

УДК 621.396.96

***V.A. Nenashev***

Доктор технических наук, доцент кафедры «Конструирования и технологий электронных и лазерных средств», доцент

***R.M. Voronov***

Магистрант

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, Россия

### **Имитационная модель процесса формирования радиолокационных видеокадров в передних зонах обзора малогабаритных бортовых РЛС двухпозиционной системы**

Статья посвящена разработке имитационной модели формирования видеокадров для малогабаритных бортовых радиолокационных станций (РЛС), функционирующих в составе двухпозиционной системы. Сложность непосредственного экспериментального исследования характеристик таких систем в передних зонах обзора обуславливает необходимость применения методов математического и имитационного моделирования. В работе предложен подход, учитывающий геометрию взаимного расположения передающей и приемной позиций, динамику движения носителей, а также энергетические и частотно-временные параметры зондирующих сигналов. Модель реализует алгоритмы синтеза радиолокационных кадров с учетом статистических характеристик фона и помеховой обстановки. Проведена оценка адекватности модели путем сравнения с упрощенными аналитическими расчетами. Разработанный программный инструментарий позволяет проводить параметрическую оптимизацию режимов обзора для повышения разрешающей способности и достоверности обнаружения целей в ближней зоне.

***Ключевые слова:*** двухпозиционная радиолокация, имитационное моделирование, формирование видеокадров, малогабаритные бортовые РЛС, передний обзор, алгоритм обратного проектирования, разрешающая способность.

***V.A. Nenashev***

Dr. Sci. (Technical), Associate Professor, Dept. of Design and Technology of Electronic and Laser Systems,

***R.M. Voronov***

Master's student

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,  
67A Bolshaya Morskaya St., St. Petersburg 190000, Russia

# SIMULATION MODEL OF RADAR VIDEO FRAME FORMATION IN FORWARD OBSERVATION ZONES OF SMALL-SIZED AIRBORNE BISTATIC RADAR SYSTEMS

This article is devoted to the development of a simulation model for video frame generation for compact airborne radars operating as part of a two-position system. The complexity of direct experimental study of the characteristics of such systems in forward viewing zones necessitates the use of mathematical modeling and simulation methods. This paper proposes an approach that takes into account the geometry of the relative positions of the transmitting and receiving positions, the dynamics of the carrier motion, and the energy and frequency-time parameters of the probing signals. The model implements algorithms for synthesizing radar frames, taking into account the statistical characteristics of the background and interference environment. The adequacy of the model is assessed by comparison with simplified analytical calculations. The developed software tools enable parametric optimization of viewing modes to improve the resolution and reliability of target detection in the near zone.

**Keywords:** two-position radar, simulation modeling, video frame generation, small-sized airborne radars, forward looking, back projection algorithm, resolution.

## Введение

Развитие малоразмерных беспилотных авиационных комплексов формирует устойчивый спрос на компактные бортовые РЛС, способные решать задачи обзора земной поверхности в передней полусфере [1, 2]. Двухпозиционная конфигурация, при которой передатчик и приёмник разнесены по разным носителям, позволяет существенно снизить массогабаритные характеристики бортового оборудования каждого носителя, расширить угловое перекрытие зоны наблюдения и повысить скрытность работы приёмного модуля [3, 4].

Режим переднего обзора принципиально отличается от традиционного бокового: доплеровская история цели симметрична относительно точки наибольшего сближения, что исключает применение стандартных алгоритмов синтеза апертуры [5]. В двухпозиционной геометрии дополнительную сложность вносит непрерывное изменение двухпозиционного угла и суммарной задержки по мере сближения носителей, требующее адаптивной фазовой коррекции при формировании каждого пикселя изображения [6]. Высокая стоимость натурных экспериментов и трудность воспроизведения заданных условий наблюдения определяют имитационное моделирование как основной инструмент исследования характеристик таких систем на этапе проектирования [7].

Цель настоящей работы — разработка имитационной модели, воспроизводящей процесс формирования радиолокационных видеокадров в передних зонах обзора двухпозиционной РЛС с малогабаритными носителями, и её верификация путём сравнения с аналитическими оценками характеристик обнаружения и разрешающей способности.

### Имитационная модель и результаты моделирования

Геометрия рассматриваемой конфигурации показана на рис. 1. Носитель передатчика  $N_T$  и носитель приёмника  $N_R$  движутся по сближающимся траекториям на высотах  $H_T$  и  $H_R$  соответственно. Ключевым геометрическим параметром системы является двухпозиционный угол  $\beta$  — угол между направлениями на передатчик и приёмник из точки расположения цели. Поверхности равных двухпозиционных задержек образуют эллипсоиды с фокусами в точках расположения носителей; их проекции на земную плоскость задают форму и размер элементов разрешения формируемого изображения [3, 5]. При фиксированной полосе зондирующего сигнала увеличение угла  $\beta$  приводит к улучшению разрешения по дальности, однако сопровождается ростом азимутального размера элемента разрешения и снижением отношения сигнал/шум вследствие уменьшения эффективной площади рассеяния [8].

Геометрия двухпозиционной РЛС в режиме переднего обзора

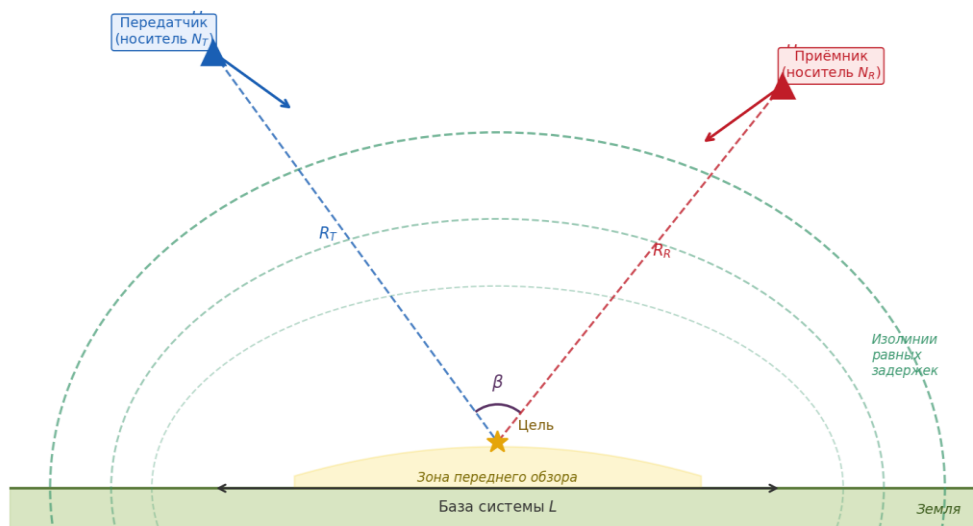


Рисунок 1 - Геометрия двухпозиционной РЛС в режиме переднего обзора

Имитационная модель реализует трёхэтапную процедуру синтеза. На первом этапе генерируется сцена наблюдения: каждому элементу разрешения назначается комплексный коэффициент рассеяния, распределённый по закону Рэлея, что соответствует классической модели однородной поверхности [9]. На втором этапе для каждой позиции синтеза вычисляется суммарный принятый сигнал как когерентная суперпозиция вкладов всех

элементов сцены с учётом двухпозиционной задержки и весовых коэффициентов, пропорциональных произведению диаграмм направленности антенн и двухпозиционной эффективной площади рассеяния цели. На третьем этапе синтез видеокadra выполняется методом обратного проецирования [10, 11]: яркость каждого пикселя формируется путём когерентного накопления отсчётов принятого сигнала с фазовой коррекцией, вычисляемой по текущему значению двухпозиционной задержки. Данный подход, в отличие от частотно-волновых алгоритмов, не требует аппроксимации траектории и обеспечивает корректное фокусирование при произвольной геометрии движения носителей [6, 12].

Верификация модели проводилась путём сравнения разрешения по дальности  $\delta_r$ , азимутального разрешения  $\delta_{az}$ , отношения сигнал/шум (ОСШ) в синтезированном изображении и вероятности обнаружения  $P_{обн}$  с аналитическими оценками при полосе зондирующего сигнала  $\Delta f = 150$  МГц. В качестве опорного значения использован моностатический режим ( $\beta = 0^\circ$ ). Результаты систематизированы в таблице 1.

**Таблица 1 - Сравнение характеристик конфигураций РЛС**

Режим работы	L, км	$\beta$ , °	$\delta_r$ аналит., м	$\delta_r$ модель, м	$\delta_{az}$ , м	ОСШ, дБ	$P_{обн}$
Моностатика (ref)	—	0	20,0	20,8	8,2	15,1	0,91
Двухпозиц., ближняя зона	10	25	18,5	19,3	9,6	14,4	0,88
Двухпозиц., средняя зона	25	55	12,1	12,8	11,3	12,9	0,82
Двухпозиц., дальняя зона	45	90	7,1	7,6	14,0	11,2	0,74
Двухпозиц., макс. угол	50	110	5,4	5,9	16,8	9,8	0,65

Из таблицы 1 следует, что увеличение двухпозиционного угла  $\beta$  от  $0^\circ$  до  $110^\circ$  обеспечивает улучшение разрешения по дальности в 3,5 раза относительно моностатического режима. Расхождение аналитических и модельных оценок  $\delta_r$  не превышает 9,5% во всём диапазоне углов, что подтверждает адекватность реализованного алгоритма синтеза. Вместе с тем прирост разрешения по дальности сопровождается деградацией азимутальных характеристик: при  $\beta = 110^\circ$  азимутальное разрешение ухудшается в 2,0 раза относительно моностатики, а ОСШ снижается с 15,1 до 9,8 дБ. Следствием снижения ОСШ является падение вероятности обнаружения одиночной точечной цели с  $P_{обн} = 0,91$  до  $P_{обн} = 0,65$  при одинаковом пороге обнаружения. Полученные зависимости позволяют выбирать рабочее значение базы системы L исходя из требований к разрешению и достоверности обнаружения в конкретной задаче. В частности, диапазон L

= 25–45 км ( $\beta \approx 55^\circ\text{--}90^\circ$ ) представляется наиболее сбалансированным: улучшение  $\delta_r$  составляет 1,6–2,8 раза при сохранении  $P_{\text{обн}} \geq 0,74$ .

### **Заключение**

Разработана имитационная модель формирования радиолокационных видеокадров для малогабаритных бортовых РЛС в составе двухпозиционной системы в режиме переднего обзора. Алгоритм синтеза на основе обратного проецирования с явной фазовой коррекцией по двухпозиционной задержке обеспечивает корректное фокусирование при переменном двухпозиционном угле без аппроксимации траектории носителей. Верификация показала расхождение с аналитическими оценками разрешения по дальности не более 9,5%. Установлено, что рабочий диапазон базы  $L = 25\text{--}45$  км обеспечивает наилучшее сочетание разрешающей способности и вероятности обнаружения. Разработанный инструментарий предназначен для параметрической оптимизации двухпозиционных РЛС переднего обзора при проектировании систем на базе малогабаритных носителей.

### **Информация о финансовой поддержке**

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-79-10259).

### **Библиографический список**

1. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. М.: Радио и связь, 1993. 416 с.
2. Нечаев Ю.Б., Пчелин В.К. Малогабаритные бортовые радиолокационные системы: проблемы и перспективы //Авиакосмическое приборостроение. 2020. № 7. С. 12–21.
3. Willis N.J. Bistatic Radar. Raleigh: SciTech Publishing, 2005. 474 p.
4. Антипов В.Н. и др. Бортовые РЛС с синтезированной апертурой. М.: Машиностроение, 2016. 320 с.
5. Ворошилин Е.П. Синтез апертуры в бистатических РЛС переднего обзора // Радиолокация и радионавигация. 2019. № 1. С. 56–63.
6. Cherniakov M. (Ed.) Bistatic Radar: Principles and Practice. Chichester: Wiley, 2007. 414 p.
7. Куликов Г.В., Логинов А.А. Алгоритмы обработки сигналов в двухпозиционных РЛС бокового обзора // Радиотехника. 2018. № 4. С. 45–52.

8. Совмещение сформированных радиолокационных изображений с цифровой картой местности в бортовых системах оперативного мониторинга земной поверхности / А. А. Сенцов, В. А. Ненашев, С. А. Иванов, Е. Л. Турнецкая // Труды МАИ. – 2021. – № 117. – DOI 10.34759/trd-2021-117-08.

9. Cumming I.G., Wong F.H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data. Boston: Artech House, 2005. 625 p.

10. Моделирование сложных кодо-модулированных сигналов для современных систем обнаружения и передачи информации / В. А. Ненашев, А. М. Сергеев, И. А. Васильев // Научная сессия ГУАП: Сборник докладов научной сессии, посвященной Всемирному дню авиации и космонавтики. В 3-х частях, Санкт-Петербург, 08–12 апреля 2019 года. Том Часть II. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2019. С. 413-417.

11. Иванов В.Э., Семёнов Д.П. Синхронизация и компенсация движения в двухпозиционных РЛС // Информационно-управляющие системы. 2021. № 3. С. 34–42.

12. Анализ диаграммы направленности плоской многоэлементной активной фазированной антенной решетки / В. И. Тепликова, А. А. Сенцов, В. А. Ненашев, В. Б. Поляков // Труды МАИ. – 2022. – № 125. – DOI 10.34759/trd-2022-125-17.