


Оценка пространственного разрешения радиолокатора с синтезированной апертурой антенны VHF-диапазона частот, размещенного на борту беспилотного летательного аппарата по реальной траектории полета

А.В. Борисенков, О.В. Горячкин , Н.А. Гусев, А.С. Лифанов

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
443010, Россия, г. Самара,
ул. Л. Толстого, 23

Аннотация – Обоснование. В настоящее время наблюдается интенсивное развитие радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли, в том числе размещенных на беспилотных летательных аппаратах. Радиолокаторы с синтезированной апертурой являются эффективным средством круглосуточного и всепогодного наблюдения объектов на поверхности Земли. Радиолокаторы, работающие в VHF-диапазоне, позволяют наблюдать укрытые и подповерхностные объекты. Необходимость практической реализации радиолокатора с синтезированием апертуры VHF-диапазона частот на борту беспилотных летательных аппаратов требует дополнительного исследования пространственного разрешения радиолокаторов, учитывающего нестабильную траекторию носителя. **Цель.** В статье рассматривается анализ влияния траектории полета и ошибок ее измерения на качество радиолокационного изображения. **Методы.** Метод исследования предусматривает анализ формы функции неопределенности радиолокатора с синтезированием апертуры, которая была построена по реальной траектории с помощью полунатурного математического моделирования. **Результаты.** В результате проведенного исследования показано, что на качество радиолокационных изображений оказывают влияние не только ошибки знания параметров движения, но и сам характер движения носителя, длительность полета. **Заключение.** На основе результатов натурных испытаний оказалось возможным проанализировать эти факторы и определить требования к навигационной системе БПЛА. Таким образом, в статье показана возможность контроля качества радиолокатора с синтезированием апертуры VHF-диапазона, размещенного на борту БПЛА.

Ключевые слова – радиолокатор с синтезированной апертурой; VHF-диапазон частот; беспилотный летательный аппарат; ошибки знания траектории полета; функция неопределенности.

Введение

В настоящее время наблюдается интенсивное развитие радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [15–17]. Это касается не только космических и авиационных систем, но и систем, размещенных на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА), а также бистатических и пассивных систем.

Основным инструментом радиолокационного ДЗЗ являются радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны (РСА), которые работают в диапазонах W, Ka, Ku, X, C, S, L, P, VHF [1] и обеспечивают пространственное разрешение, сопоставимое с оптическими сенсорами.

Размещение РСА на борту БПЛА открывает возможность для реализации недорогого и высокоэффективного решения для наблюдения небольших территорий с целью картографии, точного земледелия, экологического мониторинга и контроля ресурсов.

Для размещения РСА на БПЛА вес аппаратуры должен быть не более нескольких килограммов

(обычно не более 5 кг), при этом РСА должен обеспечивать работу при криволинейной траектории полета, иметь потребляемую мощность до 300 Вт. Навигационная система БПЛА должна обеспечивать достаточную точность знания траектории фазового центра антенны РСА. Радиоэлектронные системы БПЛА (полетный контроллер, системы навигации, связи и управления) должны быть совместимы с системами РСА.

На сегодняшний день в литературе [3–7] упоминается несколько проектов решений по размещению РСА на БПЛА. Информация о некоторых из них сведена в табл. 1.

Как отмечают авторы обзора [2], в последнее время на рынке доминирует сегмент радаров UHF/VHF-диапазона. Диапазон UHF (сверхвысоких частот) включает в себя поддиапазоны L, P и расположен от 300 мегагерц (МГц) до 3 гигагерц (ГГц), в то время как диапазон VHF (очень высоких частот) охватывает частоты от 30 до 300 МГц.

Диапазоны P и VHF привлекают интерес разработчиков вследствие своей высокой проникающей способности. Считается, что радиоволны

Таблица 1. Основные характеристики РСА для БПЛА
Table 1. Main characteristics of SAR for UAVs

Название проекта	Страна, разработчик, город	Диапазон частот	Разрешение, м	Тип сигнала	Реализация, год	Летательный аппарат
Multiband DInSAR	Бразилия, Государственный университет Кампинаса, Сан-Паулу	C,L,P	0,35, 0,75, 1,5	ЛЧМ	2018	БПЛА вертолетного типа
INRAS radar	Великобритания, Университет Бирмингема	V	0,15	Непрерывная ЛЧМ	2021	БПЛА
«МРЛК 2»	Россия, ПГУТИ, Самара	VHF	3–5	ЛЧМ	2022	БПЛА вертолетного типа
«Компакт»	Россия, НИИТП, Москва	VHF,P,L,X	0,25–5	ЛЧМ	2005	Любой тип авиационного носителя, БПЛА
Генезис РСА	Россия, Компания «Техногенезис», Москва	Ku	0,5		2017	БПЛА
ARBRES-X SAR	Испания, Политехнический университет Каталонии, Барселона	X	1,5	Ступенчатый ЛЧМ	2017	БПЛА вертолетного типа



Рис. 1. Внешний вид прототипа-демонстратора РСА УКВ-диапазона для БПЛА в процессе летных испытаний
Fig. 1. Appearance of the prototype demonstrator of the VHF range SAR for UAVs during flight testing

Р-диапазона проникают через листву, а в VHF диапазоне могут использоваться для наблюдения подповерхностных объектов [1; 3; 8; 9].

В этой связи в течение ряда лет в ПГУТИ осуществляется разработка мобильного комплекса [10; 16], реализующего все основные технологии радиолокационного наблюдения в VHF-диапазоне [7]. На рис. 1 показан внешний вид мобильного радиолокационного комплекса 2-го поколения (МРЛК-2).

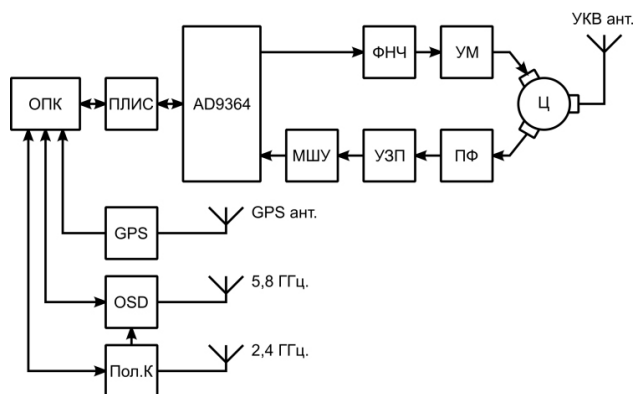


Рис. 2. Блок-схема радиотехнического комплекса
Fig. 2. Block diagram of the radio engineering complex

1. Основные характеристики МРЛК

Описываемая в данном разделе система является прототипом-демонстратором, предназначенным для экспериментальной отработки технических решений, положенных в основу МРЛК, алгоритмов первичной и вторичной обработки сигналов.

На рис. 2 показана блок-схема радиотехнического комплекса, включающего в себя РСА, систему навигации, систему связи и систему управления.

На схеме используются следующие обозначения: ОПК – одноплатный компьютер; ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема; ФНЧ – фильтр нижних частот; УМ – усилитель мощности; Ц – циркулятор; ПФ – полосовой фильтр; УЗП – устройство защиты приемника;

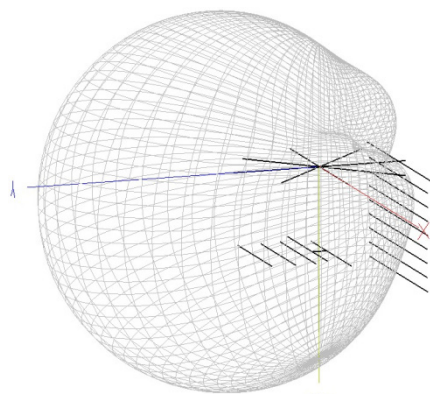


Рис. 3. Диаграмма направленности антенного устройства РСА
Fig. 3. Radiation pattern of the SAR antenna device

МШУ – малошумящий усилитель; OSD – система передачи телеметрии «On-screen display»; Пол.К – полетный контроллер.

В основе аппаратной реализации МРЛК используется плата Ettus USRP B200. Радиочастотная часть платы построена на базе микросхемы фирмы Analog Devices AD9364, которая обеспечивает диапазон несущих частот от 70 МГц до 6 ГГц при полосе частот обрабатываемого сигнала от 200 кГц до 56 МГц. Управление работой приемопередатчика и промежуточные буферы данных реализованы на ПЛИС Spartan 6 фирмы Xilinx.

Таблица 2. Основные технические параметры системы
Table 2. Main technical parameters of the system

Параметры	МРЛК
Длина волны	2,069 м
Размеры антенны	1,2 × 1 м
Масса антенны без разъема и фидера	< 1 кг
Полоса захвата (при высоте полета 1000 м)	≤ 20 км
Разрешающая способность по азимуту	3 м
Разрешающая способность по наклонной дальности	3 м
Сигма-ноль (удельная ЭПР фона, мощность отраженного сигнала от которого равна уровню теплового шума)	-20 дБ
Отношение сигнал – шум для точечной цели с ЭПР 1 м ² на радиолокационном изображении, на краю полосы захвата не хуже	10 дБ
Мертвая зона (засветка прямым сигналом)	не более 1,5 км
Допустимая скорость полета	10–60 м/с
Импульсная выходная мощность, не менее	220 Вт
Усиление МШУ по напряжению	не хуже 90 дБ
Цифровой поток на выходе РСА (при реализации буферизации в цифровом приемнике)	< 25 Мбит/с
Частота дискретизации АЦП (2 канала по 16 бит)	50 МГц
Диапазон частот зондирующего сигнала	115–165 МГц
Тип зондирующего сигнала	ЛЧМ (B = 150–500)
Частота повторения импульсов	50–200 Гц
Объем блока электроники	35 дм ³
Вес электроники (при отдельной реализации)	3 кг
Потребляемая мощность	4 А / 28 В

Формирование зондирующего импульса в передатчике и регистрация сигнала в приемнике реализуются с помощью платы компьютера Jetson Nano, который используется для предварительной обработки сигнала на приеме.

Для временной синхронизации и регистрации траектории движения РСА использован модуль спутниковой навигации LEA-M8S (GPS/ГЛОНАСС) фирмы U-blox, позволяющий получать информацию о траектории полета с частотой до 10 Гц. Для увеличения точности измерения траектории БПЛА предполагается использование системы RTK (Real Time Kinematic) на основе двух модулей NEO-M8P-2, один из которых располагается на БПЛА, а второй – на стационарной позиции. Для связи между ними будет использован низкоскоростной радиointерфейс LoRa.

Сигнал с выхода платы приемопередатчика после ФНЧ поступает на вход усилителя мощности, собранного на модуле RA60N1317M фирмы Mitsubishi (возможно использование двух модулей). Для развязки тракта передачи и приема применен циркулятор UIYCC6060A130T180SF, кроме этого, защита входного МШУ от перегрузки обеспечивается несколькими каскадами на PIN-диодах CLA4609, CLA4605 и SMP1330.

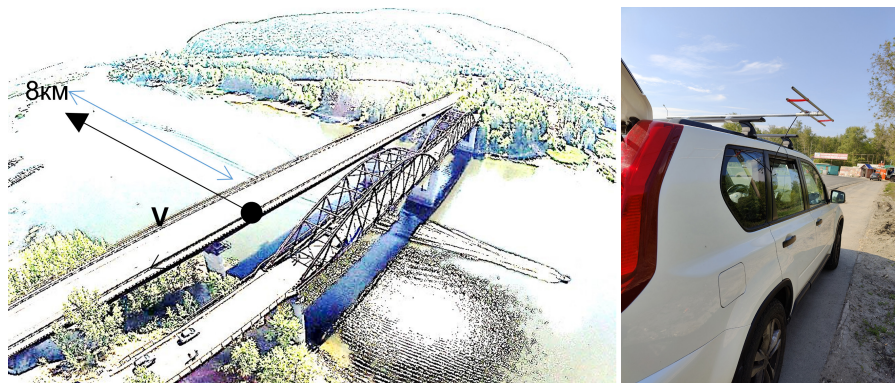


Рис. 4. Геометрия наземного эксперимента и размещение антенны PCA на автомобиле
Fig. 4. Geometry of the ground experiment and placement of the SAR antenna on the vehicle

За включение/выключение излучения PCA и контроль за его основными параметрами отвечает OSD-модуль (On-screen display), построенный на базе микроконтроллера ATMEGA162 и микросхемы MAX7456. Аналоговая видеoinформация передается с борта БПЛА по радиоканалу 5,9 ГГц.

Антенна PCA – широкополосная 4-элементная антенна Yagi-Uda, оптимизированная для установки на октокоптере. Антенная система предназначена для излучения и приема сигнала в диапазоне от 125 до 182 МГц. Значение КСВ в рабочем диапазоне не превышает 1,75. Максимальное усиление – 7,3 дБ. На рис. 3 показана рассчитанная в пакете MMANA-GAL диаграмма направленности антенного устройства, учитывающая влияние элементов конструкции октокоптера.

Основные характеристики МРЛК-2 приведены в табл. 2.

2. Результаты экспериментальной обработки МРЛК 2

В статье приводятся результаты наземного эксперимента по реализации радиолокационного наблюдения при размещении МРЛК 2 на автомобиле.

На рис. 5 представлено радиолокационное изображение, полученное в ходе эксперимента. Для формирования изображения используется корреляционный алгоритм. Предварительная обработка включает в себя согласованную фильтрацию ЛЧМ импульса, режекторную фильтрацию гармонических помех.

Шаг по изображению, показанному на рис. 5, 2×2 м, потенциальное разрешение составляет 3×3 м. В реальности форма функции неопределенности PCA (на изображении это распределение яркостей точечных отражателей) зависит от траектории полета, интервала съемки, положения цели на радиолокационном изображении. Кроме

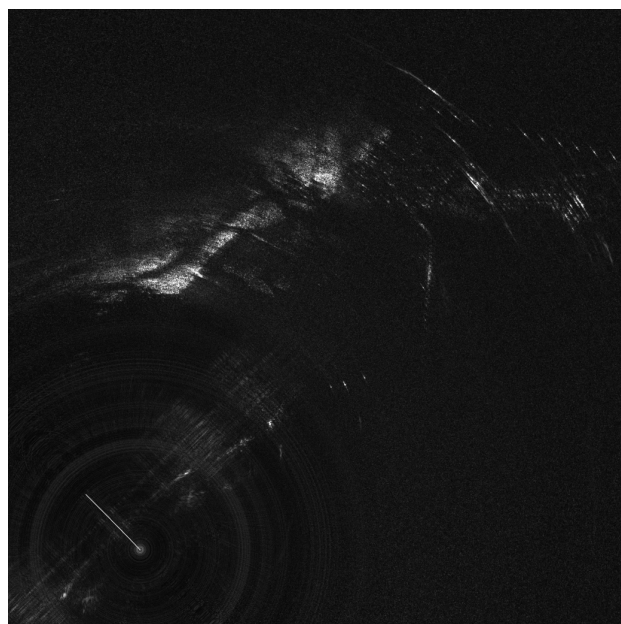


Рис. 5. Радиолокационное изображение, полученное в ходе эксперимента
Fig. 5. Radar image obtained during the experiment

этого, на вид функции неопределенности PCA оказывает влияние точность, с которой известна траектория полета.

В литературе имеется много публикаций, посвященных проблеме фокусировки радиолокационных изображений (РЛИ) PCA, размещенных на БПЛА [11–14]. Успех, с которым решается проблема фокусировки, зависит от характера траекторной неустойчивости, содержания изображения. Если искомая фаза траекторного сигнала может быть параметризована небольшим числом параметров, то автофокусировка, скорее всего, будет работать с приемлемым качеством. Если число параметров велико или сопоставимо с числом отсчетов опорной функции (случай непараметрической фокусировки), то проблема еще ждет своего решения. Этот случай характерен для PCA

VHF-диапазона, размещенного на БПЛА. Число отсчетов опорной функции в этом диапазоне и интервалы синтеза апертуры велики, нестабильность траектории значительна. Тем не менее на практике нужно знать уровень требований к навигационной системе БПЛА в условиях реальной эксплуатации. Логичным способом оценки реальной функции неопределенности РСА и уровня требований к навигационной системе может быть имитационное математическое моделирование. В следующих разделах мы покажем, как можно решить данную проблему этим методом.

3. Математическое моделирование ФН МРЛК-2

Геометрия системы представлена на рис. 4. Сигнал, излученный передатчиком, можно записать в виде

$$\dot{s}_0(t) = \dot{u}_0(t)e^{j\omega_0 t}, \quad t \in [t_1, t_2], \quad (1)$$

где $\dot{u}_0(t)$ – комплексная огибающая зондирующего сигнала; ω_0 – несущая частота сигнала. Сигнал, отраженный от точечной цели:

$$\dot{s}_1(t) = G(t)\dot{u}(t - \tau(t))e^{j\omega_0(t - \tau(t))} + n(t), \quad (2)$$

где $n(t)$ – комплексный гауссовский шум приемного канала; $G(t)$ – вещественная весовая функция, учитывающая влияние диаграмм направленности приемной и передающей антенны в прямом канале; $\tau(t)$ – временная задержка сигнала в прямом канале.

Сигнал, отраженный от поверхности:

$$\dot{s}_2(t) = \int_D G(t, r)\dot{s}_0(t - \tau(t, r))\dot{\xi}(r)dr + \dot{n}(t), \quad (3)$$

где $\dot{\xi}(r)$ – коэффициент отражения элемента поверхности; $\dot{n}(t)$ – комплексный гауссовский шум отраженного канала; D – область отражения; $G(t, r)$ – вещественная весовая функция, учитывающая влияние диаграмм направленности приемной и передающей антенны в отраженном канале.

Пусть восстанавливаемое изображение является реализацией случайного процесса (поля) с известным априорным распределением, тогда алгоритм восстановления для простой функции потерь совпадает с алгоритмом максимума апостериорной вероятности (МАН), который с учетом особенностей задачи можно записать в виде

$$\begin{aligned} \hat{\xi}(r) &= \arg \max_{\xi(r)} p(\dot{\xi}(r) | \dot{s}_2(t)) = \\ &= \arg \max_{\xi(r)} p(\dot{s}_2(t) | \dot{\xi}(r)) p(\dot{\xi}(r)), \end{aligned} \quad (4)$$

где $p(\dot{\xi}(r) | \dot{s}_2(t))$ – апостериорное распределение восстанавливаемого сигнала; $p(\dot{s}_2(t) | \dot{\xi}(r))$ – функционал правдоподобия наблюдаемого изображения; $p(\dot{\xi}(r))$ – априорное распределение восстанавливаемого изображения.

Пусть восстанавливаемое радиолокационное изображение является реализацией гауссовского комплексного случайного процесса с корреляционной функцией $B_\xi(r_1, r_2)$ и нулевым математическим ожиданием. Шум в уравнении (3) также является гауссовским случайным процессом с корреляционной функцией $B_{n_2}(t_1, t_2)$ и нулевым математическим ожиданием.

Тогда мы можем записать функционал апостериорного распределения комплексного РЛИ в виде

$$\begin{aligned} p(\dot{\xi}(r) | \dot{s}_2(t)) &= \\ &= C \exp \left\{ -\frac{1}{2} \iint (\dot{s}_2(t_1) - f(t_1)) B_n^{-1}(t_1, t_2) \times \right. \\ &\times (\dot{s}_2(t_2) - f(t_2))^* dt_1 dt_2 \left. \right\} \times \\ &\times \exp \left\{ -\frac{1}{2} \iint \xi(r_1) B_\xi^{-1}(r_1, r_2) \xi^*(r_2) dr_1 dr_2 \right\}, \\ f(t_1) &= \int_D G(t_1, r) \dot{s}_0(t_1 - \tau(t_1, r)) \dot{\xi}(r) dr, \end{aligned} \quad (5)$$

где $B_\xi^{-1}(r_1, r_2)$ и $B_n^{-1}(t_1, t_2)$ – обратные корреляционные функции радиолокационного изображения и шума соответственно.

Пусть

$$B_\xi^{-1}(r_1, r_2) = \frac{1}{Q} \delta(r_1 - r_2) \quad \text{и} \quad B_n^{-1}(t_1, t_2) = \frac{2}{N_0} \delta(t_1 - t_2),$$

тогда получим следующее выражение для логарифма функционала апостериорной плотности вероятности:

$$\begin{aligned} l(\dot{\xi} | \dot{s}_2) &= \text{const} - \\ &- \frac{1}{N_0} \int |(\dot{s}_2(t) - f(t))|^2 dt - \frac{1}{2Q} \int_D |\xi(r)|^2 dr. \end{aligned} \quad (6)$$

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} \Phi(r_1, r_2) &= \int G(t, r_1) \dot{s}_0(t - \tau(t, r_1)) \times \\ &\times G(t, r_2) \dot{s}_0^*(t - \tau(t, r_2)) dt, \end{aligned} \quad (7)$$

$$K(r) = \int \dot{s}_2(t) G(t, r) \dot{s}_0^*(t - \tau(t, r)) dt. \quad (8)$$

Тогда логарифм функционала апостериорной плотности вероятности РЛИ можно записать в виде

$$l(\dot{\xi}|\dot{s}_\Sigma) =$$

$$= \text{const} + \frac{2}{N_0} \text{Re} \left[\int_D K^*(r) \dot{\xi}(r) dr \right] -$$

$$- \frac{1}{N_0} \iint_D \Phi(r_1, r_2) \dot{\xi}(r_1) \dot{\xi}^*(r_2) dr_1 dr_2 -$$

$$- \frac{1}{2Q} \iint_D \delta(r_2 - r_1) \dot{\xi}(r_1) \dot{\xi}^*(r_2) dr_1 dr_2.$$

Пусть $\dot{\xi}(r) = \dot{\xi}_R(r) + j\dot{\xi}_I(r)$, тогда

$$l(\dot{\xi}|\dot{s}_\Sigma) = \text{const} + \frac{2}{N_0} \text{Re} \left[\int_D K^*(r) \dot{\xi}_R(r) dr \right] +$$

$$+ \frac{2}{N_0} \text{Re} \left[\int_D K^*(r) j\dot{\xi}_I(r) dr \right] -$$

$$- \iint_D \Phi'(r_1, r_2) \dot{\xi}_R(r_1) \dot{\xi}_R(r_2) dr_1 dr_2 -$$

$$- \iint_D \Phi'(r_1, r_2) \dot{\xi}_I(r_1) \dot{\xi}_I(r_2) dr_1 dr_2 +$$

$$+ j \iint_D \Phi'(r_1, r_2) \dot{\xi}_I(r_1) \dot{\xi}_R(r_2) dr_1 dr_2 -$$

$$- j \iint_D \Phi'(r_1, r_2) \dot{\xi}_R(r_1) \dot{\xi}_I(r_2) dr_1 dr_2,$$

где

$$\Phi'(r_1, r_2) = \frac{1}{N_0} \Phi(r_1, r_2) + \frac{1}{2Q} \delta(r_2 - r_1).$$

Продифференцируем полученный функционал по $\dot{\xi}_R(r)$, получим:

$$l'(\dot{\xi}|\dot{s}_\Sigma) = \frac{2}{N_0} \text{Re} \left[\int_D K^*(r) g(r) dr \right] -$$

$$- 2 \iint_D \Phi'(r_1, r_2) \dot{\xi}_R(r_1) g(r_2) dr_1 dr_2 +$$

$$+ j 2 \iint_D \Phi'(r_1, r_2) \dot{\xi}_I(r_1) g(r_2) dr_1 dr_2 -$$

$$- j 2 \iint_D \Phi'^*(r_1, r_2) g(r_2) \dot{\xi}_I(r_1) dr_1 dr_2,$$

Для нахождения решения приравняем полученный дифференциал к нулю и учтем, что равенство должно выполняться для любой функции $g(r)$, а также, что $\Phi'(r_1, r_2) = \Phi'^*(r_2, r_1)$, тогда

$$\frac{1}{N_0} \text{Re} \left[K^*(r_2) \right] - \int_D \Phi'(r_1, r_2) \dot{\xi}_R(r_1) dr_1 = 0,$$

$$\text{Re} \left[K(r_2) \right] - \int_D \Phi(r_1, r_2) \dot{\xi}_R(r_1) dr_1 = \frac{1}{\lambda} \dot{\xi}_R(r_2),$$

(9) где $\lambda = 2Q/N_0$, параметр, эквивалентный отношению сигнал – шум для радиолокационного изображения.

Продифференцируем функционал (10) по $\dot{\xi}_I(r)$, решая полученное уравнение, получим:

$$\text{Im} \left[K(r_2) \right] - \int_D \Phi(r_1, r_2) \dot{\xi}_I(r_1) dr_1 = \frac{1}{\lambda} \dot{\xi}_I(r_2). \quad (13)$$

Для комплексного РЛИ решение имеет вид

$$\dot{K}(r_2) - \int_D \Phi(r_1, r_2) \dot{\xi}(r_1) dr_1 = \frac{1}{\lambda} \dot{\xi}(r_2). \quad (14)$$

Полученное выражение является интегральным уравнением Фредгольма 2-го рода относительно искомого радиолокационного изображения.

Если отношение сигнал – шум $\lambda \rightarrow \infty$, то получаем уравнение Фредгольма 1-го рода относительно искомого радиолокационного изображения, что соответствует оценке МП в виде

$$\int_D \Phi(r_1, r_2) \dot{\xi}(r_1) dr_1 = \dot{K}(r_2). \quad (15)$$

Ядро этого интегрального уравнения $\Phi(r_1, r_2)$ является функцией неопределенности РСА, т. е. изображением точечной цели в РСА после корреляционной обработки.

3. Оценка ФН МРЛК-2 по реальной траектории

При моделировании функции неопределенности воспользуемся реальными данными навигационной системы МРЛК-2, полученными во время одного из испытательных полетов. Эти данные представлены на рис. 6.

На рис. 7 показано влияние траектории полета БПЛА на вид ФН. В данном случае особенности криволинейной траектории полета БПЛА привели к улучшению пространственного разрешения в азимутальной проекции и одновременно к росту боковых лепестков. Это легко объяснить тем, что при криволинейном полете расстояние от цели до РСА меняется более резко по сравнению с прямолинейной траекторией, соответственно, возникают более высокие частоты в траекторном сигнале и улучшается разрешение по азимуту.

Кроме этого, на рис. 7 показано влияние расстояния на разрешение РСА. Из теории РСА известно, что разрешение РСА не зависит от расстояния, однако на практике интервал съемки может быть ограничен (в эксперименте это 32 с), тогда, начиная с некоторого расстояния, азимутальное

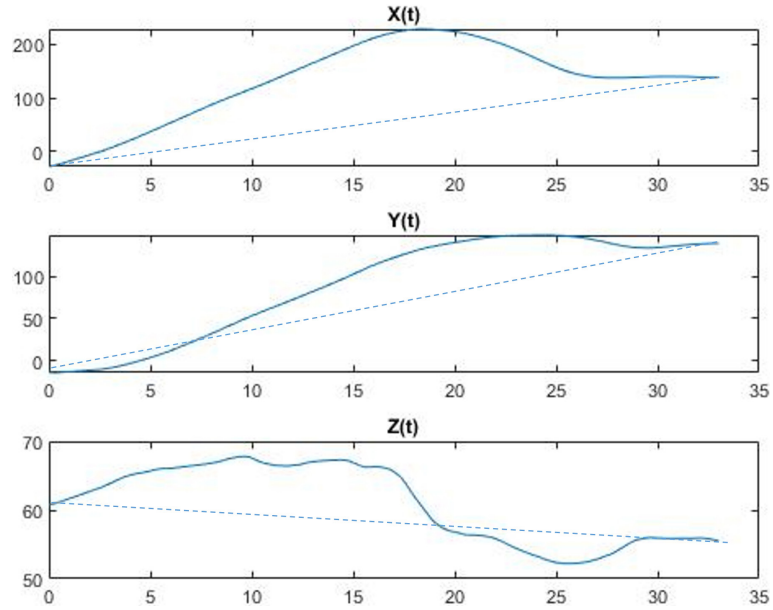


Рис. 6. Траектория БПЛА, полученная в ходе эксперимента – сплошная линия, прямолинейная – штрихованная линия
 Fig. 6. UAV trajectory obtained during the experiment – solid line, straight line – dashed line

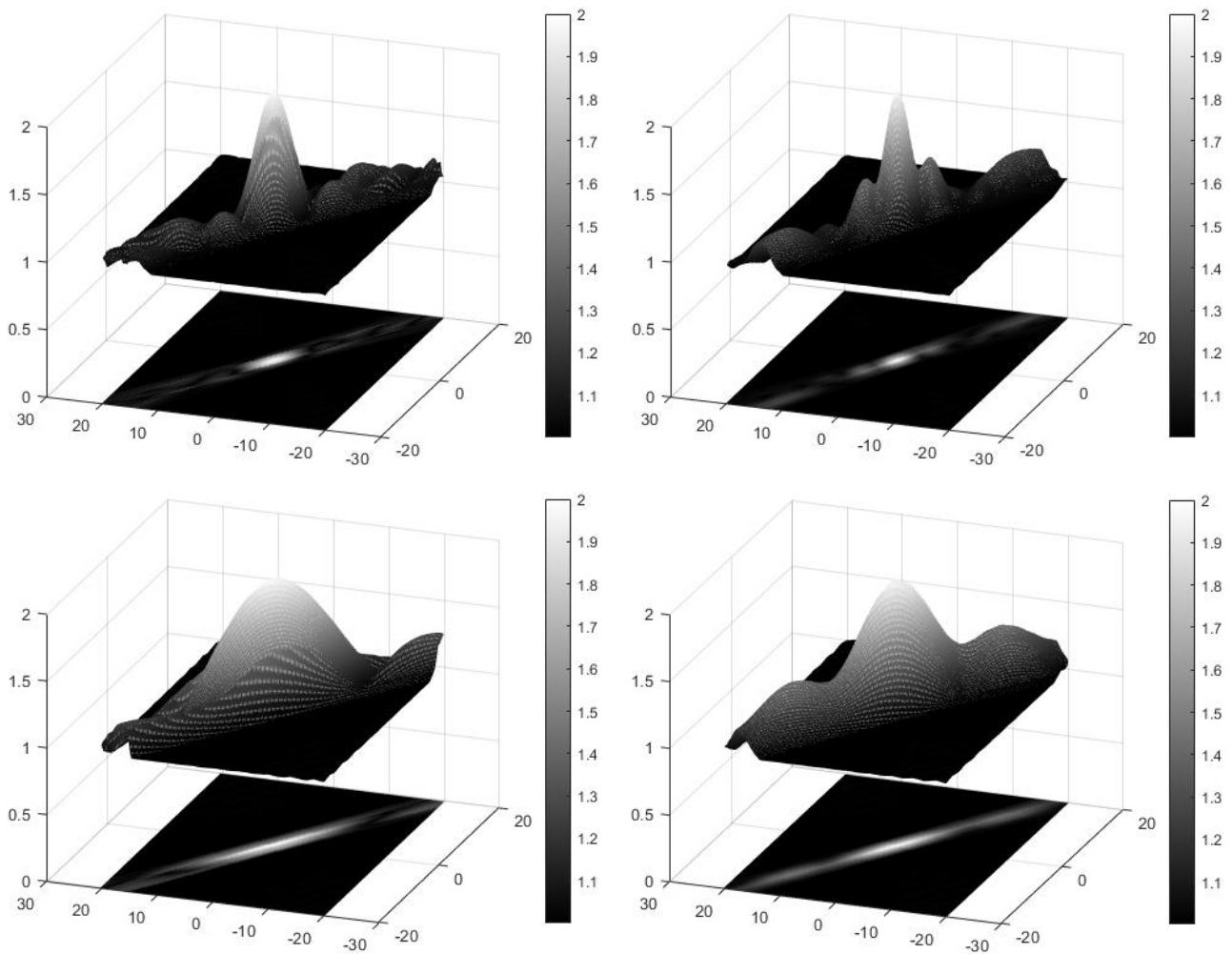


Рис. 7. Влияние на ФН РСА траектории БПЛА: верхний ряд слева – прямолинейная траектория, справа – реальная траектория, координаты отражателя $x = -1000$ м, $y = 1000$ м, интервал синтеза $t_s = 32$ с; нижний ряд слева – прямолинейная траектория, справа – реальная траектория, координаты отражателя $x = -3000$ м, $y = 3000$ м, интервал синтеза $t_s = 32$ с
 Fig. 7. Influence on the SAR FN of the UAV trajectory: top row on the left is a straight-line trajectory, on the right is the real trajectory, reflector coordinates $x = -1000$ m, $y = 1000$ m, synthesis interval $t_s = 32$ s; bottom row on the left is a straight-line trajectory, on the right is the real trajectory, reflector coordinates $x = -3000$ m, $y = 3000$ m, synthesis interval $t_s = 32$ s

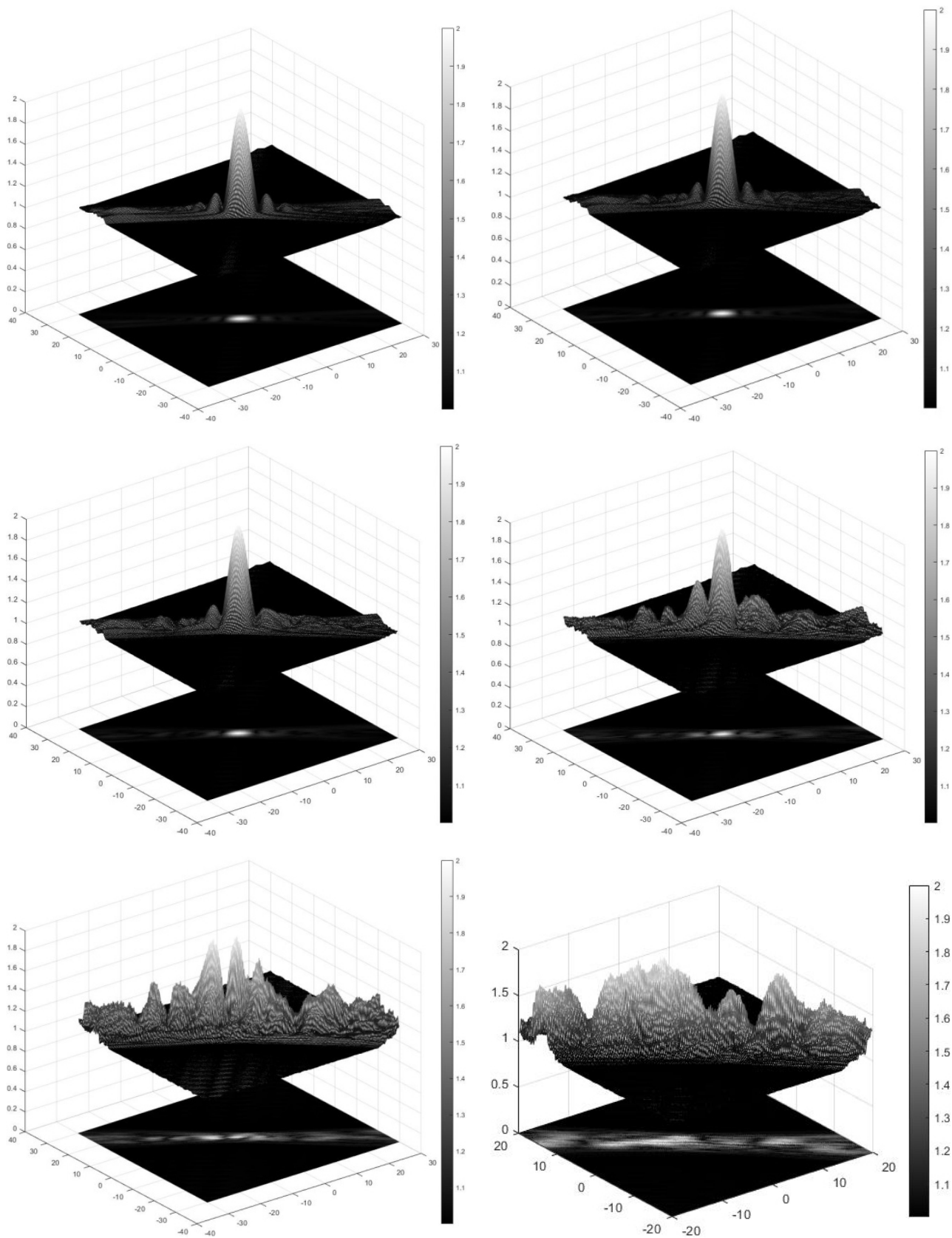


Рис. 8. Влияние на ФН РСА с.к.о. оценки траектории БПЛА, слева направо, сверху вниз: 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 м. Координаты отражателя $x = -1000$ м, $y = 1000$ м, интервал синтеза $t_s = 20$ с
Fig. 8. Influence on the FN of RSA s.k.o. UAV trajectory estimates, from left to right, from top to bottom: 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 m. Reflector coordinates $x = -1000$ m, $y = 1000$ m, synthesis interval $t_s = 20$ s

разрешение будет расти линейно с увеличением дальности.

Как мы отмечали выше, на вид функции неопределенности оказывают влияние множество факторов. Следующий рисунок демонстрирует влияние погрешности знания траектории.

Анализ этих экспериментов позволяет считать, что пороговая погрешность системы навигации не должна превышать 0,3 м. При увеличении расстояния до цели пороговая погрешность будет снижаться. Сравнивая РЛИ точечных целей на рис. 8 и 5, можно обратить внимание на сходство результатов математического моделирования и натурального эксперимента.

Заключение

Реализация радиолокатора с синтезированной апертуры на борту БПЛА поднимает ряд специфических проблем при реализации алгоритмов фокусировки радиолокационных изображений. Сложная траектория носителя РСА предъявляет

высокие требования к навигационной системе БПЛА. Особенно эти проблемы обостряются в VHF-диапазоне, в котором длина синтезированной апертуры может составлять несколько минут. В этой связи на качество РЛИ оказывают влияние не только ошибки знания параметров движения, но и сам характер движения, длительность полета. На основе результатов натуральных испытаний в ПГУТИ мобильного радиолокационного комплекса 2-го поколения (МРЛК-2) оказалось возможным проанализировать эти факторы и определить требования к навигационной системе БПЛА на уровне точности знания с.к.о. траектории полета на уровне 0,3–0,2 м (по 1-й сигма). Таким образом, в статье показана возможность контроля качества радиолокационных изображений РСА VHF-диапазона, размещенного на борту БПЛА. Для этого в процессе математического моделирования строится функция неопределенности РСА в любой точке РЛИ, учитывающая реальную траекторию БПЛА.

Список литературы

1. Very-high-resolution airborne synthetic aperture radar imaging: Signal processing and applications / A. Reigber [et al.] // Proceedings of the IEEE. 2013. Vol. 101, no. 3. P. 759–783. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2220511>
2. Global Synthetic Aperture Radar Market (SAR) Size, Share, and COVID-19 Impact Analysis, By Component (Receiver, Transmitter, and Antenna), By Platform (Airborne (Spacecraft, Aircraft and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and Ground), By Application (Military and Defense, Monitoring and Exploration), By Frequency Band (X, L, C, S, K/Ku/Ka, UHF/VHF), By Region (North America, Europe, Asia-Pacific, Latin America, Middle East, and Africa), Analysis and Forecast 2022–2032. URL: <https://www.sphericalinsights.com/reports/synthetic-aperture-radar-market>
3. Горячкин О.В. Методы слепой обработки сигналов и их приложения в системах радиотехники и связи. М.: Радио и связь, 2003. 230 с.
4. Initial evaluation of SAR capabilities in UAV multicopter platforms / M. Lort [et al.] // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2018. Vol. 11, no. 1. P. 127–140. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2752418>
5. Bekar A., Antoniou M., Baker C.J. Low-cost, high-resolution, drone-borne SAR imaging // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2022. Vol. 60. P. 5208811. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3085235>
6. A drone-borne multiband DInSAR: Results and applications / L. Moreira [et al.] // 2019 IEEE Radar Conference (RadarConf). 2019. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/RADAR.2019.8835653>
7. SAR system for searching and detecting objects in the forest area, based on UAVs / O.V. Goriachkin [et al.] // 2022 VIII International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). 2022. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITNT55410.2022.9848634>
8. Kalinkevich A., Kutuzova B., Lighthart L.P. Some aspects on the interpretation of radar images of pine forest at P and VHF bands // 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR 2012). 2012. P. 603–606.
9. Dostovalov M., Ermakov R., Moussiniants T. Foliage attenuation measurements using multi-frequency airborne SAR // 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR 2012). 2012. P. 551–554.
10. Мобильный радиолокационный комплекс с синтезированной апертурой УКВ-диапазона для дистанционного зондирования Земли / А.В. Борисенков [и др.] // Радиолокация, навигация, связь: сб. науч. труд. XXI Международной научной конференции, г. Воронеж, 14–16 апреля 2015. Воронеж, 2015. Т. 1. С. 741–751.
11. SAR processing without a motion measurement system / J. Torgrimsson [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2019. Vol. 57, no. 2. P. 1025–1039. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2864243>
12. An autofocus approach for UAV-based ultrawideband ultrawidebeam SAR data with frequency-dependent and 2-D space-variant motion errors / Z. Ding [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2022. Vol. 60. P. 5203518. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3062183>
13. Accelerating minimum entropy autofocus with stochastic gradient for UAV SAR imagery / Z. Meng [et al.] // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2022. Vol. 19. P. 4017805. DOI: <https://doi.org/10.1109/LGRS.2021.3106636>
14. Quasi-polar-based FFBP algorithm for miniature UAV SAR imaging without navigational data / S. Zhou [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2017. Vol. 55, no. 12. P. 7053–7065. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2739133>
15. Горячкин О.В., Борисенков А.В., Лифанов А.С. Характеристики обнаружения и особенности обработки сигналов воздушных объектов на радиолокационных изображениях космических радиолокаторов с синтезированной апертурой // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2022. Т. 25, № 4. С. 79–87. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.4.79-87>

16. Горячкин О.В. Центр радиолокационного дистанционного зондирования Земли ПГУТИ // Вестник связи. 2016. № 2. С. 24–26.
17. Коберниченко В.Г., Сосновский А.В. Интерферометрическая обработка данных космической радиолокационной съемки высокого разрешения // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2012. Т. 15, № 3. С. 75–83. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18764720>

Информация об авторах

Борисенков Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретических основ радиотехники и связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: цифровая обработка сигналов в системах связи, алгоритмы обработки сигналов в пространственно-временных каналах связи.

E-mail: aleksey.v.borisenkov@gmail.com

Горячкин Олег Валериевич, доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия. Автор более 300 научных работ.

Область научных интересов: цифровая обработка сигналов в системах радиотехники и связи, радиофизические методы дистанционного зондирования Земли, радиолокация с синтезированием апертуры антенны, слепая идентификация систем, прикладная статистика.

E-mail: oleg.goryachkin@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5525-5452>

Гусев Николай Александрович, исследователь, преподаватель-исследователь Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: цифровая обработка сигналов и конструирование РЭС.

E-mail: nikolay.gusev@spacekennel.ru

Лифанов Алексей Степанович, младший научный сотрудник центра радиолокационного дистанционного зондирования земли Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: радиолокация с синтезированием апертуры антенны беспилотные летательные аппараты.

E-mail: aleksei_lif@list.ru

Physics of Wave Processes and Radio Systems

2027, vol. 27, no. 2, pp. 100–110

DOI [10.18469/1810-3189.2024.27.2.100-110](https://doi.org/10.18469/1810-3189.2024.27.2.100-110)

UDC 621.37


Original Research

Received 19 December 2023

Accepted 22 January 2024

Published 29 June 2024

Estimation of the spatial resolution of a synthetic aperture radar antenna of the VHF frequency range placed on board an unmanned aerial vehicle along a real flight path

Alexey V. Borisenkov, Oleg V. Goryachkin ,
Nikolay A. Gusev, Alexey S. Lifanov

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics
23, L. Tolstoy Street,
Samara, 443010, Russia

Abstract – Background. Currently, there is an intensive development of radar systems for remote sensing of the Earth, including those placed on unmanned aerial vehicles. Synthetic aperture radars are an effective means of round-the-clock and all-weather observation of objects on the Earth's surface. Radars operating in the VHF range allow you to observe hidden and subsurface objects. The need for practical implementation of VHF band radar with synthesizing the aperture on board unmanned aerial vehicles requires additional research on the spatial resolution of radars, taking into account the unstable trajectory of the carrier. **Aim.** The article considers the analysis of the influence of the flight path and its measurement errors on the quality of the radar image. **Methods.** The research method provides an analysis of the shape of the radar uncertainty function with the synthesis of an aperture, which was built along a real trajectory using semi-natural mathematical modeling. **Results.** As a result of the conducted research, it is shown that the quality of radar images is influenced not only by errors in the knowledge of motion parameters, but also by the very nature of the carrier's movement and the duration of the flight. **Conclusion.** Based on the results of field tests, it turned out to be possible to analyze these factors and determine the requirements for the UAV navigation system. Thus, the article shows the possibility of quality control of VHF band radar with synthesized aperture placed on board a UAV.

Keywords – synthetic aperture radar; VHF frequency band; unmanned aerial vehicle; flight path knowledge errors; uncertainty function.

References

1. A. Reigber et al., "Very-high-resolution airborne synthetic aperture radar imaging: Signal processing and applications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 3, pp. 759–783, 2013, doi: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2220511>.
2. Global Synthetic Aperture Radar Market (SAR) Size, Share, and COVID-19 Impact Analysis, By Component (Receiver, Transmitter, and Antenna), By Platform (Airborne (Spacecraft, Aircraft and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and Ground), By Application (Military and Defense, Monitoring and Exploration), By Frequency Band (X, L, C, S, K/Ku/Ka, UHF/VHF), By Region (North America, Europe, Asia-Pacific, Latin America, Middle East, and Africa), Analysis and Forecast 2022 – 2032. URL: <https://www.sphericalinsights.com/reports/synthetic-aperture-radar-market>
3. O. V. Goryachkin, *Methods of Blind Signal Processing and their Applications in Radio Engineering and Communication Systems*. Moscow: Radio i svyaz', 2003. (In Russ.)
4. M. Lort et al., "Initial evaluation of SAR capabilities in UAV multicopter platforms," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 11, no. 1, pp. 127–140, 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2752418>.
5. A. Bekar, M. Antoniou, and C. J. Baker, "Low-cost, high-resolution, drone-borne SAR imaging," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 60, p. 5208811, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3085235>.
6. L. Moreira et al., "A drone-borne multiband DInSAR: Results and applications," *2019 IEEE Radar Conference (RadarConf)*, pp. 1–6, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/RADAR.2019.8835653>.
7. O. V. Goriachkin et al., "SAR system for searching and detecting objects in the forest area, based on UAVs," *2022 VIII International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT)*, pp. 1–4, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/ITNT55410.2022.9848634>.
8. A. Kalinkevich, B. Kutuza, and L. P. Lighthart, "Some aspects on the interpretation of radar images of pine forest at P and VHF bands," *9th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR 2012)*, pp. 603–606, 2012.
9. M. Dostovalov, R. Ermakov, and T. Moussinians, "Foliage attenuation measurements using multi-frequency airborne SAR," *9th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR 2012)*, pp. 551–554, 2012.
10. A. V. Borisenkov et al., "Mobile radar complex with synthetic aperture VHF band for remote sensing of the Earth," *Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz': sb. nauch. trud. XXI Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, Voronezh, 14–16 April 2015*, vol. 1, pp. 741–751, 2015. (In Russ.)
11. J. Torgrimsson et al., "SAR processing without a motion measurement system," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 57, no. 2, pp. 1025–1039, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2864243>.
12. Z. Ding et al., "An autofocus approach for UAV-based ultrawideband ultrawidebeam SAR data with frequency-dependent and 2-D space-variant motion errors," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 60, p. 5203518, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3062183>.
13. Z. Meng et al., "Accelerating minimum entropy autofocus with stochastic gradient for UAV SAR imagery," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 19, p. 4017805, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/LGRS.2021.3106636>.
14. S. Zhou et al., "Quasi-polar-based FFBP algorithm for miniature UAV SAR imaging without navigational data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 55, no. 12, pp. 7053–7065, 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2739133>.
15. O. V. Goryachkin, A. V. Borisenkov, and A. S. Lifanov, "Detection characteristics and features of signal processing of aerial objects on images of spaceborne synthetic aperture radars," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 25, no. 4, pp. 79–87, 2022, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2022.25.4.79-87>. (In Russ.)
16. O. V. Goryachkin, "Center for Radar Remote Sensing of the Earth PSUTI," *Vestnik svyazi*, no. 2, pp. 24–26, 2016. (In Russ.)
17. V. G. Kobernichenko and A. V. Sosnovskiy, "InSAR data processing in high resolution space-based radar imagery," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 15, no. 3, pp. 75–83, 2012, url: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18764720>. (In Russ.)

Information about the Authors

Alexey V. Borisenkov, Candidate of Technical Sciences, associate professor of the Department of Theoretical Fundamentals of Radio Engineering and Communications, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia.

Research interests: digital signal processing in communication systems, signal processing algorithms in spatio-temporal communication channels.

E-mail: aleksey.v.borisenkov@gmail.com

Oleg V. Goryachkin, Doctor of Technical Sciences, professor, vice-rector for research of Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia. Author of more than 300 scientific papers.

Research interests: digital signal processing in radio engineering and communication systems, radiophysical methods of remote sensing of the Earth, radar with antenna aperture synthesis, blind identification of systems, applied statistics.

E-mail: oleg.goryachkin@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5525-5452>

Nikolay A. Gusev, researcher, teacher-researcher of Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia.

Research interests: digital signal processing and design of electronic devices.

E-mail: nikolay.gusev@spacekennel.ru

Alexey S. Lifanov, junior researcher at the Center for Radar Remote Sensing of the Earth, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia.

Research interests: radar with antenna aperture synthesis, unmanned aerial vehicles.

E-mail: aleksei_lif@list.ru