

Труды МАИ. 2025. № 144
Trudy MAI. 2025. No. 144. (In Russ.)

РАДИОТЕХНИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

Научная статья

УДК 621.396.969+004.932

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186312>

EDN: <https://www.elibrary.ru/NLITRT>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХПОЗИЦИОННОЙ РЛС АВИАЦИОННОГО БАЗИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ В ПЕРЕДНЕЙ ЗОНЕ ОБЗОРА

Владислав Валерьевич Калинин[✉], Семён Александрович Сергиев

АНО ВО «Университет Иннополис»

Иннополис, Россия

✉ v.kalinnikov@innopolis.ru

Аннотация. В исследовании представлена математическая модель для оценки параметров качества радиолокационного изображения, формируемого в передней зоне обзора двухпозиционной авиационной РЛС, работающей в X диапазоне. Показано, что при длине базы между носителями РЛС и высоте полета в 1000 м, углах курса главного лепестка диаграммы направленности передающей антенны от 0° до -60° и углах курса главного лепестка диаграммы направленности приемной антенны от 15° до 60° длина радиолокационного изображения меняется от 180 до 1300 м, а ширина – от 70 до 250 м. При отношении длины базы между носителями РЛС к высоте полета от 0,5 до 2,0, высоте полета в 1000 м, углах курса главного лепестка диаграммы

направленности передающей антенны от 0° до -45° и углах курса главного лепестка углах курса главного лепестка диаграммы направленности приемной антенны от 15° до 60° разрешение радиолокационного изображения лежит в пределах от 0,12 до 0,45 м по горизонтальной дальности и от 0,06 до 0,15 м по азимуту. Отношение сигнал/шум фона радиолокационного изображения изменяется примерно на 20 дБ в зависимости от типа подстилающей поверхности. Облачный слой между толщиной 900 м способен уменьшить отношение сигнал/шум на 0,3 дБ. Слой сильного дождя толщиной в 1000 м уменьшает эту величину на 4 дБ. Модель реализована в виде инструмента – онлайн калькулятора.

Ключевые слова: авиационная РЛС, двухпозиционная РЛС, передний обзор, разрешение радиолокационного изображения, отношение сигнал/шум радиолокационного изображения.

Для цитирования: Калинин В.В., Сергиев С.А. Моделирование двухпозиционной РЛС авиационного базирования для оценки качества радиолокационных изображений, формируемых в передней зоне обзора // Труды МАИ. 2025. № 144.

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186312>

RADIO ENGINEERING, COMPUTER ENGINEERING, INSTRUMENTATION AND COMMUNICATIONS

Original article

MODELING OF A BISTATIC AIRBORNE RADAR FOR ASSESSING THE QUALITY OF RADAR IMAGES GENERATED IN THE FORWARD-LOOKING ZONE

Kalinnikov V.V.✉, Sergiev S.A.

Innopolis University

Innopolis, Russia

✉ v.kalinnikov@innopolis.ru

Abstract. The study presents a mathematical model for assessing the quality parameters of a radar image formed in the forward-looking zone of a bistatic airborne radar. The model is designed for radars operating in the wavelength range from 2 to 4 cm. The model uses radar parameters, radar operating mode parameters, carrier trajectory parameters, and terrain conditions parameters as input variables. The study showed that with a baseline length between radar carriers and a flight altitude of 1000 m, course angles of the main lobe of the transmitting antenna from 0° to -60° and course angles of the main lobe of the receiving antenna from 15° to 60° , the length of the radar image varies from 180 to 1300 m, and the width - from 70 to 250 m. With a ratio of the baseline length between radar carriers to flight altitude from 0.5 to 2.0, a flight altitude of 1000 m, course angles of the main lobe of the transmitting antenna from 0° to -45° and course angles of the main lobe of the receiving antenna from 15° to 60° , the resolution of the radar image lies in the range from 0.12 to 0.45 m in horizontal range and from 0.06 to 0.15 m in azimuth. The signal-to-noise ratio of the radar image background varies by approximately 20 dB depending on the type of underlying surface. For practical application of the model, we have developed a tool in the form of an online calculator.

Keywords: airborne radar, bistatic radar, forward-looking, radar image resolution, radar image signal-to-noise ratio

For citation: Kalinnikov V.V., Sergiev S.A. Modeling of a bistatic airborne radar for assessing the quality of radar images generated in the forward-looking zone // Trudy MAI. 2025. № 144. (In Russ.) URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186312>

Введение

В настоящее время широко обсуждаются вопросы наблюдения под разными ракурсами отраженных от поверхности Земли радиосигналов с помощью двухпозиционных бортовых радиолокационных станций (РЛС) с синтезированной апертурой авиационного базирования, что открывает широкие перспективы для классификации и интерпретации свойств подстилающих поверхностей, распознавания наземных объектов, построения трехмерных моделей рельефа и смещений [1-6]. Особым преимуществом наблюдений с разных ракурсов является возможность реализации режима формирования радиолокационного изображения (РЛИ) в передней зоне обзора носителей РЛС [7, 8]. Общим преимуществом при переходе от оптических систем к радиолокационным является возможность наблюдения земной поверхности в условия облачности, тумана и задымления [9]. В качестве источника отраженного радиосигнала может использоваться излучение активной компоненты двухпозиционной РЛС, излучение радиолокационных спутников дистанционного зондирования Земли (преимущественно в X и C диапазонах) [10, 11], а также излучение спутников глобальных навигационных систем (преимущественно в L диапазоне) [12, 13].

Моделирование двухпозиционных РЛС является сложной задачей, требующей специальных расчетных инструментов для поиска баланса между различными

параметрами, влияющими на конечные параметры качества РЛИ – размер изображения, предельное разрешение по горизонтальной дальности, предельное разрешение по азимуту и отношение сигнал/шум фона изображения.

Целью настоящего исследования является описание модели и разработка инструмента для расчета параметров качества РЛИ, формируемого в передней зоне обзора двухпозиционной полуактивной РЛС авиационного базирования. Рассматриваемая двухпозиционная РЛС образуется из одиночных бортовых РЛС X диапазона как показано на рисунке 1.

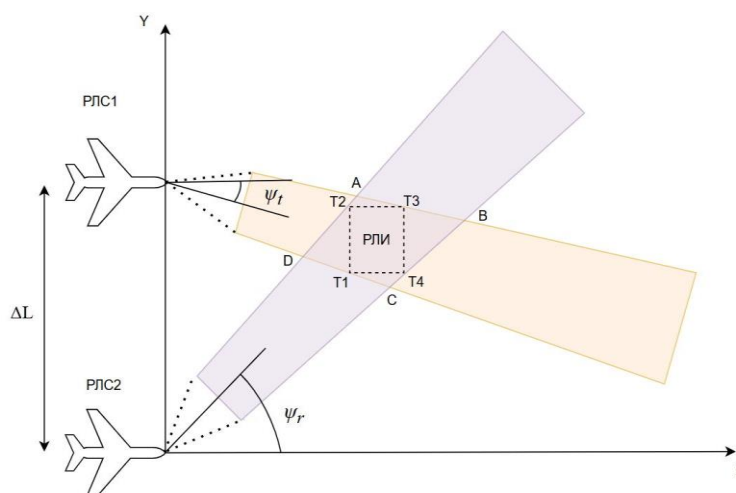


Рисунок 1 – Схема построения двухпозиционной РЛС. Показаны области земной поверхности в пределах главных лепестков ДНА на излучение (красные пятна) и области на прием (фиолетовые пятна)

Главный лепесток диаграммы направленности антенны (ДНА) на излучение подсвечивает область в передней зоне обзора, тогда как главный лепесток ДНА на прием направлен так, чтобы существовала возможность фиксации отраженного эхо-сигнала. Формирование РЛИ происходит на пересечении областей земной

поверхности в пределах главных лепестков ДНА на излучение и на прием. При этом предполагается, что оба носителя летят на одинаковых высотах параллельно друг другу, удерживая заданную величину базы между ними.

Постановка задачи

В передней зоне обзора разрешение РЛИ по азимуту для одиночных РЛС практически отсутствует вследствие малого спектра доплеровских частот отраженного эхо-сигнала. Увеличению спектра способствует подсвечивание наблюдаемой области поверхности и прием эхо-сигнала с разных ракурсов, как показано в предложенной на рисунке 1 схеме. В свою очередь ракурсы определяются высотой и взаимным расположением носителей активной (РЛС1) и пассивной (РЛС2) компонент двухпозиционной РЛС.

Следовательно, характерным отличием систем радиолокационного видения от оптических систем является тот факт, что носители бортовых РЛС принимают непосредственное участие в решении информационных задач, что требует обеспечения согласованных алгоритмов управления режимами работы РЛС и траекторией полета носителя [14]. Поэтому при проектировании двухпозиционных систем некоторые параметры режима работы РЛС должны вычисляться совместно с параметрами качества РЛИ. Другой проблемой при проектировании является предварительная оценка отношения/шум фона РЛИ для предсказания информативных свойств будущих данных.

Классический алгоритм формирования РЛИ в РЛС с синтезированной апертурой состоит из получения первичных наблюдений – двумерной голограммы, сжатия голограммы по дальности и сжатия по азимуту [15]. Исходя из хорошо

описанных в литературе зависимостей параметров обработки голограммы от различных входных переменных, в настоящем исследовании приводятся конечные формулы для модели расчета параметров качества РЛИ. При этом входные переменные для модели группируются в четыре блока: параметры РЛС, параметры режима работы РЛС, траекторные параметры носителей и параметры условий местности. Отталкиваясь от них, должны быть последовательно рассчитаны:

- границы области пересечения главных лепестков ДНА на излучение и на прием;
- границы области формирования РЛИ в передней зоне обзора;
- разрешение РЛИ по горизонтальной дальности с коэффициентом сжатия по дальности;
- разрешение РЛИ по азимуту со временем синтеза апертуры;
- отношение сигнал/шум фона РЛИ;
- коэффициент затухания в атмосфере.

Состав входных переменных и их обозначения показаны в таблице 1. Для иллюстрации числовых зависимостей параметров качества РЛИ от траекторных параметров и параметров условий местности в исследовании приняты значения характеристик РЛС, также приведенные в таблице 1.

Для практической реализации модели создан расчетный инструмент – онлайн калькулятор. Доступные в этом инструменте диапазоны значений входных переменных показаны в последней колонке таблицы 1.

Отметим, что из-за потерь в радиотракте РЛС, атмосферных флуктуаций и нестабильностей в траектории полета носителей реальное разрешение РЛИ может

быть в 1,4 – 1,6 раз хуже, чем предельное разрешение, предсказанное описанной в настоящем исследовании моделью [16, 17].

Таблица 1- Перечень с описанием входных переменных

№ п/п	Обозначение	Наименование переменный	Значение, принятое в рамках исследования	Значение / диапазон значений, принятые в инструменте
Параметры бортовой РЛС				
1	$L_{ант}$	Длина антенны, м	0,25	0,05 ÷ 0,25
2	G	Коэффициент усиления антенны, дБ	14	5 ÷ 20
3	ψ_t	Угол курса главного лепестка на излучение, град	-	10 ÷ 60
4	ψ_r	Угол курса главного лепестка на прием, град	-	-10 ÷ -60
5	λ	Длина волны, м	0,032	0,02 ÷ 0,04
6	P_t	Пиковая мощность, Вт	10	1 ÷ 10
7	B	Полоса пропускания, МГц	1000	500 ÷ 1000
8	NF	Шум-фактор, дБ	2	1 ÷ 3
9	T_0	Температура передатчика/приемника, К	290	290
Параметры режима работы РЛС				
10	q	Коэффициент заполнения	0,08	0,05 ÷ 0,25
11	β	Угол наклона плоскости поляризации, град	0	0; 90
Траекторные параметры носителей РЛС				
12	V	Скорость полета, м/с	-	5 ÷ 30
13	H	Высота полета, м	-	200 ÷ 2000
14	ΔL	Длина базы между носителями РЛС, м	-	200 ÷ 2000
Параметры условий местности				
12	σ_0	УЭПР поверхности, дБ	-	- 30 ÷ 10
13	$H_{низо}$	Высота нижней границы облаков, м	-	0 ÷ 1500
14	$\Delta H_{обл}$	Толщина облаков, м	-	0 ÷ 6000
15	R	Интенсивность дождя, мм/ч	-	0 ÷ 80

Расчет границы области пересечения главных лепестков ДНА на излучение и на прием

Введем сопровождающую носители систему координат с началом осей в точке проекции положения РЛС2 на земную поверхность. Ось X направим вдоль направления движения носителей, ось Y соответственно будет направлена вдоль базы между РЛС1 и РЛС2. В этом случае РЛС1 будет иметь координаты $(0, \Delta L)$, а РЛС2 $(0, 0)$. Координаты точки i ($i = A, B, C, D$, см. рисунок 1) относительно РЛС1 и РЛС2 будут равны:

$$\begin{aligned}x_i &= H \cdot \operatorname{tg}(\varphi_{1,i}) \cdot \cos(\psi_{1,i}), \\y_i &= H \cdot \operatorname{tg}(\varphi_{1,i}) \cdot \sin(\psi_{1,i}).\end{aligned}\tag{1}$$

$$\begin{aligned}x_i &= H \cdot \operatorname{tg}(\varphi_{2,i}) \cdot \cos(\psi_{2,i}), \\y_i &= H \cdot \operatorname{tg}(\varphi_{2,i}) \cdot \sin(\psi_{2,i}) + \Delta L.\end{aligned}\tag{2}$$

Здесь $\varphi_{1,i}$ и $\psi_{1,i}$ – угол места, отсчитываемый от надира, и угол курса точки i относительно РЛС1, $\varphi_{2,i}$ и $\psi_{2,i}$ – угол места и угол курса точки i относительно РЛС2. Из равенства обеих представлений координат точки найдем систему уравнений, связывающую угловые координаты относительно обеих РЛС:

$$\begin{cases} \varphi_{1,i} = \operatorname{arctg} \left(\frac{\Delta L}{H} \cdot \frac{\cos(\psi_{2,i})}{\sin(\psi_{2,i} - \psi_{1,i})} \right), \\ \varphi_{2,i} = \operatorname{arctg} \left(\frac{\Delta L}{H} \cdot \frac{\cos(\psi_{1,i})}{\sin(\psi_{2,i} - \psi_{1,i})} \right). \end{cases}\tag{2}$$

Углы курса точки i можно представить в виде приращений относительно углов курса осей главных лепестков антенн РЛС1 и РЛС2:

$$\begin{aligned}\psi_{1,i} &= \psi_t + \Delta \psi_{1,i}, \\ \psi_{2,i} &= \psi_r + \Delta \psi_{2,i}.\end{aligned}\tag{3}$$

В свою очередь приращения по курсу для точки i , которые отсчитываются в горизонтальной плоскости, связаны с азимутальными углами, которые отсчитываются в наклонной (азимутальной) плоскости ДНА, следующим образом:

$$\begin{aligned}\sin(\Delta\psi_{1,i}) &= \frac{\sin\left(k_{1,i} \cdot \frac{\theta}{2}\right)}{\sin(\varphi_{1,i})}, \\ \sin(\Delta\psi_{2,i}) &= \frac{\sin\left(k_{2,i} \cdot \frac{\theta}{2}\right)}{\sin(\varphi_{2,i})}.\end{aligned}\quad (4)$$

Здесь θ – угловой размер главных лепестков ДНА в азимутальной плоскости. Коэффициенты $k_{1,i}$ и $k_{2,i}$ указывают направление вращения относительно РЛС1 и РЛС2: для $i = A$ $k_{1,i} = 1$, и $k_{2,i} = 1$; для $i = B$ $k_{1,i} = 1$, и $k_{2,i} = -1$; для $i = C$ $k_{1,i} = -1$, и $k_{2,i} = -1$; для $i = D$ $k_{1,i} = -1$, и $k_{2,i} = 1$.

Таким образом, полная система уравнений, позволяющая определить углы места и углы курса точки i относительно двух РЛС, выглядит следующим образом

$$\left\{\begin{aligned}\psi_{1,i} &= \psi_t + \Delta\psi_{1,i}, \\ \psi_{2,i} &= \psi_t + \Delta\psi_{2,i}, \\ \varphi_{1,i} &= \arctg\left(\frac{\Delta L}{H} \cdot \frac{\cos(\psi_{2,i})}{\sin(\psi_{2,i} - \psi_{1,i})}\right), \\ \varphi_{2,i} &= \arctg\left(\frac{\Delta L}{H} \cdot \frac{\cos(\psi_{1,i})}{\sin(\psi_{2,i} - \psi_{1,i})}\right), \\ \Delta\psi_{1,i} &= \arcsin\left(\frac{\sin\left(k_{1,i} \cdot \frac{\theta}{2}\right)}{\sin(\varphi_{1,i})}\right), \\ \Delta\psi_{2,i} &= \arcsin\left(\frac{\sin\left(k_{2,i} \cdot \frac{\theta}{2}\right)}{\sin(\varphi_{2,i})}\right).\end{aligned}\right.\quad (5)$$

Подход к решению этой нелинейной системы заключается в выполнении последовательных приближений. На первой итерации следует положить $\Delta\psi_{1,i} = 0$ и $\Delta\psi_{2,i} = 0$. Затем вычислить $\psi_{1,i}$ и $\psi_{2,i}$ по первым двум формулам в системе, далее вычислить $\varphi_{1,i}$ и $\varphi_{2,i}$ по третьей и четвертой формуле и найти обновленные значения $\Delta\psi_{1,i}$ и $\Delta\psi_{2,i}$ по пятой и шестой формулам. Найдя значения угловых координат точки

і можно вычислить соответствующие плоские координаты по формуле (1). Угловой размер главных лепестков ДНА в азимутальной плоскости можно найти следующим образом:

$$\theta = \frac{\lambda}{L_{\text{ант}}}. \quad (6)$$

Отметим, что из анализа системы уравнений 5 следует, что решение может существовать не при любых сочетания H , ΔL , ψ_t и ψ_r .

Расчет границы области формирования РЛИ в передней зоне обзора

Поскольку пересечение областей в пределах главных лепестков ДНА на излучение и на прием образует неправильный квазичетырехугольник, то максимально возможное количество когерентных импульсов, накопленных в процессе движения носителей от разных точечных целей, будет различаться: чем дальше поперек курса цель от центра пересечения областей, тем число когерентных импульсов будет меньше. Для обеспечения примерно равного разрешения по азимуту в пределах РЛИ необходимо равное количество когерентных импульсов. Поэтому область формирования РЛИ выбирается в виде прямоугольника, вписанного в квазичетырехугольник таким образом, чтобы одна из его сторон была параллельна направлению движения. Для нахождения однозначного решения задачи нужно ввести дополнительное условие о том, что площадь РЛИ должна быть максимальной из возможных.

Для решения этой задачи сначала выбирается минимальное и максимальное значение координаты X среди точек A , B , C и D . Далее рассчитывается шаг по оси X для поиска максимальной площади РЛИ:

$$\Delta x = \frac{\max(x_i) - \min(x_i)}{N}. \quad (7)$$

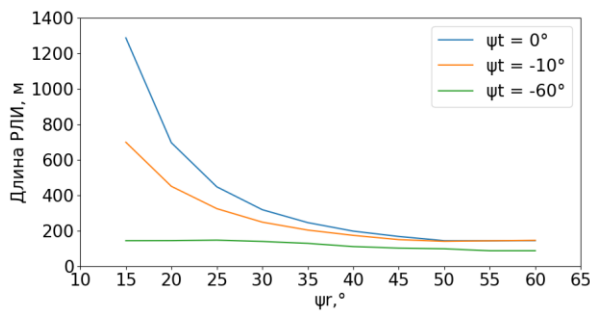
Здесь N – число отрезков, на которые разбивается промежуток по оси X между крайними точками пересечения областей в пределах главных лепестков ДНА на излучение и на прием. Чем больше значение N , тем выше будет точность расчетов. Внутри этого промежутка выбираются два значения абсциссы, x_i и x_j :

$$\begin{aligned} x_k &= \min(x_k) + k \cdot \Delta x, k = 1 \div N - 2, \\ x_j &= x_k + j \cdot \Delta x, j = k + 1 \div N - 1. \end{aligned} \quad (8)$$

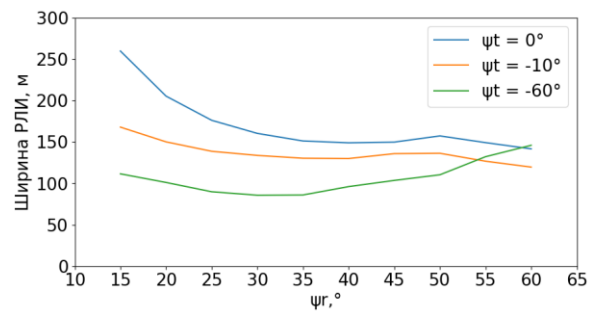
Лучи с координатами x_k и x_j будут дважды пересекать квазичетырехугольник в точках с ординатами $y_1(x_k)$, $y_2(x_k)$ и $y_3(x_j)$, $y_4(x_j)$. Пересечение значений ординат в пределах отрезков y_1y_2 и y_3y_4 образуют сторону прямоугольника (РЛИ), а его площадь найдется как:

$$S_{k,j} = (x_j - x_k) \cdot (y_1y_2 \cap y_3y_4). \quad (9)$$

Перебирая в циклах по k и j все возможные значения площади, можно найти максимальное ее значение и, как следствие, соответствующие значения координат угловых точек Т1, Т2, Т3 и Т4. По координатам этих точек можно посчитать длину и ширину РЛИ. Далее длиной и шириной РЛИ будем называть размер вдоль и поперек направления движения соответственно. На рисунке 2 показан расчет этих величин в зависимости от углов курса главных лепестков.



а



б

Рисунок 2 – Зависимость длины (а) и ширины (б) РЛИ от углов курса главных лепестков ДНА на излучение и на прием. Высота полета и база между носителями РЛС приняты равными 1000 м

Как видно из рисунков, при угле курса главного лепестка ДНА на излучение близком к 0° длина РЛИ уменьшается в 6 раз с увеличением угла курса главного лепестка ДНА на прием с 15° до 60° . И наоборот, при больших углах курса главного лепестка ДНА на излучение, длина РЛИ почти не меняется.

Ширина РЛИ изменяется не больше, чем в 2.5 раза при различных сочетаниях углов курса главных лепестков ДНА на излучение и на прием в пределах в пределах от 0° до -60° и 15° до 60° соответственно.

Расчет разрешения РЛИ по горизонтальной дальности

Рассмотрим произвольную точку с координатами (х, у) в пределах области формирования РЛИ. Наклонные дальности от РЛС1 и РЛС2 до этой точки найдутся как:

$$\begin{aligned} r_1 &= \sqrt{x^2 + (y - \Delta L)^2 + H^2}, \\ r_2 &= \sqrt{x^2 + y^2 + H^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Тогда модуль градиента от суммы наклонных дальностей от РЛС1 и РЛС2 до произвольной точки будет равен:

$$|\text{grad}(r_1 + r_2)| = \sqrt{\left(\frac{x}{r_1} + \frac{x}{r_2}\right)^2 + \left(\frac{y}{r_1} + \frac{y}{r_2}\right)^2}. \quad (11)$$

Длина зондирующего импульса должна быть как можно больше, но не превышать длину суммы наклонных дальностей до самой близкой к РЛС1 и РЛС2 точки области формирования РЛИ (в противном случае часть этой области окажется в слепой зоне РЛС). Поэтому оптимальная длина импульса будет равна:

$$\tau = \frac{\min(r_1 + r_2)}{c}. \quad (12)$$

Здесь $c = 299\,792\,458$ м/с – скорость света в вакууме. Разрешение РЛИ по горизонтальной дальности запишется следующим образом:

$$\Delta\eta = \frac{c \cdot \tau}{K_{сж} \cdot |\text{grad}(r_1 + r_2)|}, \quad (13)$$

где $K_{сж}$ – коэффициент сжатия по дальности, максимально возможное значение которого дается выражением:

$$K_{сж_макс} = B \cdot \tau. \quad (14)$$

Тогда предельно возможное (минимальное) разрешение РЛИ по горизонтальной дальности запишется следующим образом:

$$\Delta\eta_{мин} = \frac{c \cdot \tau}{K_{сж_макс} \cdot |\text{grad}(r_1 + r_2)|} = \frac{c}{B \cdot |\text{grad}(r_1 + r_2)|}. \quad (15)$$

Стоит обратить внимание, что разрешение будет несколько различаться в разных частях РЛИ из-за различных значений градиента. На рисунке 3 показан расчет предельного разрешения по горизонтальной дальности для центра РЛИ для случаев, когда угол кура главного лепестка ДНА на излучение равен 0° и -45° .

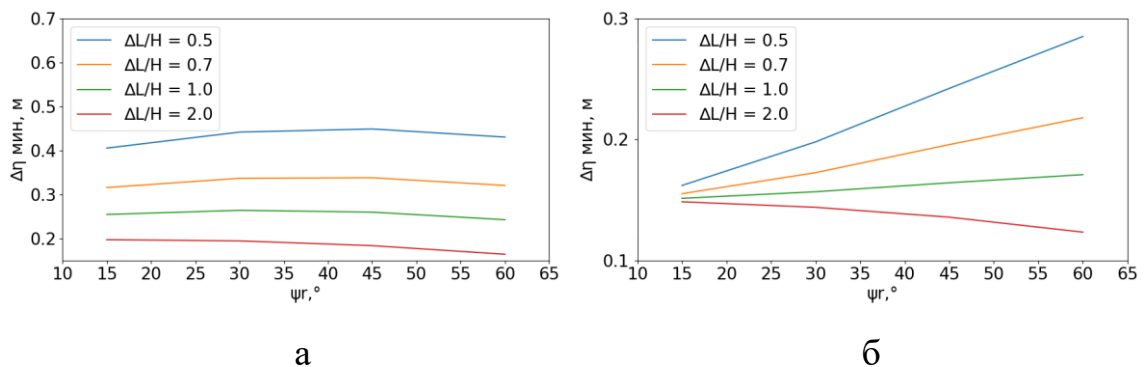


Рисунок 3 – Зависимость предельного разрешения РЛИ по горизонтальной дальности от угла курса главного лепестка ДНА на прием и отношения длины базы между носителями РЛС к высоте полета. Высота полета принята равной 1000 м.

а) угол курса главного лепестка на излучение равен -45° ; б) угол курса главного лепестка на излучение равен 0°

Хорошо видно, что предельное разрешение РЛИ по горизонтальной дальности улучшается с ростом отношения длина базы между носителями РЛС к высоте полета и почти не зависит от угла курса главного лепестка ДНА на прием, когда угол курса главного лепестка ДНА на излучение равен -45° .

Когда же угол курса главного лепестка ДНА на излучение равен 0° , характер изменения предельного разрешения РЛИ по горизонтальной дальности с увеличением угла курса главного лепестка ДНА на прием зависит от отношения длина базы между носителями РЛС к высоте полета: для больших отношений разрешение улучшается, а для малых отношений ухудшается.

В целом также видно, что предельное достижимое разрешение РЛИ лежит в пределах от 0,12 до 0,45 м по горизонтальной дальности.

Расчет разрешения РЛИ по азимуту

Доплеровская частота эхо-сигнала, отраженного от произвольной точки в пределах области формирования РЛИ и принятого РЛС2, будет иметь вид:

$$f_{\text{дон}} = -\frac{1}{\lambda} \cdot \frac{d(r_1 + r_2)}{dt} = -\frac{1}{\lambda} \cdot \left[\left(\frac{x}{r_1} + \frac{x}{r_2} \right) \cdot \frac{dx}{dt} + \left(\frac{y}{r_1} + \frac{y}{r_2} \right) \cdot \frac{dy}{dt} \right] = -\frac{1}{\lambda} \cdot \left(\frac{x}{r_1} + \frac{x}{r_2} \right) \cdot V, \quad (16)$$

где dt – дифференциал по координате медленного времени. Производная от координаты y равна нулю в силу перпендикулярности вектора скорости оси ординат.

Модуль градиента доплеровской частоты эхо-сигнала, отраженного от произвольной точки, найдется как:

$$|grad(f_{don})| = -\frac{V}{\lambda} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} - \frac{x^2}{r_1^3} - \frac{x^2}{r_2^3}\right)^2 + \left(\frac{x \cdot y}{r_1^3} + \frac{x \cdot y}{r_2^3}\right)^2}. \quad (17)$$

Максимально возможное число накопленных когерентных импульсов и тем самым максимальное время синтезирования апертуры определяется размером (длиною) области формирования РЛИ вдоль направления движения носителей и дается выражением:

$$t_{\text{синт_макс}} = \frac{x_{T4} - x_{T1}}{V} \quad (18)$$

Тогда предельно возможное разрешение РЛИ по азимуту запишется следующим образом:

$$\Delta\mu_{\text{мин}} = \frac{1}{t_{\text{синт_макс}} \cdot |grad(f_{don})|}. \quad (19)$$

Как можно видеть из выражений 17 – 19 предельное разрешение по азимуту не зависит от скорости движения носителей.

На рисунке 4 показан расчет предельного разрешения по азимуту для центра РЛИ для случаев, когда угол кура главного лепестка ДНА на излучение равен 0° и -45° .

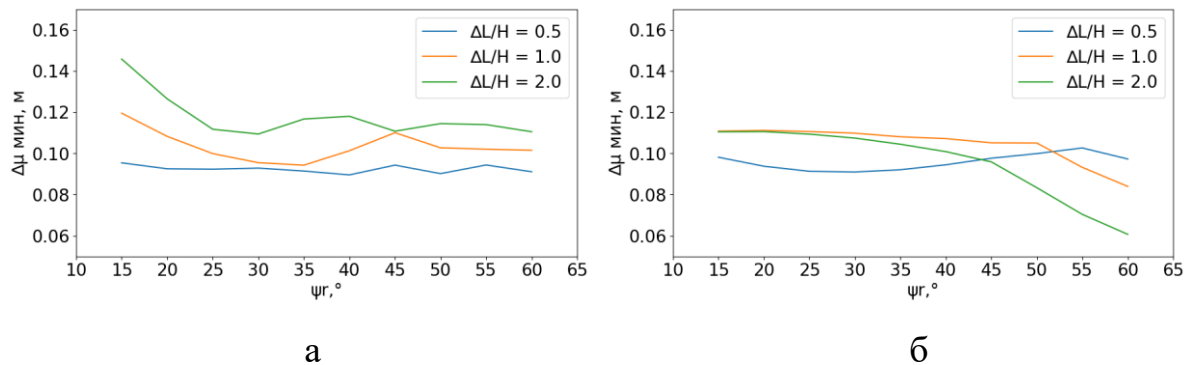


Рисунок 4 – Зависимость предельного разрешения РЛИ по азимуту от угла курса главного лепестка ДНА на прием и отношения длины базы между носителями РЛС к высоте полета. Высота полета принята равной 1000 м. а) угол курса главного

лепестка на излучение равен -45° ; б) угол курса главного лепестка на излучение равен 0°

Когда угол курса главного лепестка ДНА на излучение равен -45° , предельное разрешение РЛИ по азимуту почти не зависит от угла курса главного лепестка ДНА на прием.

При угле курса главного лепестка ДНА на излучение равным 0° , предельное разрешение РЛИ по азимуту в целом улучшается с ростом угла курса главного лепестка ДНА на прием.

В целом, достижимое по азимуту разрешение РЛИ лежит в пределах от 0,06 до 0,15 м.

Расчет отношения сигнал/шум фона РЛИ

Исходя из основного уравнения радиолокации для двухпозиционной РЛС с синтезированной апертурой мощность сжатого эхо-сигнала, отраженного от произвольной точки в области формирования РЛИ, составит:

$$P_r = P_t \cdot \frac{G \cdot S_{ант}}{(4 \cdot \pi)^2 \cdot r_1^2 \cdot r_2^2} \cdot \sigma \cdot K_{сж} \cdot N_{ког} \cdot K_{атм}, \quad (20)$$

где $S_{ант}$ – эффективная площадь антенны, σ – эффективная площадь рассеяния (ЭПР) фона элемента разрешения РЛИ, $N_{ког}$ – число когерентно накопленных импульсов, $K_{атм}$ – коэффициент затухания в атмосфере.

Эффективная площадь антенны рассчитывается следующим выражением:

$$S_{ант} = \frac{G \cdot \lambda^2}{4 \cdot \pi}. \quad (21)$$

В свою очередь ЭПР фона элемента разрешения равна:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \Delta\eta \cdot \Delta\mu, \quad (22)$$

где σ_0 – удельная ЭПР (УЭПР) фона элемента разрешения РЛИ, характеризующая отражательные свойства типа поверхности. В разработанной расчетной модели использована модель Кулемина, которая позволяет по углу скольжения радиосигнала о поверхность оценить УЭПР для заданного типа подстилающей поверхности: пашня, снег, лес зимой, лес летом, луг высокотравный, луг низкотравный и др [18].

Число когерентных импульсов определяется как:

$$N_{\text{ког}} = 1 + \text{int} \left[\frac{t_{\text{сум}}}{t_{\text{имп}}} \right], \quad (23)$$

где $t_{\text{имп}}$ – период повторения импульсов, которой рассчитывается по формуле:

$$t_{\text{имп}} = \frac{\tau}{q} \quad (24)$$

Мощность отраженного от точечной цели эхо-сигнала не зависит от коэффициента сжатия по дальности и времени синтеза апертуры, т.к. с уменьшением этих величин пропорционально увеличивается ЭПР фона элемента разрешения, т.е. ухудшается разрешение РЛИ.

Мощность шума определяется следующим образом:

$$P_n = k_b \cdot NF \cdot T_0 \cdot B, \quad (25)$$

где $k_b = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

Таким образом, отношение сигнал/шум в децибелах найдется как:

$$SNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_r}{P_n} \right) \quad (26)$$

На рисунке 5 показан расчет отношения сигнал/шум фона для центральной точки РЛИ в зависимости от скорости и высоты полета носителей РЛС.

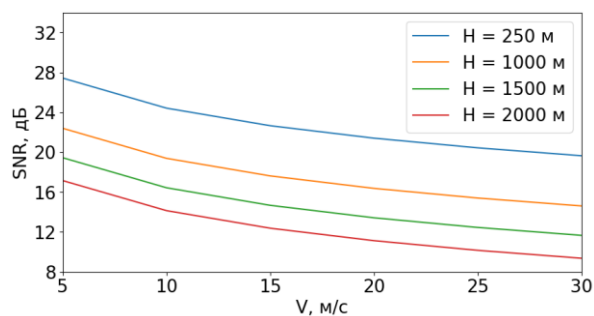


Рисунок 5 – Зависимость отношения сигнал/шум фона РЛИ от скорости и высоты полета. Угол курса главного лепестка на излучение равен -45° , на прием 45° .

Длина базы между носителями РЛС принята равной 1000 м.

УЭПР фона подстилающей поверхности задана равной -20 дБ

Ожидаемо, отношение сигнал/шум уменьшается с увеличением скорости и высоты полета. Уменьшение происходит примерно на 7 дБ с увеличением скорости носителей от 5 до 30 м/с и на 5.5 дБ с увеличением высоты полета на 1000 м.

Расчет коэффициента затухания в атмосфере

Затухание радиолокационного сигнала в атмосфере связано с рассеянием на молекулах газов (азота и кислорода), гидрометеорах в облачном слое (каплях воды и льда) и каплях дождя [19, 20]. Молекулярное рассеяние является постоянным фактором и здесь не рассматривается.

Вычисление затухания на каплях облачного слоя выполнено по модели из Рекомендации МСЭ-R Р. 840-7 [21]. Согласно этой модели, удельный коэффициент погонного ослабления в облаке дается выражениями:

$$K_{обл,уд} = 0,819 \cdot \frac{f}{\varepsilon'' \cdot \left(1 + \left(\frac{2 + \varepsilon'}{\varepsilon''}\right)^2\right)},$$

$$\varepsilon'' = \frac{f \cdot (\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{f_p \cdot \left(1 + \left(\frac{f}{f_p}\right)^2\right)} + \frac{f \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{f_s \cdot \left(1 + \left(\frac{f}{f_s}\right)^2\right)}, \varepsilon' = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}{\left(1 + \left(\frac{f}{f_p}\right)^2\right)} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\left(1 + \left(\frac{f}{f_s}\right)^2\right)} + \varepsilon_2$$

$$\varepsilon_0 = 77,66 + 103,3 \cdot \left(\frac{300}{T} - 1\right), \varepsilon_1 = 0,0671 \cdot \varepsilon_0, \varepsilon_2 = 3,52. \quad (27)$$

Здесь удельный коэффициент ослабления в облаке дается в единицах дБ/км/(г/м³); f – частота зондирования в ГГц, T – температура в облачном слое, принимаемая равной 273,15 К. Для того, чтобы найти абсолютное (не удельное) значение коэффициента ослабления нужно задать водность облака w в единицах г/м³:

$$K_{обл} = K_{обл,уд} \cdot w = K_{обл,уд} \cdot \frac{W}{\Delta H_{обл}}, \quad (28)$$

где W – общее содержание жидкой воды столбе облачного слоя в единицах г/м², которая определяется с помощью эмпирического соотношения [22]:

$$W = 132,574 \cdot \left(\frac{\Delta H_{обл}}{1000}\right)^{2.30215} \quad (29)$$

Для оценки ослабления радиолокационного сигнала в дождевых осадках использована модель согласно Рекомендации Международного союза электросвязи МСЭ-R P.838-3 [23]. Согласно этой модели, удельный коэффициент погонного ослабления в дожде дается выражениями:

$$K_{дождь} = k \cdot R^\alpha, \quad (30)$$

где R – интенсивность дождя в мм/ч, k и α – табличные параметры, зависящие от частоты зондирования и типа поляризации.

Полный коэффициент затухания в атмосфере таким образом найдется следующим образом:

$$K_{атм} = K_{обл} \cdot K_{дождь} \quad (31)$$

Затухание в атмосфере будет зависеть от того, как соотносятся высота полета и высота нижней границы облачности.

На рис. 6 показаны зависимость отношения сигнал/шум фона для центральной точки РЛИ в зависимости от типа подстилающей поверхности, интенсивности осадков и толщины облаков.

Из рисунков видно, что отношение сигнал/шум сильно зависит от типа подстилающей поверхности и изменяется примерно на 20 дБ. Облачный слой между высотой нижней границы облаков и высотой полета в 900 м способен уменьшить отношение сигнал/шум на 0,3 дБ. Уменьшение отношения сигнал/шум происходит в том числе тогда, когда верхняя граница высоты облаков растет выше высоты полета, т.к. вместе с увеличением толщины растет водность. Слой сильного дождя толщиной в 1000 м уменьшает эту величину на 4 дБ.

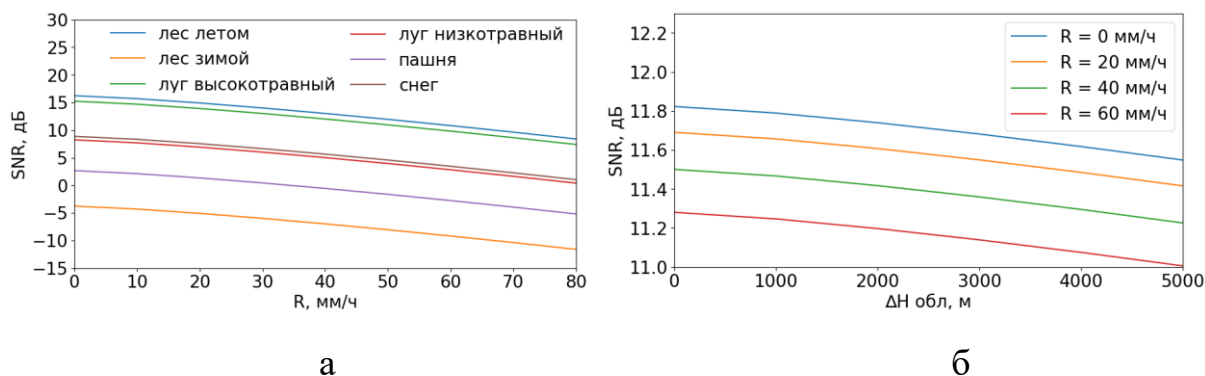


Рисунок 6 – а) Зависимость отношения сигнал/шум фона РЛИ от типа подстилающей поверхности и интенсивности осадков. Угол курса главного лепестка на излучение равен 0° , на прием 45° . Высоты полета и нижней границы облаков приняты равными 1000 м. Скорость полета 20 м/с;

б) Зависимость отношения сигнал/шум фона РЛИ от интенсивности осадков и толщины облаков. Угол курса главного лепестка на излучение равен 0° , на прием 45° . Высоты полета принята равной 1000 м. Скорость полета 20 м/с. Высота нижней

границы облаков принята равной 100 м. УЭПР фона подстилающей поверхности задана равной -20 дБ

Инструмент для расчета параметров качества РЛИ

Описанная в настоящем исследовании математическая модель была реализована в виде инструмента – онлайн калькулятора оценки параметров качества РЛИ двухпозиционной РЛС, размещенного по веб-адресу <https://calc.radar.ai.innopolis.university/>. Инструмент предназначен для проектировщиков двухпозиционных РЛС авиационного базирования.

Пользователю инструмента доступен ввод значений входных переменных в пределах диапазонов, указанных в таблице 1. В случае, если пользователь введет недопустимое сочетание значений H , ΔL , ψ_t и ψ_r , инструмент выводит соответствующее сообщение.

Ввод величины УЭПР подстилающей поверхности возможен двумя способами на выбор – прямой ввод значения или ввод типа подстилающей поверхности с расчетом УЭПР по модели Кулемина.

Заключение

В исследовании представлена математическая модель для оценки параметров качества РЛИ, формируемого в передней зоне обзора двухпозиционной авиационной РЛС, работающей в X диапазоне. Входными переменными для модели являются параметры РЛС, параметры режима работы РЛС, траекторные параметры носителей и параметры условий местности.

Приведены численные оценки выходных параметров качества РЛИ – длина, ширина, разрешение по горизонтальной дальности и разрешение по азимуту, отношение сигнал/шум фона.

Показано, что при длине базы между носителями РЛС в 1000 м, высоте полета в 1000 м, углах курса главного лепестка ДНА на излучение от 0° до -60° и углах курса главного лепестка ДНА на прием от 15° до 60° длина РЛИ меняется от 180 до 1300 м, а ширина РЛИ – от 70 до 250 м.

При отношении длины базы между носителями РЛС к высоте полета от 0,5 до 2,0, высоте полета в 1000 м., углах курса главного лепестка ДНА на излучение от 0° до -45° и углах курса главного лепестка ДНА на прием от 15° до 60° разрешение РЛИ лежит в пределах от 0,12 до 0,45 м по горизонтальной дальности и от 0,06 до 0,15 м по азимуту.

Отношение сигнал/шум фона РЛИ изменяется примерно на 20 дБ в зависимости от типа подстилающей поверхности. Облачный слой между толщиной 900 м способен уменьшить отношение сигнал/шум на 0,3 дБ. Слой сильного дождя толщиной в 1000 м уменьшает эту величину на 4 дБ.

Представленная математическая модель реализован в виде онлайн-калькулятора, размещенного по адресу <https://calc.radar.ai.innopolis.university/>. Предложения по доработке инструмента могут направляться на указанный адрес авторов статьи.

Финансирование

Работа выполнена за счет средств гранта, предоставленного по договору от 30.10.2024 № 70-2024-001319, заключенному АНО ВО «Университет Иннополис» с Фондом поддержки проектов Национальной технологической инициативы.

Funding

The work was supported by grant provided under the agreement dated October 30, 2024 No. 70-2024-001319, concluded between Innopolis University and the National Technological Initiative Project Support Fund

Список источников

1. Krieger G. Advanced Bistatic and Multistatic SAR Concepts and Applications // European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR). – Dresden, Germany, 2006. – P. 1–101.
2. Daun M., Koch W. and Klemm R. Tracking of ground targets with bistatic airborne radar // IEEE Radar Conference. – Rome, Italy, 2008. – P. 1–6.
3. Grathwohl A., Meinecke B., Widmann M., Kanz J. and Waldschmidt C. UAV-Based Bistatic SAR-Imaging Using a Stationary Repeater // IEEE Journal of Microwaves. – 2023. – Vol. 3, No. 2. – P. 625–634.
4. Hu N., Li Y., Pan W., Shao S., Tang Y. and Li X. Geometric Distribution of UAV Detection Performance by Bistatic Radar // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2024. – Vol. 60, No. 2. – P. 2445-2452.
5. Zhu J., Lin B., Pan J. et al. Unmanned Airborne Bistatic Interferometric Synthetic Aperture Radar Data Processing Method Using Bi-Directional Synchronization Chain Signals // Remote Sens. – 2024. – 16(5), 769. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs16050769>. (accessed 16.05.2025)
6. Лифанов А.С. Определение движущихся объектов на одноантенной радиолокационной системе с синтезированной апертурой // Труды МАИ. – 2003. – Выпуск № 11. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=34485>. (дата обращения 16.05.2025).

7. Shepeta A.P., Nenashev V.A. Accuracy characteristics of object location in a two-position system of small onboard radars // Information and Control Systems. – 2020. – No. 2. – P. 31–36.
8. Xu F., Zhang Y., Wang R. et al. Heuristic Path Planning Method for Multistatic UAV-Borne SAR Imaging System // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2021. – Vol. 14. – P. 8522–8536.
9. Неронский Л.Б., Михайлов В.Ф., Брагин И.В. Микроволновая аппаратура дистанционного зондирования поверхности Земли и атмосферы. Радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны. – СПб.: СПбГУАП. 1999.
10. Rodriguez-Cassola M., Baumgartner SV, Krieger G. et al. Bistatic spaceborne-airborne experiment TerraSAR-X/F-SAR: data processing and results // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium – Boston, MA, USA, 2008. – P. III451–III454.
11. Rodriguez-Cassola M., Prats-Iraola P., Krieger G., Reigber A. and Moreira A. Bistatic SAR image formation: A systematic approach // IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. – Quebec City, QC, Canada, 2014. – P. 3945–3948.
12. Favenza A., Imam R., Dosis F. and Pini M. Detecting water using UAV-based GNSS-Reflectometry data and Artificial Intelligence // 2019 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor). – Portici, Italy, 2019. – P. 7–12
13. Калинин В.В., Устинов А.В., Косарев Н.С. Опыт использования метода ГНСС-рефлектометрии для измерения высоты снежного покрова // Вестник СГУГиТ. – 2023. – Т. 28, № 1. – С. 6–13.
14. Верба В. С. Проблемы и общесистемные вопросы разработки бортовых РЛС нового поколения // Журнал радиоэлектроники. – 2016. – № 1. – С. 1–29.
15. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. – М.: Радиотехника. 2005.
16. Занин К.А. Разработка модели оценки пространственного разрешения космического радиолокатора синтезированной апертуры // Труды МАИ. – 2017. – Выпуск № 96. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=85931>. (дата обращения 16.05.2025).

17. Хазов А.С., Ортиков М.Ю., Гусев С.Н. Методика оценивания разрешающей способности космического радиолокатора с синтезированной апертурой антенны с учетом компенсации атмосферных искажений // Труды МАИ. – 2022. – Выпуск № 126. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=169001>. (дата обращения 16.05.2025).
18. Ненашев В.А. Особенности классификации подстилающих поверхностей земли по характеристикам эхо-сигналов в бортовых РЛС // Труды МАИ. – 2021. – Выпуск № 118. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=158246>. (дата обращения 16.05.2025).
19. Marquez-Martinez J. and Alvarez-Perez J. A First Study on the use of TerraSAR-X for Meteorological Purposes // 2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing. – Denver, CO, USA, 2006. – P. 1930–1933.
20. Alozie E, Abdulkarim A, Abdullahi I, Usman AD, Faruk N, Olayinka I-FY, Adewole KS, Oloyede AA, Chiroma H, Sowande OA, et al. A Review on Rain Signal Attenuation Modeling, Analysis and Validation Techniques: Advances, Challenges and Future Direction // Sustainability. – 2022. – No 14(18):11744. Available at: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/18/11744>. (accessed 16.05.2025)
21. ITU-R P.840-7. Attenuation due to clouds and fog, 2017.
22. Egorov D. P., Ilyushin Ya. A., Kutuza B. G. and Koptsov Ya. V. Cloud Liquid Content Retrieval Errors Related to the Flat-layered Cloudfield Model Usage // Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS). – Hangzhou, China, 2021. – P. 1978–1984.
23. ITU-R P.838-3. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods, 2005.

References

1. Krieger G. Advanced Bistatic and Multistatic SAR Concepts and Applications // European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR). – Dresden, Germany, 2006. – P. 1–101.
2. Daun M., Koch W. and Klemm R. Tracking of ground targets with bistatic airborne radar // IEEE Radar Conference. – Rome, Italy, 2008. – P. 1–6.

3. Grathwohl A., Meinecke B., Widmann M., Kanz J. and Waldschmidt C. UAV-Based Bistatic SAR-Imaging Using a Stationary Repeater // IEEE Journal of Microwaves. – 2023. – Vol. 3, No. 2. – P. 625–634.
4. Hu N., Li Y., Pan W., Shao S., Tang Y. and Li X. Geometric Distribution of UAV Detection Performance by Bistatic Radar // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2024. – Vol. 60, No. 2. – P. 2445-2452.
5. Zhu J., Lin B., Pan J. et al. Unmanned Airborne Bistatic Interferometric Synthetic Aperture Radar Data Processing Method Using Bi-Directional Synchronization Chain Signals // Remote Sens. – 2024. – 16(5), 769. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs16050769>. (accessed 16.05.2025)
6. Lifanov A.S. Opređenje dvizhushchih ob"ektov na odnoantennnoj radiolokacionnoj sisteme s sintezirovannoj aperturoj // Trudy MAI. – 2003. – Vypusk № 11. (In Russ.) Available at: URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=34485>. (accessed 16.05.2025).
7. Shepeta A.P., Nenashev V.A. Accuracy characteristics of object location in a two-position system of small onboard radars // Information and Control Systems. – 2020. – No. 2. – P. 31–36.
8. Xu F., Zhang Y., Wang R. et al. Heuristic Path Planning Method for Multistatic UAV-Borne SAR Imaging System // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2021. – Vol. 14. – P. 8522–8536.
9. Neronskij L.B., Mihajlov V.F., Bragin I.V. Mikrovolnovaya apparatura distancionnogo zondirovaniya poverhnosti Zemli i atmosfery. Radiolokatory s sintezirovannoj aperturoj anteny. – SPb.: SPbGUAP, 1999. (in Russian).
10. Rodriguez-Cassola M., Baumgartner SV, Krieger G. et al. Bistatic spaceborne-airborne experiment TerraSAR-X/F-SAR: data processing and results // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium – Boston, MA, USA, 2008. – P. III451–III454.
11. Rodriguez-Cassola M., Prats-Iraola P., Krieger G., Reigber A. and Moreira A. Bistatic SAR image formation: A systematic approach // IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. – Quebec City, QC, Canada, 2014. – P. 3945–3948.

12. Favenza A., Imam R., Dosis F. and Pini M. Detecting water using UAV-based GNSS-Reflectometry data and Artificial Intelligence // 2019 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor). – Portici, Italy, 2019. – P. 7–12
13. Kalinnikov V.V., Ustinov A.V., Kosarev N.S. Opyt ispol'zovaniya metoda GNSS-reflektometrii dlya izmereniya vysoty snezhnogo pokrova // Vestnik SGUGiT. — 2023. — Vol. 28, No 1. – P. 6–13 (in Russian).
14. Verba V. S. Problemy i obshchesistemnye voprosy razrabotki bortovyh RLS novogo pokoleniya. // Zhurnal radi-oelektroniki. — 2016. — No. 1. — P. 1–29 (in Russian).
15. Kondratenkov G.S., Frolov A.Yu. Radiovidenie. Radiolokatsionnye sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli. – M.: Radiotekhnika, 2005. (in Russian).
16. Zanin K. A. Razrabotka modeli ocenki prostranstvennogo razresheniya kosmicheskogo radiolokatora sinteziro-vannoj apertury // Trudy MAI. — 2017. — Is. 96. (In Russ.) Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=85931>. (accessed 16.05.2025)
17. Hazov A.S., Ortikov M.Yu., Gusev S.N. Metodika ocenivaniya razreshayushchej sposobnosti kosmicheskogo radiolokatora s sintezirovannoj aperturoj anteny s uchetom kompensacii atmosferyh iskazhenij // Trudy MAI. – 2022. – Vypusk № 126. (In Russ.) Available at: URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=169001>. (accessed 16.05.2025).
18. Nenashev V.A. Osobennosti klassifikacii podstilayushchih poverhnostej zemli po harakteri-stikam ekho-signalov v bortovyh RLS // Trudy MAI. – 2021. – Vypusk № 118. (In Russ.) Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=158246>. (accessed 16.05.2025)
19. Marquez-Martinez J. and Alvarez-Perez J. A First Study on the use of TerraSAR-X for Meteorological Purposes // 2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing. – Denver, CO, USA, 2006. – P. 1930–1933.
20. Alozie E, Abdulkarim A, Abdullahi I, Usman AD, Faruk N, Olayinka I-FY, Adewole KS, Oloyede AA, Chiroma H, Sowande OA, et al. A Review on Rain Signal Attenuation Modeling, Analysis and Validation Techniques: Advances, Challenges and Future Direction // Sustainability. – 2022. – No 14(18):11744. Available at: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/18/11744>. (accessed 16.05.2025)
21. ITU-R P.840-7. Attenuation due to clouds and fog, 2017.

22. Egorov D. P., Ilyushin Ya. A., Kutuza B. G. and Koptsov Ya. V. Cloud Liquid Content Retrieval Errors Related to the Flat-layered Cloudfield Model Usage // Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS). – Hangzhou, China, 2021. – P. 1978–1984.
23. ITU-R P.838-3. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods, 2005.