

Сравнительный анализ разрешающей способности радиолокаторов высокого разрешения с жестко закрепленной и вращающейся антеннами

И. А. Макеев

БГТУ «Военмех» им. Д. Ф. Устинова

makeev_ia@voenmth.ru

Ю. В. Петров

БГТУ «Военмех» им. Д. Ф. Устинова

petrov_iuv@voenmeh.ru

Аннотация. В статье рассматриваются особенности формирования радиолокационного изображения в радиолокаторах высокого разрешения, где формирование траекторного сигнала происходит при одновременном прямолинейном движении носителя и повороте антенны в заданном угловом секторе в течение интервала синтезирования. Был проведен сравнительный анализ потенциальной разрешающей способности общеизвестных линейных радиолокаторов высокого разрешения (с фиксированными углами установки антенны) и радиолокаторов высокого разрешения с вращением антенны под фюзеляжем носителя (секторным обзором) при условии эквивалентности энергетических и временных параметров.

Ключевые слова: радиолокатор высокого разрешения; линейная траектория; подфюзеляжная антенна; секторный обзор; сканирование; вращение антенны; разрешающая способность

I. ВВЕДЕНИЕ

Применение радиолокационных станций высокого разрешения на вертолетных носителях сопряжено с рядом специфических ограничений. Классические методы, использующие режим бокового обзора (линейные), требуют значительного времени накопления сигнала для достижения высокого разрешения, что обусловлено относительно низкой путевой скоростью вертолета по сравнению с самолетами [1]. Это делает носитель уязвимым, а качество изображения чувствительным к нестабильностям траектории.

Альтернативным подходом является использование эффекта вращения антенны. Изначально концепция предполагала размещение антенн на законцовках лопастей несущего винта [2, 3], однако в данной работе рассматривается более практичная конфигурация: антенна расположена под фюзеляжем и вращается в горизонтальной плоскости (или в заданном секторе, например от 60° до 120°) с угловой скоростью, значительно меньшей скорости вращения винта. Это позволяет формировать апертуру за счет криволинейного движения фазового центра [4].

Целью данной работы является сравнительный анализ потенциальной разрешающей способности по

азимуту для радиолокаторов высокого разрешения с жестко закрепленной и вращающейся антеннами при идентичных условиях зондирования.

II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ АПЕРТУРЫ

A. Разрешающая способность классического бокового обзора (линейного)

В классическом случае с линейным перемещением антенны разрешающая способность по азимуту (путевой дальности) в сфокусированном режиме определяется длиной синтезированной апертуры. В идеальном сфокусированном режиме потенциальное линейное разрешение по азимуту ρ_a стремится к половине горизонтального размера реальной антенны и описывается выражением (1) [5, 6]:

$$\rho_a = \frac{L_a}{2}, \quad (1)$$

где L_a – физический (горизонтальный) размер реальной антенны. Это соотношение справедливо при условии, что обработка сигнала позволяет скомпенсировать фазовые набеги для всех элементов апертуры.

Однако реальная разрешающая способность ограничена временем синтезирования T_s , которое может обеспечить носитель. Для сфокусированной обработки требуемое разрешение ρ_a связано с необходимой длиной апертуры L_s соотношением (2):

$$L_s \approx \frac{\lambda R}{2\rho_a} \quad (2)$$

где λ – длина волны, R – наклонная дальность. При путевой скорости V вертолета время накопления составит (3):

$$T_s = \frac{L_s}{V} = \frac{\lambda R}{2\rho_a V} \quad (3)$$

Для вертолета, летящего со скоростью 50–70 м/с, время синтезирования для достижения разрешения в 5 м на дальности 10–15 км может составлять несколько секунд и более [1]. За это время вертолет проходит значительное расстояние, а траекторные нестабильности (вибрации, порывы ветра) вносят трудно компенсируемые фазовые ошибки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FZWF-2024-0002

В. Принцип действия радиолокатора высокого разрешения с вращающейся антенной

В рассматриваемой конфигурации вращающаяся антенна, установленная под фюзеляжем, совершает вращательное движение в горизонтальной плоскости (азимутальный сектор $\Delta\theta_{скан}$) одновременно с поступательным перемещением носителя. Траектория фазового центра антенны представляет собой комбинацию прямой линии (движение носителя) и дуги окружности (вращение). При наличии поступательного движения траектория становится сложной, что требует учета в алгоритмах фокусировки.

Ключевое отличие от классической схемы заключается в том, что доплеровское смещение частоты создается не только поступательным движением, но и тангенциальной скоростью вращающейся антенны. Это позволяет накапливать сигнал под разными углами визирования к одному и тому же элементу поверхности за один цикл поворота [4, 7].

Разрешающая способность по азимуту определяется шириной сектора обзора и накопленным углом поворота вектора «платформа-цель», в пределах которого происходит синтезирование $\Delta\Theta_{пол} = \Delta\theta_{скан} + \Delta\theta_{де}$, и длиной волны λ (4) [6]:

$$\rho_a^{нов} \approx \frac{\lambda}{2\Delta\Theta_{пол}} \quad (4)$$

Данная формула показывает, что разрешение зависит от ширины сектора обзора и смещения по углу относительно платформы (5).

$$\Delta\theta_{де} = \frac{V \cdot T_s \cdot \sin(\Theta)}{R_0} \quad (5)$$

где Θ – середина сектора обзора.

В отличие от линейного наблюдения, это разрешение потенциально может быть выше (значения $\Delta\Theta_{пол}$ в радианах могут быть >1), но оно становится зависимым от длины волны.

III. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ПАРАМЕТРАХ

Для корректного сравнения примем допущение, что оба локатора работают на равной высоте H , используют одинаковую длину волны λ , одинаковую мощность передатчика и идентичную длительность импульса (что дает равное разрешение по дальности $\delta r \approx c/2B$, где B – ширина спектра) [5].

А. Влияние скорости носителя

Классический случай: Разрешение напрямую зависит от пройденного пути. Для достижения $\rho_a=5$ м при физическом размере антенны $L_a=10$ м (теоретический

предел) требуется время синтезирования $T_s = \frac{\lambda R}{2\rho_a V}$.

Вращающаяся антенна: Скорость поступательного движения влияет на геометрию траектории, но не является единственным источником доплеровского набега фазы. Основной вклад вносит вращение. Это позволяет получать высокое разрешение даже при

низкой путевой скорости, включая режим висения (теоретически) [3, 8].

В. Равномерность разрешения по азимуту

Классический случай обеспечивает высокое разрешение только в зоне бокового обзора (перпендикулярно линии пути). При переднебоковом обзоре для достижения требуемого разрешения необходимо увеличивать интервал синтезирования, а в передней зоне (нулевой доплер) синтез классическими методами невозможен без использования дополнительных режимов.

Вращающаяся антенна позволяет создавать изображение поверхности, используя один и тот же интервал синтезирования в любом угловом направлении относительно линии пути (изотропное разрешение). Это особенно важно для вертолета, которому часто требуется обзор передней полусферы или обзор «под собой» [4, 7].

С. Время накопления и обработка сигналов

При равном интервале накопления сигналов, например $\Delta\theta_{скан}=60$ градусов ($\pi/3$ рад), вращающаяся антенна формирует апертуру за время одного цикла вращения. Для антенны под фюзеляжем скорость вращения невелика (единицы оборотов в минуту), что приводит к увеличению времени сбора данных для одного пикселя. Однако это время не требует прямолинейного пролета километрового участка маршрута.

Обработка сигналов в круговом обзоре сложнее. Если линейный метод использует алгоритмы согласованной фильтрации в прямоугольной системе координат, то вращающаяся требует обработки в полярной системе координат для компенсации миграции цели по элементам дальности и доплеровской частоты [3, 8].

Сводные данные сравнения представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Сводные данные сравнения алгоритмов

Параметр	Жестко закрепленная антенна	Вращающаяся антенна
Потенциальное разрешение	Не зависит от λ , R	Зависит от λ , размеров сектора обзора и смещения по углу относительно платформы
Зависимость от скорости	Требуется большая V для малого T_s	Возможна работа на малых скоростях и висения [3]
Сектор обзора	Узкая полоса вдоль трассы	Широкий сектор (до 360°), изотропное свойство [2, 4]
Время синтеза	Определяется скоростью и дальностью	Определяется скоростью вращения антенны
Сложность обработки	Умеренная (Доплеровская фильтрация)	Высокая (полярные форматы, учет кривизны волнового фронта) [9]

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Имитационное моделирование, описанное в работах [4, 7], подтверждает, что при использовании систем с вращающейся антенной на вертолетах возможно достижение разрешения менее метра, сопоставимого с самолетными локаторами, но без жестких требований к стабильности прямолинейного полета.

Для вертолетных носителей, характеризующихся вибрациями и возможностью резкого изменения курса, метод вращающейся антенны демонстрирует большую устойчивость к траекторным неустойчивостям. Поскольку синтез осуществляется в основном за счет управляемого вращения (кинематика которого известна точно), ошибки, вызванные случайными колебаниями корпуса, усредняются по-другому и легче подлежат компенсации с использованием данных инерциальных систем [1, 4].

Стоит отметить, что при размещении антенны под фюзеляжем, а не на лопастях, тангенциальная скорость вращения ниже, что снижает доплеровский сдвиг и требует более чувствительных приемников, но зато упрощает задачу передачи энергии и данных на вращающийся узел.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный сравнительный анализ показывает, что при эквивалентных параметрах зондирования вращающиеся радиолокаторы высокого разрешения имеют ряд принципиальных преимуществ перед классическими линейными радиолокаторами для вертолетных носителей:

- Высокое разрешение на малых скоростях: Радиолокаторы с вращающейся антенной позволяют получать высокодетальные радиолокационные изображения без необходимости длительного прямолинейного полета, что критически важно для выживаемости и маневренности вертолета.
- Изотропность обзора обеспечивается формирование изображения высокого качества в любом направлении, включая переднюю полусферу и зону «под вертолетом», что недостижимо для чисто бокового обзора.
- Потенциал разрешения: Теоретический предел разрешения в радиолокаторах высокого разрешения с вращающейся антенной определяется шириной сектора обзора и накопленным углом поворота вектора «платформа-цель», в пределах которого происходит синтезирование и может быть сделан выше, чем классический предел $L_a/2$ [7].

Недостатком является усложнение аппаратной части и алгоритмов цифровой обработки сигналов, требующих перехода к полярным форматам записи и учета трехмерности движения фазового центра. Тем не менее, современный уровень развития вычислительной техники позволяет реализовать такие алгоритмы в бортовом процессоре в масштабе реального времени [9].

Таким образом, для перспективных вертолетных комплексов радиолокационного мониторинга вращающиеся системы радиолокаторов высокого разрешения представляются более предпочтительными по сравнению с классическими линейными РСА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Патент РФ 2416809 С1. / Ключко В.К., Мойбенко В.И. Способ повышения разрешающей способности РЛС по углу при переднебоковом обзоре. Оpubл. 20.04.2011. Бюл. 11.
- [2] Klausning H., Bartsch N., Boesswetter C. A MM-Wave SAR-Design for Helicopter Application (ROSAR) // 16th European Microwave Conference, Dublin, Ireland. IEEE, 1986. P. 317-328.
- [3] Helmut Klausning, Wolfgang Keydel. Feasibility of a Synthetic Aperture Radar with Rotating Antennas (ROSAR) // IEEE Xplore. 1989.
- [4] Verba V.S., Tatarskiy B.G. New radar monitoring technologies of the land surface for helicopter carriers // Радиотехника. 2019. № 5. С. 44-50. DOI: 10.18127/j00338486-201905(1)-06.
- [5] Радиолокатор бокового обзора. Основы радиолокации. [Электронный ресурс] // Radartutorial.eu. — URL: <https://www.radartutorial.eu/20.airborne/ab06.ru.html> (дата обращения: 23.02.2026).
- [6] Azimuth Resolution // ScienceDirect Topics. — URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/azimuth-resolution> (дата обращения: 23.02.2026).
- [7] Higher resolution, three-dimensional images: Circular SAR // Fraunhofer FHR. — 2022. — URL: <https://www.fhr.fraunhofer.de/en/research/defense/circular-sar.html> (дата обращения: 23.02.2026).
- [8] Бабокин М.И., Савостьянов В.Ю. Выбор оптимальной частоты повторения импульсов в РСА с телескопическим обзором поверхности // Ural Radio Engineering Journal. 2024. Vol. 8, No. 4. С. 438–450. DOI:10.15826/urej.2024.8.4.002
- [9] Радиолокационные станции бокового обзора для пилотируемых и беспилотных ЛА // Каталог Оборудование. — URL: <https://www.oborudunion.ru> (дата обращения: 23.02.2026).