

ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКИЕ СИЛЫ. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА



РЕЦЕНЗИРУЕМОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЕ ИЗДАНИЕ

№38 ИЮНЬ 2026Г.





СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И ИСПЫТАНИЯ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ, ВОЕННАЯ МЕТРОЛОГИЯ

- В.В. Шмелёв, А.Ю. Николаев, В.В. Ткаченко
Локальная система поддержки принятия решений при диагностировании технического состояния космической техники на основе большой языковой модели 174
V.V. Shmelyov, A.Y. Nikolaev, V.V. Tkachenko
Local decision support system for diagnostic of technical condition of space technology based on a large language model
- И.В. Щербаков, А.С. Солдатов
Алгоритм квалиметрии специального программного обеспечения 187
I.V. Shcherbakov, A.S. Soldatov
Qualimetry algorithm for specialized software

ТЕОРИЯ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ СТРЕЛБЫ, УПРАВЛЕНИЕ ОГНЕМ, ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТРЕЛБЫ

- Ю.Л. Козирацкий, Р.Г. Хильченко, А.И. Чеботарев
Модель процесса блокирования аэродрома базирования авиации ВВС группировкой ударных беспилотных летательных аппаратов 197
Yu.L. Kozirackij, R.G. Khilchenko, A.I. Chebotarev
Model of the process of blocking an Air Force airfield by a group attack UAVs

ВОЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АППАРАТУРА КОМПЛЕКСОВ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

- Ю.Л. Козирацкий, А.А. Баркалов, А.А. Козирацкий, В.С. Калинин
Обоснование способа и алгоритма оценки направления на источник лазерного излучения с помощью матричного фотоприемника при его использовании в составе бортовых систем телекоммуникации 206
Yu.L. Kozirackij, A.A. Barkalov, A.A. Kozirackij, V.S. Kalinin
Substantiation of the method and algorithm for estimating the direction of a laser source using a matrix photodetector when it is used as part of on-board telecommunication systems
- И.Ф. Хисматов, А.А. Маслиев
Байесовская оценка дальности действия лазерной полуактивной системы на нестационарных последовательностях полигонных данных 219
I.F. Khismatov, A.A. Masliev
Bayesian estimation of the range of action of a laser semi-active system on non-stationary sequences of test site data

ВОЕННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, СВЯЗИ И НАВИГАЦИИ

- Л.Б. Рязанцев, Ю.В. Санвальд, О.А. Бабич, Д.Л. Рязанцев
Обоснование способов обработки сигналов в малогабаритном двухканальном доплеровском измерителе скорости и угла сноса летательного аппарата 235
L.B. Ryazantsev, Yu.V. Sanvald, O.A. Babich, D.L. Ryazantsev
Justification of signal processing methods in a small-sized two-channel doppler measurement system for aircraft ground speed and drift angle



УДК 621.396.96
ГРНТИ 47.49.31

ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В МАЛОГАБАРИТНОМ ДВУХКАНАЛЬНОМ ДОПЛЕРОВСКОМ ИЗМЕРИТЕЛЕ СКОРОСТИ И УГЛА СНОСА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

*Л.Б. РЯЗАНЦЕВ, доктор технических наук, доцент
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
Ю.В. САНВАЛЬД
АО «НПП «Радар ммс» (г. Санкт-Петербург)
О.А. БАБИЧ
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
Д.Л. РЯЗАНЦЕВ
АО «НПП «Радар ммс» (г. Санкт-Петербург)*

Предложены способы обработки сигналов, обеспечивающие получение параметров о собственном движении беспилотных летательных аппаратов с использованием малогабаритных радиолокационных измерителей для реализации функций автономной навигации. **Показано**, что однолучевые способы, основанные на анализе формы дальностно-доплеровских портретов, имеют сильную зависимость точности от характера подстилающей поверхности. Для повышения точности измерений и снижения массогабаритных характеристик доплеровских измерителей **осуществлена** разработка способа на основе применения двухлучевых антенн. **Представлены** результаты натурных экспериментальных проверок разработанных способов, **оценены** их точностные характеристики. **Установлено**, что разработанный двухлучевой способ обеспечивает измерение скорости полета носителя с точностью не хуже единиц процентов при времени когерентного накопления сигналов, не превышающего одной десятой доли секунды и отношении сигнал-шум не более нескольких единиц децибел.

Ключевые слова: доплеровский измеритель путевой скорости и угла сноса, диаграмма направленности, быстрое преобразование Фурье, антенная система, подстилающая поверхность.

Введение. Стремительное развитие беспилотных авиационных систем и постоянно возрастающие требования к их автономному функционированию в условиях сложной радиоэлектронной обстановки обуславливают необходимость разработки устройств, обеспечивающих определение параметров полета (компонентов вектора скорости) беспилотных летательных аппаратов (БЛА) для информационного обеспечения бортовых автопилотов и систем управления полетом [1, 2].

Актуальность. Использование традиционных спутниковых навигационных систем ограничено из-за их уязвимости к радиоэлектронным помехам, а применение малогабаритных инерциальных навигационных систем (ИНС) на базе доступных MEMS-датчиков (гироскопов, акселерометров, магнитометров) [3] не позволяет достичь требуемой точности определения навигационных параметров даже при периодической коррекции от внешних навигационных источников информации из-за их подверженности к накоплению ошибок.

В этом контексте перспективным направлением представляется адаптация принципов доплеровской радиолокации, реализованных в бортовых доплеровских измерителях скорости и угла сноса (ДИСС), десятилетиями успешно применяемых в пилотируемой авиации



для измерения параметров полета беспилотных летательных аппаратов. Такая адаптация связана, в первую очередь, со снижением массогабаритных характеристик ДИСС [4, 5] и их стоимости и направлена на поиск новых способов обработки информации, которые могут быть реализованы на базе недорогих компактных цифровых сигнальных процессоров с применением программно-определяемых подходов, позволяющих заменить значительную часть аппаратных решений программными [2].

В предыдущих работах членов авторского коллектива статьи были рассмотрены особенности построения малогабаритных радиолокационных измерителей [3], проведено моделирование дальностно-доплеровских портретов при различных условиях зондирования земной поверхности [6], получены аналитические выражения для вычисления параметров движения и углов ориентации летательного аппарата для радиолокационных измерителей с различным количеством и ориентацией лучей диаграммы направленности в пространстве [7], рассмотрены методики обоснования требований к сигналам [3] и расчета ошибок измерений [7].

Теоретические основы обработки сигналов в авиационных ДИСС подробно рассматривались в монографии основоположников отечественной радиовысотометрии В.Е. Колчинского и И.А. Мандуровского [4]. В этой работе исследованы структура сигналов, отраженных от различных типов подстилающей поверхности, а также модели и особенности обработки сигналов в двух-, трех- и четырехлучевых измерителях, рассмотрены варианты построения аппаратуры авиационных ДИСС. В работе Ю.П. Гришина и Ю.М. Казаринова [5] представлены базовые принципы оценки параметров движения летательных аппаратов с использованием доплеровских радиолокационных измерителей, рассмотрены различные варианты структур их построения. Особенности реализации способов цифровой обработки сигналов в компактных однолучевых измерителях, основанных на анализе формы дальностно-доплеровских портретов, рассматривались в работах В.В. Мухина [8, 9]. Вопросы цифровой спектральной обработки сигналов в однолучевых доплеровских измерителях с комплексированием информации от навигационных источников различной физической природы исследованы в работах А.Ю. Трущинского [10, 11].

Анализ указанных работ показывает, что реализация существующих способов в малогабаритных радиолокационных измерителях для небольших беспилотных летательных аппаратов (с максимальной взлетной массой до 20...30 кг) связана с техническими трудностями, обусловленными ограничением на массогабаритные, энергетические, вычислительные и стоимостные характеристики бортовой аппаратуры. Компактные ДИСС для небольших БпЛА должны иметь небольшую массу и габариты, а также невысокую стоимость готовых изделий. Это требует применения минимального количества антенн и приемных каналов, использования зондирующих сигналов с невысокой мощностью (для исключения использования мощных выходных усилителей с высоким энергопотреблением и массой), обработка которых должна проводиться на недорогих бортовых вычислителях. При этом упрощение аппаратуры и снижение массогабаритных характеристик не должно приводить к снижению точности измеряемых параметров движения летательных аппаратов.

Минимизация количества антенн и приемных каналов в малогабаритных ДИСС может быть достигнута за счет применения многолучевых антенн. Снижение мощности зондирующих сигналов и требований к вычислительным возможностям бортовых вычислителей может быть достигнуто за счет применения непрерывных широкополосных частотно-модулированных зондирующих сигналов. Использование таких сигналов в сочетании со структурой построения ДИСС как радиолокатора с непрерывным частотно-модулированным излучением позволит снизить пиковую мощность зондирующих сигналов, радиотехническую заметность и объем оцифровываемых и обрабатываемых данных в единицу времени. Кроме того, реализация современных процедур анализа формы дальностно-доплеровских портретов, основанных на оптимизационных методах, обеспечит снижение требуемого отношения сигнал-шум на входе приемного устройства при сохранении требуемой точности получаемых измерений.



Цель статьи – разработка способов обработки сигналов, обеспечивающих снижение массогабаритных и стоимостных характеристик ДИСС для их применения в задачах автономной навигации БпЛА при сохранении точности формируемых оценок скорости и угла сноса в условиях невысокого отношения сигнал-шум в приемном канале.

Анализ существующих радиолокационных способов определения параметров полета летательных аппаратов. Традиционно для измерения компонентов вектора скорости полета летательных аппаратов применяются трех- и четырехлучевые ДИСС [4, 5]. Такие измерители обладают высокой точностью измерения и ее слабой зависимостью от изменения характера рельефа и отражающих свойств подстилающей поверхности, а также углов пространственной ориентации летательного аппарата. Однако такие измерители являются многоканальными, в которых количество приемных каналов соответствует количеству лучей диаграммы направленности. Это требует наличия трех или четырех идентичных приемных каналов и такого же количества каналов системы цифровой обработки сигналов, обеспечивающих оцифровку и доплеровскую обработку значительного объема данных в реальном масштабе времени. Необходимость применения многоканальных аналоговых и цифровых устройств обработки сигналов существенно увеличивает массогабаритные характеристики и стоимость готовых решений.

Более компактными и простыми с точки зрения аппаратной реализации являются однолучевые измерители [8–11], измерение параметров полета в которых основано на анализе формы дальностно-доплеровского портрета принятых сигналов. Несмотря на простоту таких ДИСС, они характеризуются сильными ошибками измерений при полете над неровной и пересеченной местностью, особенно при наличии в луче диаграммы направленности отражений от деревьев, оврагов, зданий и других элементов ландшафта, сильно выделяющихся по высоте относительно основного уровня земной поверхности. Наличие в луче диаграммы направленности таких объектов приводит к искажению формы дальностно-доплеровского портрета и появлению ошибок измерения.

Обоснование однолучевого способа измерения скорости полета БпЛА.

Для определения направлений по совершенствованию алгоритмов цифровой обработки сигналов в малогабаритных ДИСС авторами статьи проведен натурный эксперимент по оценке точности работы однолучевого способа измерения параметров полета летательного аппарата и его применимости для реализации в малогабаритных радиолокационных измерителях. Для этого малогабаритный радиолокатор непрерывного излучения С-диапазона «Квазар» [3] устанавливался на беспилотный летательный аппарат вертолетного типа. Приемная и передающая антенны ориентировались в надир. Алгоритмическая реализация способа измерения параметров полета состояла из шести последовательно выполняемых этапов:

- излучение зондирующих сигналов, их прием, сжатие по дальности, оцифровка и поперечное запоминание;
- формирование дальностно-доплеровского портрета;
- режекция отражений от крон деревьев;
- бинаризация (пороговая обработка) дальностно-доплеровского портрета;
- формирование кривой эталонного профиля дальностно-доплеровского портрета;
- сопоставление эталонного профиля с бинаризованным дальностно-доплеровским портретом и вычисление скорости и высоты полета по результатам сопоставления.

Разберем более подробно содержание процедур каждого этапа.

Этап 1. Излучение зондирующих сигналов и их прием осуществлялся антенной системой, расположенной под летательным аппаратом, ориентированной в надир и состоящей из приемной и передающей антенн с однолучевой диаграммой направленности. Сжатие сигналов осуществлялось путем перемножения принятого сигнала с зондирующим сигналом в приемном устройстве в течение каждого периода зондирования с последующим вычислением преобразования Фурье. Оцифровка принятых сигналов осуществлялась



на разностной частоте с последующей регистрацией оцифрованных отсчетов в оперативной памяти малогабаритного бортового вычислителя nVidia Jetson Orin Nano. Для удобства дальнейшей обработки оцифрованные сигналы запоминались в виде двумерной матрицы размерностью $N \times M$, в которой N соответствует количеству оцифрованных отсчетов за один период зондирования, а количество строк M определяется временем когерентного накопления сигналов T_c , которое выбирается исходя из требуемой разрешающей способности по скорости бортового радиолокационного измерителя. Последующая обработка зарегистрированных данных осуществлялась в программном продукте MatLab.

Этап 2. При формировании дальностно-доплеровского портрета для получения спектра доплеровских частот осуществлялось выполнение операции быстрого преобразования Фурье над каждой выборкой отсчетов из сжатого по дальности сигнала, содержащей отсчеты с одинаковой наклонной дальностью. Так, на рисунке 1 представлен вид дальностно-доплеровского портрета, сформированного при зондировании земной поверхности в процессе полета летательного аппарата. Как видно из рисунка, структура дальностно-доплеровского портрета включает как отражения от земной поверхности, так и отражения от крон деревьев. Наличие таких отражений потребовало применения дополнительных процедур по их режекции, которые выполнялись на следующем этапе.

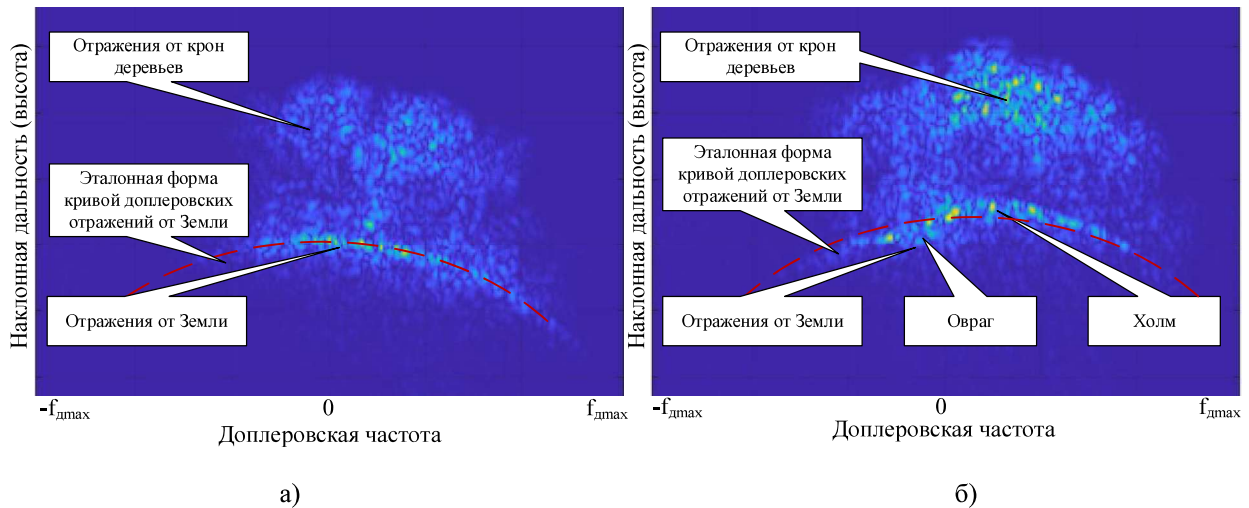


Рисунок 1 – Вид дальностно-доплеровского портрета при однолучевом зондировании земной поверхности в надир: а) при полете над ровной местностью; б) над пересеченной местностью

Этап 3. Амплитуда отражений от крон деревьев в большинстве случаев соизмерима с амплитудой отражений от земной поверхности и поэтому затрудняет корректное выделение альтиметровых отражений от земной поверхности, что приводит к ошибкам измерения высоты и скорости полета носителя. Для повышения качества работы алгоритма проводилась режекция отражений от крон деревьев. Для этого осуществлялось «зануление» отсчетов дальностно-доплеровского портрета для высот, имеющих меньшие значения по сравнению с априорным значением высоты полета летательного аппарата, полученным на предыдущих циклах измерения высоты.

Этап 4. Для подготовки дальностно-доплеровского портрета к последующей процедуре его аппроксимации с использованием кривой эталонного профиля, форма которой соответствует высоте и скорости полета носителя, проводилась процедура бинаризации, основанная на пороговой обработке дальностно-доплеровского портрета после его нормирования (рисунок 2). При проведении эксперимента величина порога выбиралась оператором вручную, исходя из обеспечения максимального контраста отражений от земной поверхности, и в большинстве случаев находилась на интервале от 0,1 до 0,2. По результатам пороговой



обработки формировался массив $\mathbf{Q} = [(r_0, f_{d0}), (r_1, f_{d1}), \dots, (r_{M-1}, f_{dM-1})]$ из Q элементов, каждый i -й элемент которого содержал координату точки дальностно-доплеровского портрета, значение яркости которой превысило порог. Координата каждой i -й точки задавалась соответствующими ей значениями наклонной дальности и доплеровской частоты (r_i, f_{di}) на бинаризованном дальностно-доплеровском портрете.

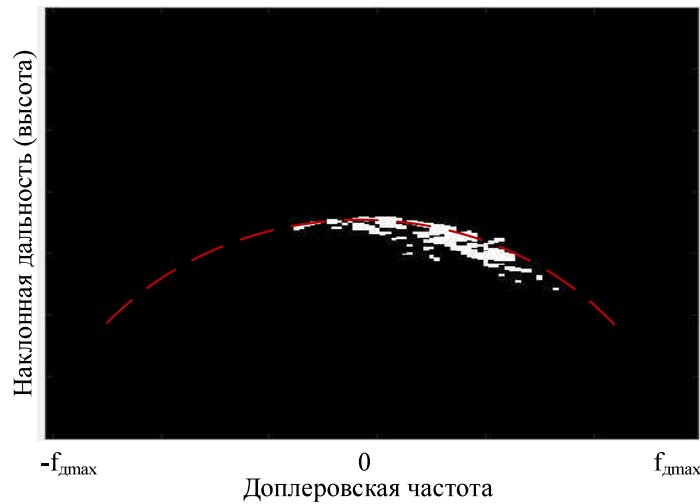


Рисунок 2 – Вид бинаризованного дальностно-доплеровского портрета с выполненной режекцией отражений от крон деревьев

Этап 5. Формирование кривой эталонного профиля дальностно-доплеровского портрета осуществлялось исходя из наиболее вероятных значений высоты и скорости полета летательного аппарата. Кривая эталонного профиля представляла собой параметрическую зависимость наклонной дальности R от доплеровской частоты f_d [6], скорости V и высоты полета носителя h

$$R(f_d, h, V) = \frac{h}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_d}{2V}\right)^2}}; \quad f_d \leq f_{d\max}, \quad (1)$$

где λ – длина волны зондирующего сигнала; $f_{d\max} = 1/(2T_n)$; T_n – период повторения зондирующих сигналов.

Совокупность зависимостей $R(f_d, h, V)$, соответствующих различным скоростям и высотам полета носителя и вычисленных на основе (1), представлена на рисунке 3.

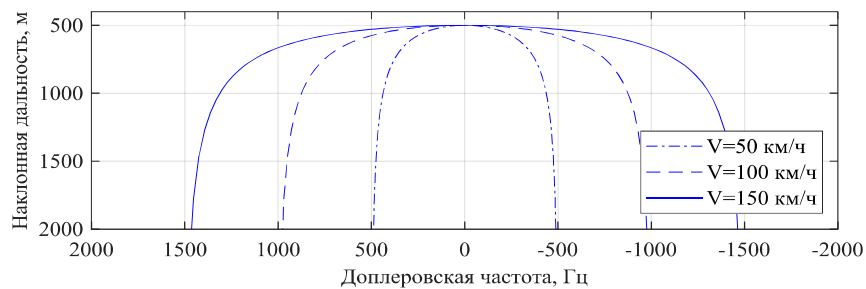


Рисунок 3 – Зависимости $R(f_d)$ при различных V



Анализ зависимостей показывает, что с увеличением скорости полета летательного аппарата форма кривой $R(f_d, h, V)$ расширяется по координате доплеровской частоты, а ее положение по координате наклонной дальности не меняется. Положение по координате наклонной дальности определяется высотой полета летательного аппарата. Сопоставление формы вычисленной кривой (рисунок 3) с формой бинаризованного дальностно-доплеровского портрета (рисунок 2) было положено в основу вычисления высоты и скорости полета летательного аппарата – носителя радиолокационного измерителя.

Этап 6. Сопоставление эталонного профиля с бинаризованным дальностно-доплеровским портретом осуществлялось путем решения оптимизационной задачи на основе вычисления степени соответствия между сформированным на четвертом этапе массивом точек Q и параметрической моделью эталонной кривой (1). Степень соответствия определялась значением целевой функции, представляющей собой сумму квадратов рассогласования

$$F(h, V) = \sum_{i=0}^{M-1} (r_i - R(f_{di}, h, V))^2. \quad (2)$$

Решение оптимизационной задачи сводилось к поиску таких значений \hat{h} и \hat{V} , обеспечивающих минимальное значение функции рассогласования, т. е.

$$\{\hat{h}, \hat{V}\} = \arg \min_{h, V} F(h, V). \quad (3)$$

Учитывая в большинстве случаев достаточно гладкий вид функции (2), для поиска решения уравнения (3) применялся метод градиентного спуска [12], характеризующийся невысокими вычислительными затратами при достаточно хорошей сходимости.

Один из результатов, отражающий наиболее общую картину работы однолучевого способа измерения скорости полета летательного аппарата, полученный в процессе проведенного натурного эксперимента, представлен на рисунке 4. Для сравнения на этом же рисунке приведен график скорости летательного аппарата, зарегистрированной бортовым приемником глобальных навигационных спутниковых сигналов (ГНСС). Оценки скорости формировались с интервалом равным одной секунде. Время когерентного накопления сигналов при формировании дальностно-доплеровского портрета T_c составляло также одну секунду.

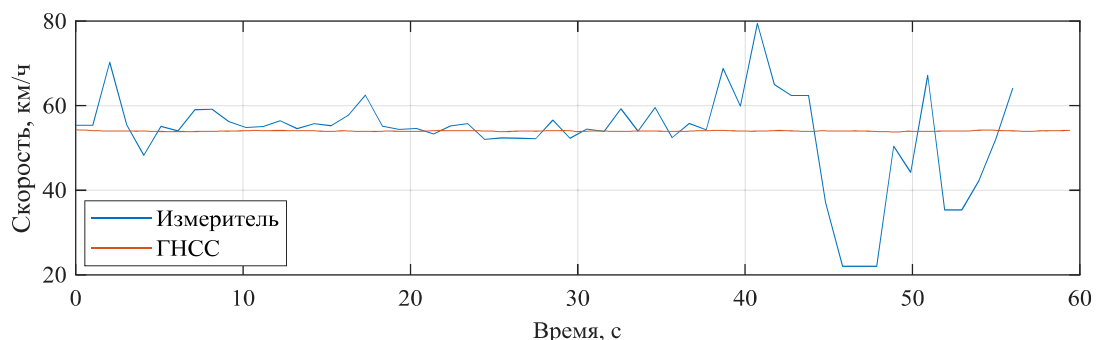


Рисунок 4 – График оценки скорости полета летательного аппарата при однолучевом зондировании подстилающей поверхности при $T_c = 1$ с

Анализ графика показывает, что полученные оценки скорости группируются около истинных значений. В большинстве случаев СКО измерения скорости не превышало 1–3 км/ч.



Вместе с тем на графике присутствуют участки, на которых эти оценки имеют весьма большие значения, превышающие 20 км/ч и более. Такие большие значения обусловлены, прежде всего, наличием мешающих отражений от элементов растительности на дальностно-доплеровском портрете. Также имеются участки (на интервале времени от 46-й до 48-й секунды), на которых примененный метод градиентного спуска не обеспечил нахождение решения уравнения (3) из-за наличия сильных мешающих отражений, приводящих к искажениям бинаризованного дальностно-доплеровского портрета. В этом случае статус измерений в алгоритмах бортового вычислителя принимался невалидным, а значению скорости БпЛА присваивалось минимальное значение из диапазона возможных скоростей, равное 20 км/ч.

Усредненные статистические характеристики качества работы алгоритма, реализующего способ, полученные по серии полетов при выборе значений T_c от 0,1 до 1 секунды, сведены в таблицу 1.

Анализ таблицы показывает, что для получения оценок скорости с СКО, не превышающим единиц процентов, время когерентного накопления необходимо выбирать не менее одной секунды, что в большинстве практических задач не всегда может быть обеспечено из-за требований к более частому обновлению навигационной информации при решении задач автономной навигации в реальном масштабе времени. Количество невалидных измерений лежит в диапазоне от нескольких единиц до десяти процентов и не зависит от времени когерентного накопления сигналов. Процент невалидных измерений в основном обусловлен характером неоднородности подстилающей поверхности.

Таблица 1 – Статистические характеристики качества работы алгоритма, реализующего предложенный способ

Характеристика	Время накопления сигналов T_c , с			
	0,1	0,2	0,5	1
СКО по скорости, км/ч (%)	6,1–9,2 (11,3–17)	4,7–8,5 (8,7–15,7)	1,6–5,7 (2,9–10,6)	0,39–5,3 (0,72–9,8)
Доля невалидных измерений, %	4,5–9,5	1,06–10,5	1,33–10,6	2,7–10,7

По результатам проведенных экспериментов можно сказать, что повышение качества работы однолучевого способа может быть основано на применении алгоритмов адаптивной бинаризации дальностно-доплеровских портретов, обеспечивающих улучшенную режекцию мешающих отражений от растительности и других объектов, находящихся в луче диаграммы направленности антенны и искажающих профиль отражений от земной поверхности. Такой способ может быть использован, скорее всего, при полете над равнинной местностью с минимальными перепадами высот.

В то же время рассмотренный способ однолучевого измерения скорости за счет применения оптимизационных методов обеспечивает получение оценок скорости при достаточно сильных искажениях дальностно-доплеровского портрета. Поэтому применение оптимизационных методов в сочетании с многолучевыми способами измерения скорости позволит добиться существенно лучших точностей, в том числе при невысоких отношениях сигнал-шум. При этом для снижения количества приемных каналов рассмотрим применение пары двухлучевых антенн.

Далее с учетом полученных результатов исследования проведем обоснование способа измерения скорости полета БпЛА и угла его сноса, основанного на применении пары двухлучевых антенн, обеспечивающего снижение массогабаритных и стоимостных характеристик ДИСС, характеризующегося высокой точностью формируемых оценок скорости и угла сноса в условиях малого отношения сигнал-шум в приемном канале.

Обоснование способа определения скорости и угла сноса доплеровским измерителем с двухлучевыми антеннами при невысоких отношениях сигнал-шум в приемном канале. Для обеспечения максимальной радиотехнической скрытности, помехозащищенности,



простоты конструкции и низкой стоимости бортового доплеровского радиолокационного измерителя наиболее целесообразным является использование непрерывных сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). С позиций рациональной аппаратной реализации четырехлучевого ДИСС целесообразным является применение пары двухлучевых антенн, плоскость сечения диаграмм направленности которых параллельна направлению строительной оси БПЛА (рисунок 5).

Применение двухлучевых антенн позволит сократить количество приемных каналов ДИСС и каналов системы цифровой обработки до двух, при этом обеспечивается возможность реализации четырехлучевого способа измерения скорости и угла сноса. Разделение спектра доплеровских частот в каждом из двух каналов, принятых двухлучевой антенной, осуществляется на основе анализа положения максимумов отражений на дальностно-доплеровских портретах. Алгоритмическая реализация способа измерения скорости и угла сноса включает пять последовательно выполняемых этапов:

- излучение зондирующих сигналов, их прием, оцифровка, сжатие по дальности и поперечное запоминание;
- формирование двумерного дальностно-доплеровского портрета для каждого канала;
- формирование одномерного доплеровского портрета для каждого канала;
- аппроксимация отсчетов спектра доплеровских частот одномерного доплеровского портрета, поиск и определение значений средних доплеровских частот, соответствующих максимумам аппроксимирующей функции;
- вычисление путевой скорости на основе полученных значений средних доплеровских частот.

Далее раскроем более подробно содержание каждого этапа.

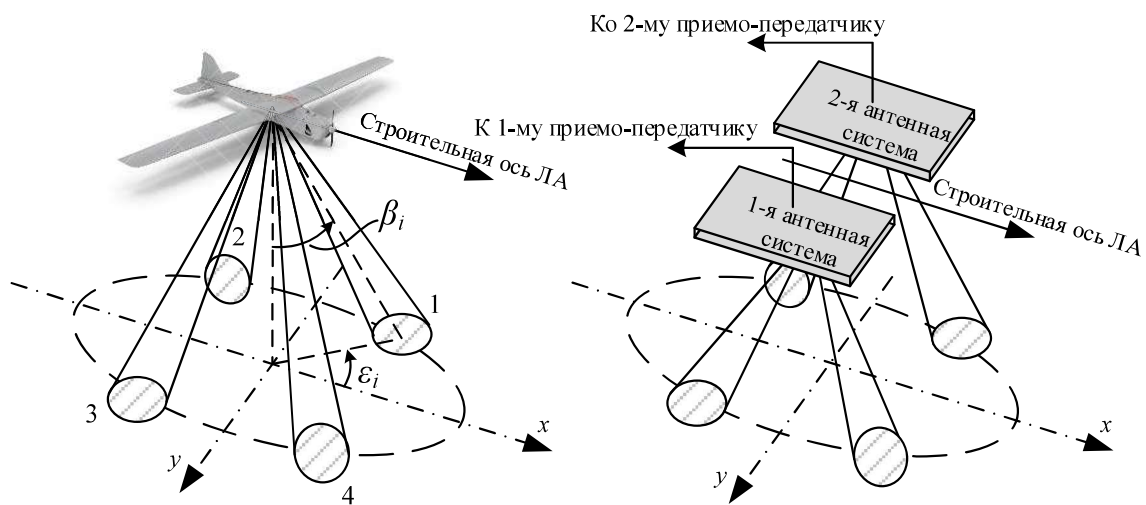


Рисунок 5 – Расположение лучей антенн и отражающих участков земной поверхности

Этапы 1 и 2. Действия, выполняемые на первом и втором этапах, не отличаются от действий этих же этапов для однолучевого способа измерения скорости, рассмотренного ранее. Отличия заключаются лишь в том, что ДИСС является двухканальным, а каждый из каналов содержит двухлучевую антенну. Лучи антенн ориентированы так, как показано на рисунке 5. Вид сформированного двумерного дальностно-доплеровского портрета радиолокационных отражений от однородной плоской подстилающей поверхности для одной двухлучевой антенной системы, смоделированный в программной среде MatLab [6] для $\epsilon_1 = 45^\circ$, $\epsilon_2 = 135^\circ$, $\beta_1 = \beta_2 = 30^\circ$ представлен на рисунке 6а.



Этап 3. Для определения параметров вектора скорости полета БПЛА необходимо определить значения средних доплеровских частот в каждом луче диаграммы направленности каждой пары двухлучевой антенной системы. Для этого проводилось формирование одномерного доплеровского портрета в координатах «амплитуда – доплеровская частота», осуществляемое путем суммирования отсчетов в каждом столбце двумерного дальностно-доплеровского портрета. Вид сформированного одномерного доплеровского портрета, полученного по результатам обработки сигналов одной из двух двухлучевых антенн, представлен на рисунке 6б.

Анализ формы одномерного доплеровского портрета показывает наличие двух выраженных максимумов, каждый из которых соответствует одному из лучей диаграммы направленности антенны. При этом максимум с положительной доплеровской частотой соответствует лучу диаграммы направленности, ориентированному по направлению полета носителя ДИСС, а максимум с отрицательной доплеровской частотой – лучу диаграммы направленности, ориентированному в противоположную сторону. Определив положение каждого максимума спектра доплеровских частот в обоих приемных каналах, можно вычислить параметры вектора скорости летательного аппарата и углы его пространственной ориентации [7].

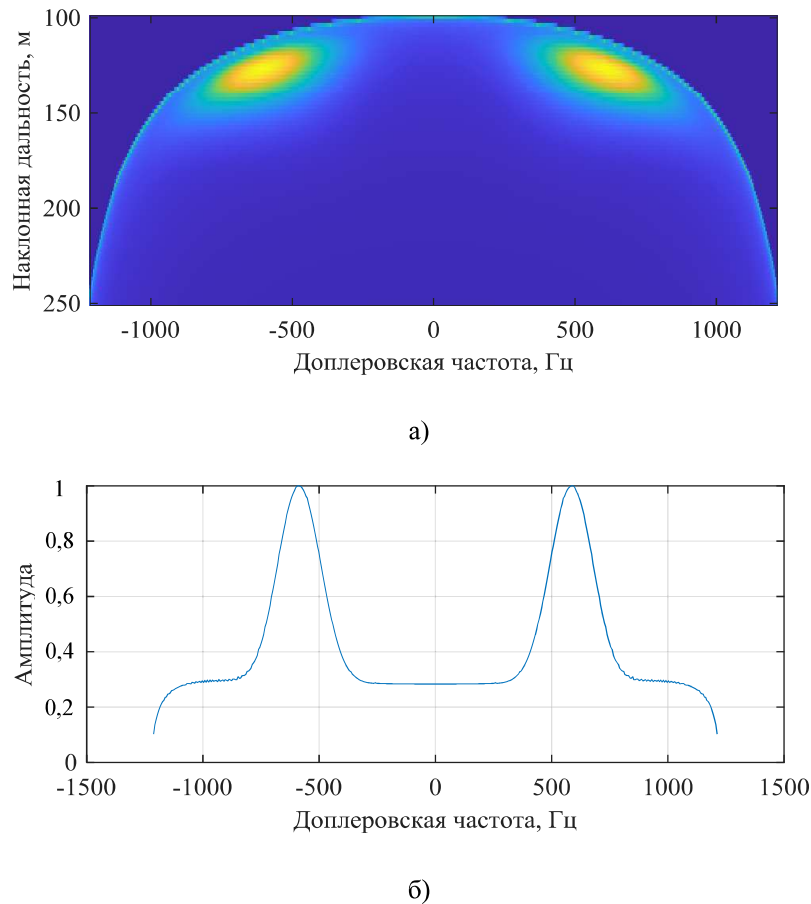


Рисунок 6 – Вид доплеровского портрета, сформированного при двухлучевом зондировании подстилающей поверхности: а) двумерный; б) одномерный

Этап 4. Определение положений максимумов спектра доплеровских частот может быть осуществлено на основе поиска положения отсчетов с максимальным значением амплитуды в области положительных и отрицательных частот (рисунок 8). Однако такой подход характеризуется невысокой точностью при малых отношениях сигнал-шум в приемном канале.



Шумовые выбросы вблизи нахождения максимума снижают точность оценки доплеровских частот, а выбросы, находящиеся на значительном удалении, приводят к так называемым аномальным ошибкам, распределенным равномерно на всем интервале значений измеряемых параметров. Более точное определение значений доплеровских частот, соответствующих положению максимумов доплеровских отражений, может быть осуществлено на основе применения методов аппроксимации. Применительно к использованию двухлучевой антенной системы в качестве аппроксимирующей функции может быть выбрана функция, основанная на суперпозиции двух гауссоид и постоянной составляющей

$$F(f, A_0, A_1, A_2, f_1, f_2, \sigma_1, \sigma_2) = A_0 + \sum_{i=1}^2 A_i \exp\left(-\frac{(f - f_i)^2}{2\sigma_i^2}\right), \quad (4)$$

где f – доплеровская частота; A_0 – постоянная составляющая; A_i, f_i, σ_i , – параметры аппроксимирующей функции, характеризующие амплитуду, положение максимума гауссовой функции на оси доплеровских частот и ее ширину соответственно.

Каждая из гауссоид аппроксимирует форму и положение отрицательного и положительного максимума, а параметр A_0 определяет величину смещения гауссоид по амплитуде, обусловленную как сигналами отражений от подстилающей поверхности, принимаемых по боковым лепесткам диаграммы направленности, так и шумом в приемном канале.

Поиск аргументов аппроксимирующей функции (4), значения которых обеспечивают ее максимальную схожесть с одномерным доплеровским портретом, может быть осуществлен на основе метода наименьших квадратов, основанного на вычислении среднего квадрата расстояния между аппроксимирующей функцией и отсчетами одномерного доплеровского портрета

$$M(A_0, A_1, A_2, f_1, f_2, \sigma_1, \sigma_2) = \sum_{i=1}^{N_d-1} (y_i - F(f_i, A_0, A_1, A_2, f_1, f_2, \sigma_1, \sigma_2))^2, \quad (5)$$

где N_d – общее количество отсчетов одномерного доплеровского портрета; i – порядковый номер отсчета доплеровской частоты одномерного доплеровского портрета; f_i – значение доплеровской частоты; y_i – амплитуда спектральной составляющей одномерного доплеровского портрета.

За оценки положений максимумов \hat{f}_{o1} и \hat{f}_{o2} , характеризующих значения средних доплеровских частот, принимаются значения аргументов f_1 и f_2 , при которых функция (5) принимает минимальное значение. Минимизация функции (5) связана с решением оптимизационной задачи

$$\{\hat{f}_{o1}, \hat{f}_{o2}\} = \arg \min_{A_0, A_1, A_2, f_1, f_2, \sigma_1, \sigma_2} M(A_0, A_1, A_2, f_1, f_2, \sigma_1, \sigma_2). \quad (6)$$

Для обеспечения сходимости решения оптимизационной задачи области ограничений на значения аргументов функции (4) выбираются исходя из априорных величин, определяющих положения максимумов на одномерном доплеровском портрете, и могут быть заданы на следующих интервалах: $f_1 \in [-F_{d\max}, 0)$, $f_2 \in [0, F_{d\max}]$, $A_0, A_1, A_2 \in [0, 1]$, $\sigma_1, \sigma_2 \in [0, F_{d\max}/3]$,



где $F_{\text{dmax}} = 1/(2T_n)$ – максимальное значение доплеровской частоты на доплеровском портрете; T_n – период повторения зондирующих сигналов.

Решение оптимизационной задачи (6) может быть осуществлено на основе методов градиентного спуска, как и при реализации способа однолучевого измерения параметров полета летательного аппарата.

Этап 5. Вычисление путевой скорости и угла сноса осуществляется на основе полученных значений средних доплеровских частот $\hat{f}_{\text{d}1}$ и $\hat{f}_{\text{d}2}$, принятых сигналов в каждом луче диаграммы направленности первой антенной системы и значений средних доплеровских частот $\hat{f}_{\text{d}3}$ и $\hat{f}_{\text{d}4}$ в каждом луче диаграммы направленности второй антенной системы. Тогда, зная угол ориентации лучей диаграммы направленности антенной системы β' в угломестной плоскости, можно вычислить значение путевой скорости, угла сноса φ и тангажа ν БПЛА по следующим выражениям [7]:

$$V = \frac{\lambda}{2 \sin \beta'} \sqrt{(\hat{f}_{\text{d}1} - \hat{f}_{\text{d}3})^2 - (\hat{f}_{\text{d}2} - \hat{f}_{\text{d}4})^2}; \quad (7)$$

$$\varphi = \arctan \left(\frac{\hat{f}_{\text{d}2} - \hat{f}_{\text{d}3}}{\hat{f}_{\text{d}1} - \hat{f}_{\text{d}4}} \right); \quad (8)$$

$$\nu \approx \arcsin \left(\frac{(\hat{f}_{\text{d}1} + \hat{f}_{\text{d}2} + \hat{f}_{\text{d}3} + \hat{f}_{\text{d}4}) \text{tg} \beta'}{4V/\lambda} - \sin \beta' \right); \quad \nu < \beta'. \quad (9)$$

Вычисленные значения в дальнейшем могут использоваться для информационного обеспечения бортовых автопилотов и систем управления полетом БПЛА.

Результаты экспериментальных проверок предложенного способа с двухлучевыми антеннами. Для оценки качества работы предложенного способа проведен натурный эксперимент. В качестве носителя выбран БПЛА квадрокоптерного типа DJI Matrice 350 с установленной РЛС «Квазар» [2]. Из-за массогабаритных ограничений квадрокоптера исследование разработанных способов осуществлялось при установке одной двухлучевой антенной системы, состоящей из передающей и приемной антенн (рисунок 7).

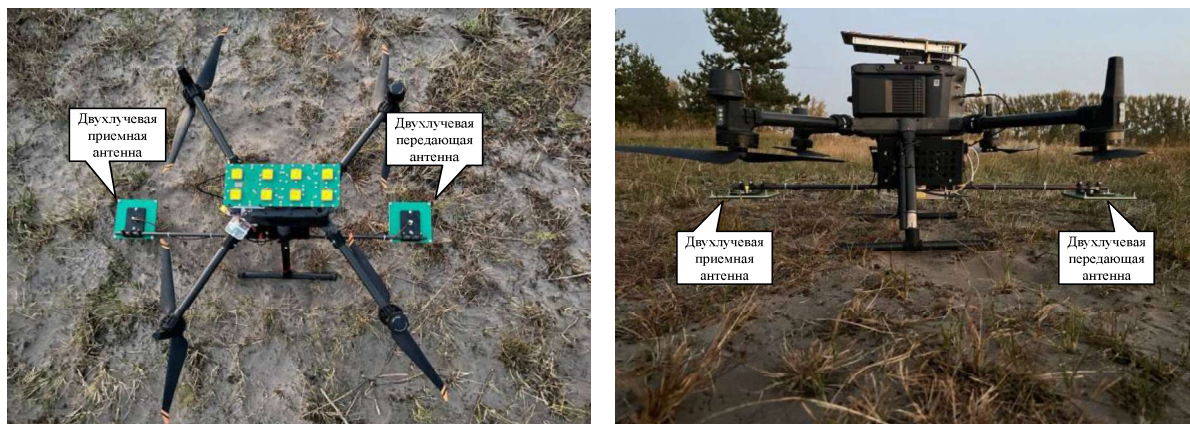


Рисунок 7 – Вид квадрокоптера DJI Matrice 350 с установленной РЛС и двухлучевыми антеннами



Лучи диаграммы направленности ориентированы вниз относительно плоскости расположения винтов носителя, при этом первый луч направлен вперед относительно строительной оси летательного аппарата, а второй – назад. Угол отклонения каждого луча диаграммы направленности относительно вертикали к плоскости антенн составлял 30° . Полет квадрокоптера осуществлялся по заранее заданному прямолинейному маршруту на высотах от 100 до 300 м с выдерживанием скорости полета около 40 км/ч. Выдерживание прямолинейного маршрута с равномерной скоростью, в том числе и при воздействии бокового ветра, осуществлялось автоматически автопилотом квадрокоптера за счет управления по крену и тангажу на основе данных, полученных от приемника ГНСС. Этим обеспечивался полет с нулевым углом сноса. Регистрация скорости полета носителя осуществлялась как по показаниям ГНСС, так и по результатам обработки сигналов РЛС разработанным двухлучевым способом.

Для проверки работоспособности предложенного способа эксперимент выполнялся в условиях высокого и низкого уровня отношения сигнал-шум, изменение которого достигалось за счет подключения или отключения усилителя мощности на выходе передающего устройства, а также аттенуаторов на входе приемного устройства. Обработка зарегистрированных радиосигналов и вычисление значений путевой скорости осуществлялись после проведения полетов в среде математического моделирования MatLab. Сформированные при этом одномерные доплеровские портреты, а также результаты их аппроксимации выражением (4) представлены на рисунке 8.

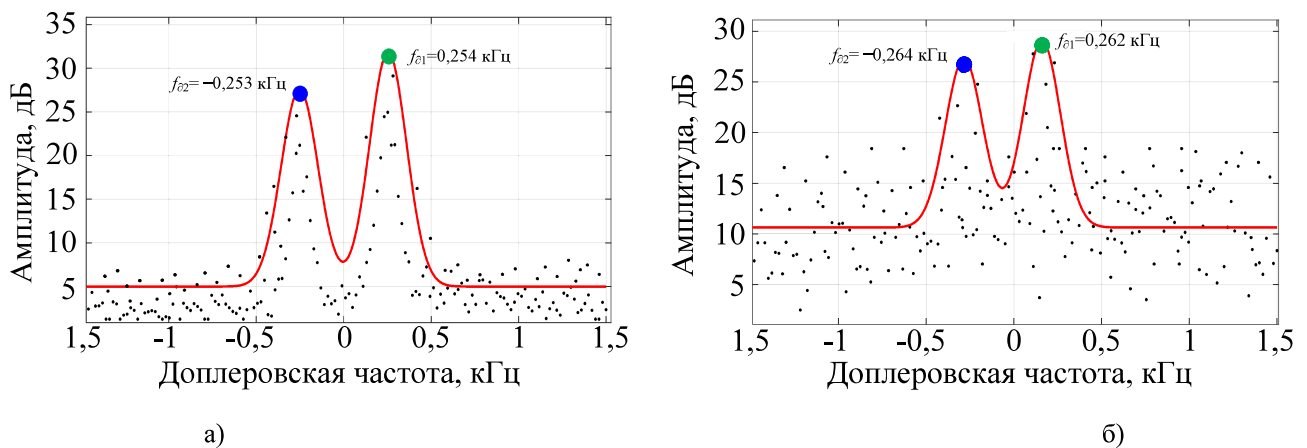


Рисунок 8 – Вид сформированных по результатам полетов двумерных доплеровских портретов при высоком $q = 8,8$ дБ (а) и малом $q = 2,5$ дБ (б) отношении сигнал-шум и результаты их аппроксимации

Оценка точности измерения значений путевой скорости и качества работы двухлучевого измерителя выполнялась путем сопоставления измеренных значений скорости разработанным способом со значениями скорости от приемника сигналов ГНСС. Одна из реализаций измерений представлена на рисунке 9.

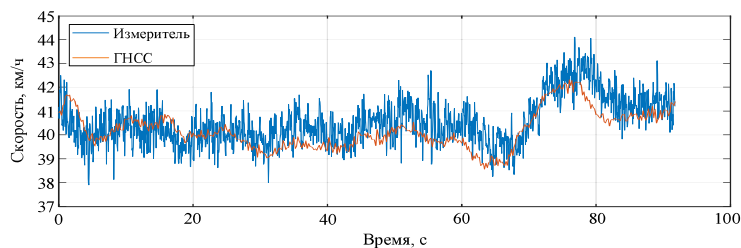


Рисунок 9 – Измеренные скорости беспилотного летательного аппарата радиолокационным измерителем и приемником ГНСС



Точностные характеристики предложенного способа, полученные по усредненным данным из 12 полетов, сведены в таблицу 2. При этом определение значений средних доплеровских частот выполнялось с использованием двух методов, а именно с использованием метода определения средних доплеровских частот по максимальным значениям спектра и метода аппроксимации спектра сформированного одномерного доплеровского портрета функциями Гаусса.

Таблица 2 – Статистические характеристики качества работы алгоритма, реализующего предложенный способ при $T_c = 0,05$ с

Характеристика	Высокий уровень с/ш ($q = 7 \dots 9$ дБ)	Низкий уровень с/ш ($q = 2 \dots 4$ дБ)
СКО по скорости, км/ч (%) для метода максимальных значений спектра	0,6–2,2 (1,2–4,2)	2,65–17,5 (5,1–33,6)
СКО по скорости, км/ч (%) для метода аппроксимации функцией вида (4)	0,2–0,9 (0,4–1,5)	0,65–1,9 (1,3–4,3)

Полученные в ходе эксперимента значения оценок путевой скорости демонстрируют улучшение точности измерения по сравнению с однолучевым способом примерно на 0,2–4,4 % в условиях высокого отношения сигнал-шум. При этом двухлучевой измеритель способен получать значения путевой скорости с высокой точностью даже в условиях низкого отношения сигнал-шум. Кроме того, высокая точность измерений обеспечивается при существенно меньшем времени когерентного накопления сигналов (0,05 с против 1 с). Также двухлучевой способ характеризуется практически нулевым процентом невалидных оценок, что позволяет его применение даже при полете над пересеченной местностью с наличием растительности и деревьев.

Отличительной особенностью предложенного способа является возможность его реализации для трех- и четырехлучевой системы измерения путевой скорости. Такие системы позволяют не только повысить точность, но и одновременно получать оценки скорости и углов пространственной ориентации летательного аппарата на основе выражений, приведенных в [7], даже в условиях низкого уровня отношения сигнал-шум на входе приемных каналов.

Четырехлучевой способ измерения навигационных параметров, несмотря на большее количество лучей диаграммы направленности, является наиболее простым с точки зрения аппаратной и программной реализации, так как не предполагает значительных доработок двухлучевого способа.

Выводы. Проведенный эксперимент по исследованию однолучевого способа измерения скорости летательного аппарата показал его сильную зависимость от свойств подстилающей поверхности, особенно при наличии на ней неровностей и растительности. Для получения оценок скорости с точностью не хуже 9,8 % время когерентного накопления сигналов должно быть не менее 1 с, что для большинства случаев является чрезмерно высоким. Двухлучевой способ подвержен значительному проценту (до 10,7 %) невалидных измерений, которые обусловлены ошибками аппроксимации доплеровских портретов из-за наличия отражений от растительности и неровностей рельефа. Разработанный способ измерения вектора скорости, основанный на применении двухлучевых антенн, позволяет получать оценки с более высокой точностью от 0,65 % до 4,3 % независимо от характера подстилающей поверхности при существенно меньшем времени когерентного накопления сигналов. В большинстве проведенных экспериментальных проверок время когерентного накопления сигналов порядка 0,05...0,1 с обеспечивало получение оценок измерений с точностью не хуже 4,3 %.



Применение методов аппроксимации доплеровских портретов при реализации алгоритмов оценки скорости обеспечивает высокую точность измерений при небольшом отношении сигнал-шум, не превышающем 2...3 дБ. Применение двухлучевых антенн совместно с методами аппроксимации доплеровского портрета позволяет осуществить реализацию недорогих ДИСС, обладающих компактностью и высокой точностью измерения как вектора скорости летательного аппарата, так и углов его пространственной ориентации при невысоких отношениях сигнал-шум в приемном канале для реализации функций автономной навигации в условиях отсутствия сигналов глобального радионавигационного поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мальшев В.А., Митрофанов Д.В. Анализ боевых возможностей беспилотных летательных аппаратов по поражению наземных целей и порядок их применения // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2024. № 29. С. 21–33. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.vva.mil.ru/Izdaniay/VKS-teoriya-i-praktika> (дата обращения 26.02.2026).
2. Гончар Л.Л., Абрамова И.Н., Спиридонов Е.Г., Абрамов О.В. Аспекты импортозамещения радиоэлектронных компонентов в авиационной отрасли // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2023. № 25. С. 63–72. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.vva.mil.ru/Izdaniay/VKS-teoriya-i-praktika> (дата обращения 26.02.2026).
3. Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П., Рязанцев Л.Б. Малогабаритные многофункциональные РЛС с непрерывным частотно-модулированным излучением. М.: Радиотехника, 2020. 278 с.
4. Колчинский В.Е., Мандуровский И.А., Константиновский М.И. Автономные доплеровские устройства и системы навигации летательных аппаратов. М.: Советское радио, 1975. 430 с.
5. Гришин Ю.П., Ипатов В.П., Казаринов Ю.М. и др. Радиотехнические системы: учебник для вузов по специальности «Радиотехника». М.: Высшая школа, 1990. 496 с.
6. Рязанцев Л.Б., Бабич О.А., Маклаков Д.Ю. Моделирование дальностно-доплеровских отражений от земной поверхности при радиолокационном зондировании с борта летательного аппарата // Цифровая обработка сигналов. 2025. № 1. С. 28–34.
7. Рязанцев Л.Б., Рязанцев Д.Л., Бабич О.А. Обработка сигналов в малогабаритных доплеровских измерителях скорости и угла сноса при решении задач автономной навигации беспилотных летательных аппаратов // Цифровая обработка сигналов. 2025. № 4. С. 18–25.
8. Макрушин А.П., Пилипенко А.И., Мухин В.В., Фролов А.Ю., Янковский В.Т., Колтышев Е.Е. Определение значений путевой и вертикальной составляющих скорости полета носителя по сигналам когерентного радиовысотомера // Сборник трудов по материалам IV Всероссийской НПК «Радиовысотометрия 2013» / Каменск-Уральский: УПКБ «Деталь», 2014. С. 92–96.
9. Пат. RU № 2551896. Способ однолучевого измерения высоты и составляющих скорости летательного аппарата и устройство радиовысотомера, реализующего способ / Мухин В.В., Пилипенко А.И., Макрушин А.П. [и др.]; опубл. 20.04.2015, Бюл. № 11.
10. Буланов В.А., Мусаллам М., Испулов А.А., Трущинский А.Ю. Оценивание навигационных параметров воздушного судна когерентным радиовысотомером с учетом ошибок спектральной обработки эхо-сигнала // Успехи современной радиоэлектроники. 2022. № 10. С. 58–66.
11. Фролов А.Ю., Трущинский А.Ю., Мусаллам М., Буланов С.А. Оптимальная комплексная обработка информации инерциальной навигационной системы и когерентного радиовысотомера в интересах уменьшения ошибок измерения скоростных параметров воздушного судна // Теория и техника радиосвязи. 2022. № 4. С. 80–86.
12. Сухарев А.Г., Тимохов А.В., Федоров В.В. Курс методов оптимизации. 2-е изд. Москва: Физматлит, 2005. 368 с.



REFERENCES

1. Malyshev V.A., Mitrofanov D.V. Analiz boevyh vozmozhnostej bespilotnyh letatel'nyh apparatov po porazheniyu nazemnyh celej i poryadok ih primeneniya // *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika*. 2024. № 29. pp. 21–33. [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <https://www.vva.mil.ru/Izdaniay/VKS-teoriya-i-praktika> (data obrascheniya 26.02.2026).
2. Gonchar L.L., Abramova I.N., Spiridonov E.G., Abramov O.V. Aspekty importozamescheniya radio`elektronnyh komponentov v aviacionnoj otrasli // *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika*. 2023. № 25. pp. 63–72. [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <https://www.vva.mil.ru/Izdaniay/VKS-teoriya-i-praktika> (data obrascheniya 26.02.2026).
3. Kupryashkin I.F., Lihachev V.P., Ryazancev L.B. Malogabaritnye mnogofunkcional'nye RLS s nepreryvnym chastotno-modulirovannym izlucheniem. M.: Radiotekhnika, 2020. 278 p.
4. Kolchinskij V.E., Mandurovskij I.A., Konstantinovskij M.I. Avtonomnye doplerovskie ustrojstva i sistemy navigacii letatel'nyh apparatov. M.: Sovetskoe radio, 1975. 430 p.
5. Grishin Yu.P., Ipatov V.P., Kazarinov Yu.M. i dr. Radiotekhnicheskie sistemy: uchebnik dlya vuzov po special'nosti «Radiotekhnika». M.: Vysshaya shkola, 1990. 496 p.
6. Ryazancev L.B., Babich O.A., Maklakov D.Yu. Modelirovanie dal'nostno-doplerovskih otrazhenij ot zemnoj poverhnosti pri radiolokacionnom zondirovanii s borta letatel'nogo apparata // *Cifrovaya obrabotka signalov*. 2025. № 1. pp. 28–34.
7. Ryazancev L.B., Ryazancev D.L., Babich O.A. Obrabotka signalov v malogabaritnyh doplerovskih izmeritelyah skorosti i ugla snosa pri reshenii zadach avtonomnoj navigacii bespilotnyh letatel'nyh apparatov // *Cifrovaya obrabotka signalov*. 2025. № 4. pp. 18–25.
8. Makrushin A.P., Pilipenko A.I., Muhin V.V., Frolov A.Yu., Yankovskij V.T., Koltyshev E.E. Opredelenie znachenij putevoj i vertikal'noj sostavlyayuschih skorosti poleta nositelya po signalam kogerentnogo radiovysotomera // *Sbornik trudov po materialam IV Vserossijskoj NPK «Radiovysotometriya 2013» / Kamensk-Ural'skij: UPKB «Detal'», 2014. pp. 92–96.*
9. Pat. RU № 2551896. Sposob odnolucheвого izmereniya vysoty i sostavlyayuschih skorosti letatel'nogo apparata i ustrojstvo radiovysotomera, realizuyuschego sposob / Muhin V.V., Pilipenko A.I., Makrushin A.P. [i dr.]; opubl. 20.04.2015, Byul. № 11.
10. Bulanov V.A., Musallam M., Ispulov A.A., Truschinskij A.Yu. Ocenivanie navigacionnyh parametrov vozdushnogo sudna kogerentnym radiovysotomerom s uchetom oshibok spektral'noj obrabotki `eho-signala // *Uspehi sovremennoj radio`elektroniki*. 2022. № 10. pp. 58–66.
11. Frolov A. Yu., Truschinskij A. Yu., Musallam M., Bulanov S. A. Optimal'naya kompleksnaya obrabotka informacii inercial'noj navigacionnoj sistemy i kogerentnogo radiovysotomera v interesah umen'sheniya oshibok izmereniya skorostnyh parametrov vozdushnogo sudna // *Teoriya i tehnika radiosvyazi*. 2022. № 4. pp. 80–86.
12. Suharev A.G., Timohov A.V., Fedorov V.V. Kurs metodov optimizacii. 2-e izd. Moskva: Fizmatlit, 2005. 368 p.

© Рязанцев Л.Б., Санвальд Ю.В., Бабич О.А., Рязанцев Д.Л., 2026

Рязанцев Леонид Борисович, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры электрооборудования (и оптико-электронных систем), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, kernel386@mail.ru.

Санвальд Юлия Владимировна, заместитель директора, АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», Россия, 197375, г. Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, 37, лит. А, sanvald_juv@radar-mms.com.

Бабич Олег Александрович, адъюнкт, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, oleg9mufc5fan@mail.ru.

Рязанцев Дмитрий Леонидович, инженер-программист, акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», Россия, 197375, г. Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, 37, лит. А, kerpe386@mail.ru.



UDC 621.396.96
GRNTI 47.49.31

JUSTIFICATION OF SIGNAL PROCESSING METHODS IN A SMALL-SIZED TWO-CHANNEL DOPPLER MEASUREMENT SYSTEM FOR AIRCRAFT GROUND SPEED AND DRIFT ANGLE

*L.B. RYAZANTSEV, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor
MERC AF «AFA» (Voronezh)*

*Yu.V. SANVALD
JSC «Radar mms» (St. Petersburg)*

*O.A. BABICH
MERC AF «AFA» (Voronezh)*

*D.L. RYAZANTSEV
JSC «Radar mms» (St. Petersburg)*

Signal processing methods are proposed to obtain parameters of unmanned aerial vehicles' own motion using small-sized radar measurement systems for autonomous navigation functions. It is shown that single-beam methods based on analyzing the shape of range-Doppler profiles exhibit a strong dependence of accuracy on the type of underlying surface. To improve measurement accuracy and reduce the size and weight of Doppler measurement systems, a method based on using dual-beam antennas has been developed. The results of field experimental verification of the developed methods are presented, and their accuracy characteristics are evaluated. It is established that the developed dual-beam method provides measurement of carrier flight speed with accuracy no worse than a few percent, with a coherent signal integration time not exceeding one-tenth of a second and a signal-to-noise ratio of no more than a few decibels.

Keywords: Doppler ground speed and drift angle meter, antenna pattern, fast Fourier transform, antenna system, underlying surface.