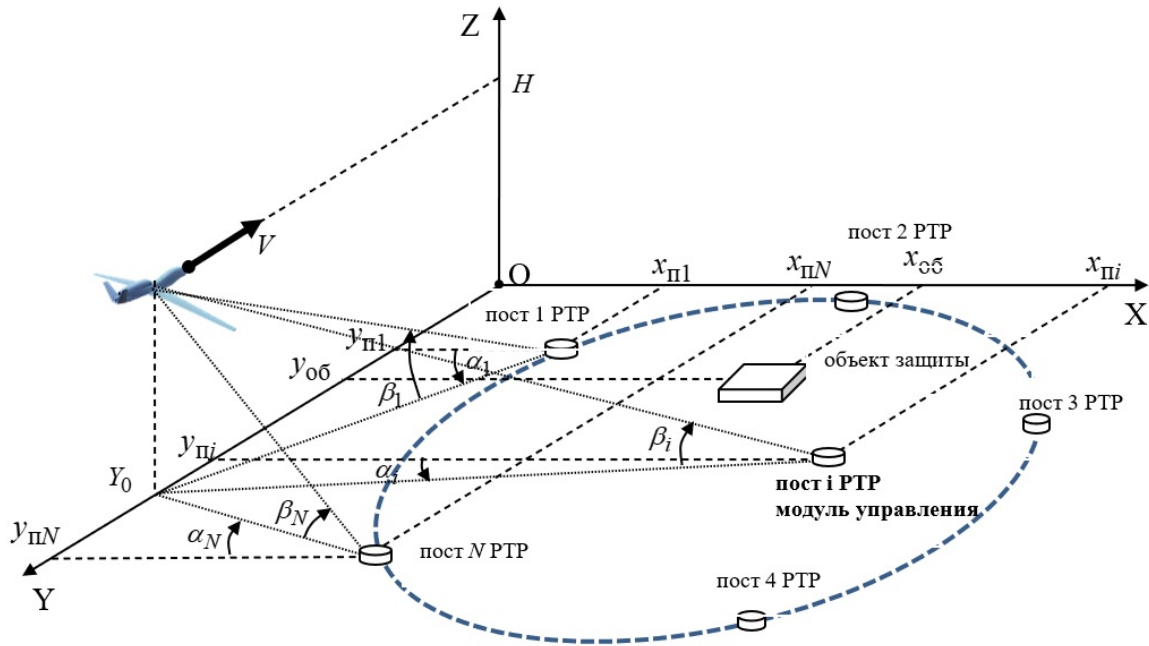


Рис. 1 – Геометрия пространственно-распределенной подсистемы РТР БПЛА с РСА

На первом этапе в соответствии с алгоритмом работы подсистемы РТР, рассмотренным в [3,13], определяются координаты и параметры движения БПЛА с РСА, параметры зондирующих сигналов РСА (центральная частота, вид модуляции, ширина спектра, частота повторения импульсов, поляризация, энергетические параметры и др.). Параметры определяются с некоторыми ошибками, изменяя которые в определенных пределах мы можем в дальнейшем оценить их влияние на качество формирования ложных объектов на РЛИ в РСА.

На втором этапе осуществляется загрузка из банка данных файла модели объекта имитации, выбор которого проводится с учетом выбранного сценария. На основе заданных на первом этапе параметров рассчитывается мгновенный ракурс облучения имитируемого объекта, относительно которого производится выборка из модели видимых фазетов (точек, соответствующих их центрам масс).

Проводимый на третьем этапе расчет комплексной огибающей траекторного сигнала сводится к расчету амплитудно-частотных характеристик эхосигнала, зависящих от характера изменения положения РСА относительно видимых точек в составе ложного объекта. Далее выполняется синтез имитирующего траекторного сигнала, формирующего на РЛИ ложную цель, и его запись в оперативную память модуля управления (формирователя помехи). Излучение каждой строки матрицы

радиоголограммы осуществляется в ответ на принятый зондирующий сигнал РСА, представляющий собой линейно-частотно-модулированное колебание с шириной спектра Δf_c , и периодом модуляции T_m .

При этом на сигнальном уровне в модели используется зондирующий сигнал с линейной частотной модуляцией для фацетной модели поверхности m, n -отражателя [9]:

$$S_{m,n}(t_m) = U_{m,n} \cdot \cos \left(2\pi f_0 t_m + \frac{\mu t_m^2}{2} + \phi_0 \right), \quad (1)$$

где f_0 – начальная частота радиоимпульса, $t_m \in [0, T_m]$ – текущее время, T_m – период модуляции (длительность зондирующего радиоимпульса), $\mu = \frac{\Delta f_c}{T_m}$ – скорость изменения частоты в ЛЧМ радиоимпульсе, Δf_c – ширина спектра сигнала, ϕ_0 – начальная фаза ЛЧМ сигнала, $U_{m,n}$ – амплитуда сигнала. Выражение для имитируемого эхосигнала, отраженного от m, n -отражателя, имеет следующий вид:

$$S_{m,n}(t_m, k) = A_{m,n} \cdot \cos \left(2\pi f_0 (t_m - \tau_{m,n}(t_m, k)) + \frac{\mu (t_m - \tau_{m,n}(t_m, k))^2}{2} + \phi_0 \right), \quad (2)$$

где k – номер зондирования в течение интервала синтезирования апертуры в РСА, $\tau_{m,n}(t_m, k) = \frac{R_{m,n}(t_m, k)}{c}$ – время запаздывания эхосигнала, c – скорость света, $R_{m,n}(t_m, k)$ – расстояние между РСА и m, n -отражателем, определяемое выражением:

$$R_{m,n}(t_m, k) = \sqrt{h_n^2 + x_{0m}^2 + (y_{0n} - V_n(t_m + kT_m))^2}, \quad (3)$$

где h_n, V_n – высота и скорость носителя РСА, x_{0m}, y_{0n} – смещение m, n -отражателя по горизонтальной и путевой дальности относительно фазового центра антенны в момент начала интервала синтезирования ($t_m=0, k=0$). При этом амплитудный множитель рассчитывается в соответствии с выражением:

$$A_{m,n} = \sqrt{\frac{P_{\text{ПРД}} G_{\text{ПРД}} G_{\text{ПРМ}} \lambda^2 \sigma_\phi \Delta x \Delta y \cos \alpha}{(4\pi)^3 (R_{m,n}(t_m, k))^4 L}}, \quad (4)$$

где $P_{\text{ПРД}}$ – средняя мощность зондирующего сигнала; $G_{\text{ПРД}}, G_{\text{ПРМ}}$ – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн РСА соответственно; λ – длина волны; σ_ϕ – удельная ЭПР фона; L – суммарные потери в антенно-фидерном тракте и на трассе распространения радиоволны; α – угол визирования, $\Delta x, \Delta y$ – заданные размеры фацет по горизонтальной и путевой дальности, определяемые детализацией РЛИ.

Для анализа качества формирования объектов на РЛИ в РСА в состав модели включен блок визуализации. В этом блоке выводится РЛИ реального объекта, РЛИ ложного объекта, РЛИ, формируемого на основе эхосигналов от реального и ложного объектов. На рисунке 2 представлена структура имитационно-аналитической модели для анализа влияния ошибок определения траекторных и сигнальных параметров РСА БпЛА подсистемой РТР перспективного комплекса подавления РСА на качество формирования объектов на РЛИ в РСА противника.

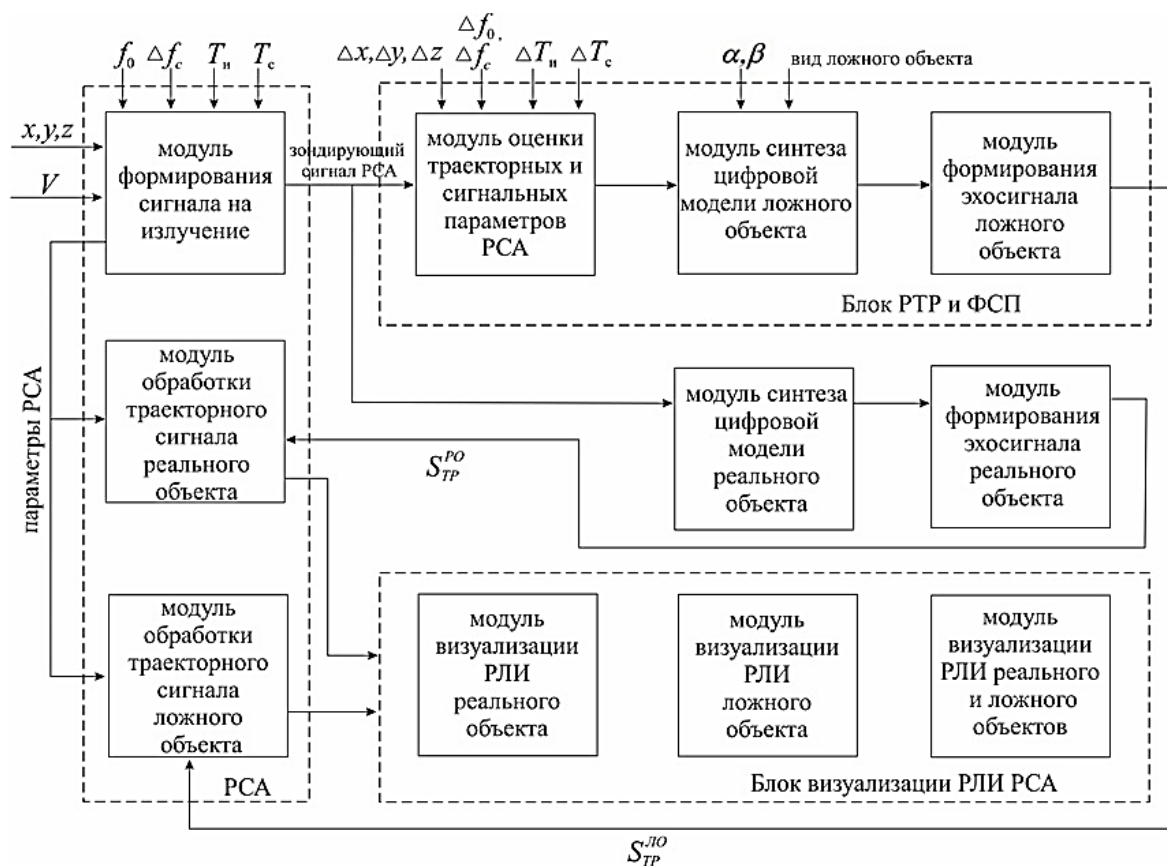


Рис.2 – Структура имитационно-аналитической модели для анализа влияния ошибок определения траекторных и сигнальных параметров РСА БпЛА подсистемой РТР перспективного комплекса подавления РСА на качество формирования объектов на РЛИ

Методика анализа влияния ошибок определения траекторных и сигнальных параметров РСА БпЛА

С использованием разработанной имитационно-аналитической модели предложена следующая методика анализа влияния ошибок определения траекторных и сигнальных параметров РСА БпЛА подсистемой РТР перспективного комплекса подавления РСА на качество формирования объектов на РЛИ:

1. Ввод исходных данных в модель, формирование и излучение зондирующего сигнала РСА.
2. Моделирование работы подсистемы РТР, определение траекторных и сигнальных параметров подсистемой РТР.
3. Загрузка из банка данных файла модели объектов имитации (реального и ложного), расчет мгновенного ракурса облучения имитируемых объектов, выборка видимых фазовых моделей объектов, синтез цифровых образов имитируемых объектов.
4. Расчет эхо-сигналов и синтез траекторных сигналов реального и ложного объектов.
5. Прием и обработка траекторных сигналов реального и ложного объектов.
6. Визуализация и оценка расхождения имитируемых реального и ложного объектов на РЛИ для различных ошибок оценки траекторных и сигнальных параметров РСА подсистемой РТР.
7. Определение максимально допустимых ошибок оценки траекторных и сигнальных параметров РСА подсистемой РТР перспективного комплекса подавления РСА.

Анализ влияния ошибок определения сигнальных и траекторных параметров РСА БПЛА на качество РЛИ при воздействии сигналоподобных помех

Проведен анализ влияния ошибок определения сигнальных и траекторных параметров РСА БПЛА на качество формирования объектов на РЛИ. Моделирование выполнялось в среде MATLAB с использованием данных математической модели РСА, рассмотренной в [10], типичным представителем которой является РСА «HISAR», размещаемая на БПЛА типа RQ-4A(B) [4]. При этом в качестве исходных данных приняты следующие характеристики РСА: рабочая частота 10 ГГц, разрешение по дальности и азимуту 3 м, при котором девиация частоты составит 50 МГц, период модуляции 3 мкс, частота повторения импульсов 1 кГц, частота дискретизации сигнала 120 МГц. Кроме того, приняты следующие значения тактических параметров: максимальная дальность обнаружения 2500 м, время синтезирования 4 с, скорость полета носителя РСА 100 м/с. При проведении моделирования предполагалось, что траектория полета носителя прямолинейна, его скорость постоянна, а ее вектор коллинеарен оси X глобальной системы координат, имитируется семь точечных отражателей.

На рисунке 3 представлены РЛИ имитируемых объектов реального, ложного (с ошибкой оценки параметра), одновременно реального и ложного объектов, при этом ошибка оценки несущей частоты составила 1% (а) и 10% (б).

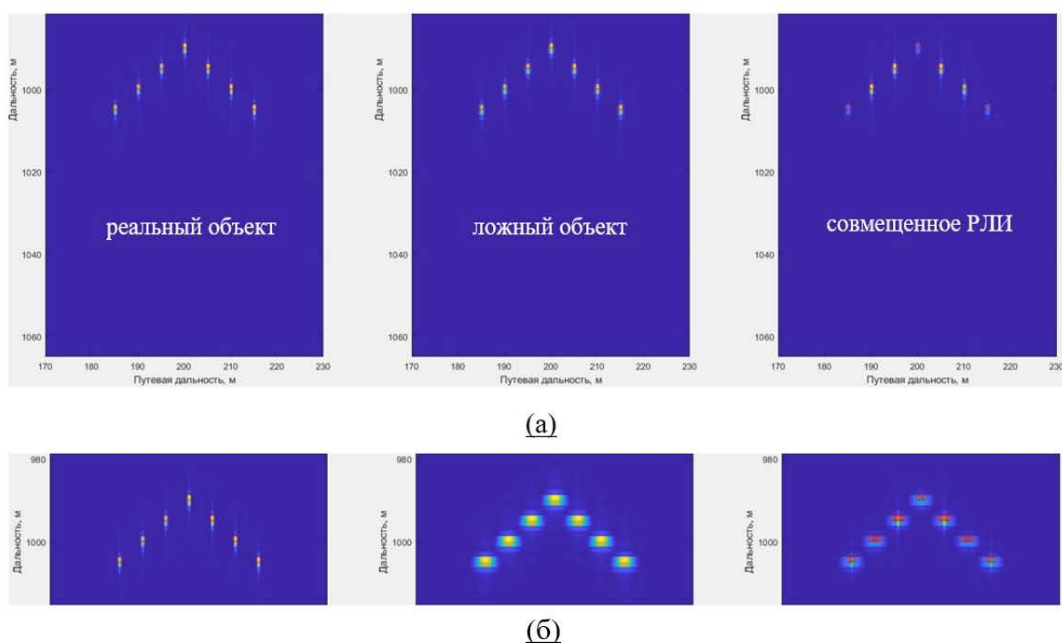


Рис. 3 – РЛИ реального и ложного объектов с ошибкой оценки несущей частоты РСА 1% (а) и 10% (б)

С использованием разработанных модели и методики также проведен анализ влияния ошибок определения траекторных параметров РСА БПЛА на качество РЛИ при воздействии сигналоподобных помех – ошибок определения координат РСА и скорости носителя на качество РЛИ.

Таким образом, рассмотрено моделирование процесса влияния ошибок определения траекторных и сигнальных параметров РСА БПЛА подсистемой РТР перспективного комплекса подавления РСА на качество формирования ложных объектов на радиолокационном изображении, получаемым противником в результате ведения воздушной РЛР с использованием РСА. Установлено, что допустимыми

являются ошибки оценок сигнальных параметров РСА: несущей частоты <10%, ширины спектра <1%, длительности импульса <1%. При формировании ложных объектов на РЛИ РСА с помощью сигналоподобных помех важно исключить изменение ошибки оценки координат от импульса к импульсу в пределах интервала синтезирования, при этом допустимой является ошибка оценки координат носителя РСА <15 м при разрешении по дальности и азимуту 3 м.

Литература

1. **Макаренко С.И.** Противодействие беспилотным летательным аппаратам. Монография. – СПб.: Научно-технологические технологии, 2020. – 204 С.
2. **Афонин И.Е., Макаренко С.И., Петров С.В., Привалов А.А.** Анализ опыта боевого применения групп беспилотных летательных аппаратов для поражения зенитно-ракетных комплексов системы противовоздушной обороны в военных конфликтах в Сирии, в Ливии и в Нагорном Карабахе // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 4. С. 163-191. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10406.
3. **Кузнецов В.А., Амбросов Д.В.** Динамическая модель пространственно-распределенной воздушной цели // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 2. С. 215-235.
4. **Антипенский Р.В.** Проблемные вопросы и пути их разрешения при создании комплексов радиоэлектронного подавления перспективных бортовых радиолокационных станций на основе использования сигналоподобных помех // Вестник ВУНЦ ВВС ВВА, 2017, № 3(30). С. 43-48.
5. **Арапов Д.В., Лихачев В.П., Шляхин В.М.** Особенности преднамеренного искажения радиолокационных изображений целей, формируемых РЛС с цифровым синтезированием ДНА. Изв.вузов. Сер. Радиоэлектроника. 2002 №4. С. 68-75.
6. **Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П.** Космическая радиолокационная съемка земной поверхности в условиях помех. Монография. Воронеж: Научная книга, 2014. 460 с.
7. **Добыкин В.Д., Куприянов А.И., Пономарев В.Г., Шустов Л.Н.** Радиоэлектронная борьба. Цифровое запоминание и воспроизведение радиосигналов и электромагнитных волн. Под ред. А.И. Куприянова. – М.:Вузовская книга, 2009. – 360 с.
8. **Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П.** Маскирование радиолокационных изображений пространственно-протяженных объектов мультипликативными ретранслированными помехами // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. 2004. Т.47. № -10. С. 62-66.
9. **Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П., Рязанцев Л.Б.** Малогабаритные многофункциональные РЛС с непрерывным частотно-модулированным излучением. – М: Радиотехника, 2020. – 280 с.
10. **Cumming I.G., Wong F.H.** Digital processing of synthetic aperture radar data. – London: Artech House Publishers, 2005. – 660 p.