

ИЗМЕРЕНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВЕКТОРА СКОРОСТИ НАЗЕМНЫХ ДВИЖУЩИХСЯ ЦЕЛЕЙ В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ

А. Д. Кучмий, И. Д. Шаляев, Д. А. Ясенцев

Параллельно с развитием систем и средств высокодетального картографирования подстилающей поверхности совершенствовались и способы селекции (обнаружения) наземных движущихся целей. Кардинальное улучшение характеристик бортовых радиолокационных систем по разрешающей способности произошло после внедрения режимов картографирования с синтезированием искусственной апертуры антенны. Появление радиолокаторов с синтезированием искусственной апертуры антенны позволило обнаруживать наземные движущиеся цели на фоне отражений от подстилающей поверхности, что дало возможность в дальнейшем реализовать алгоритмы селекции наземных движущихся целей для обнаружения низкоскоростных движущихся наземных объектов. В статье представлен разработанный авторами алгоритм определения тангенциальной составляющей вектора скорости наземной движущейся цели. Данный алгоритм обоснован аналитическим методом, проведено его математическое моделирование. Предложенный алгоритм может быть использован для повышения информативности радиолокационных изображений, уточнения истинного положения целей и грубой оценки траектории их движения.

Ключевые слова: радиальная скорость, радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны, селекция наземных движущихся целей, тангенциальная скорость.

Введение

В настоящее время актуальной задачей является всепогодное картографирование подстилающей поверхности, которую можно решить за счёт использования радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны (РСА), разрешающая способность которых сопоставима с разрешением оптических систем. Но из-за наличия эффектов смещения положения отметок от наземных движущихся целей (НДЦ) и их расширения [1] в РСА возникает необходимость оценки путевой скорости НДЦ для определения их истинного положения.

Для устранения побочных эффектов движения НДЦ используются алгоритмы селекции НДЦ (СНДЦ) [1]. Эти алгоритмы, как правило, основаны на различиях траекторных сигналов от движущихся и неподвижных целей с дальнейшим подавлением пассивных помех от подстилающей поверхности и обнаружении факта движения НДЦ. Однако определения факта движения цели на поверхности, равно как и оценки одной составляющей вектора скорости, недостаточно для оценки истинного положения целей. Следовательно, возникает необходимость оценивать как радиальную, так и тангенциальную составляющие скорости цели [1], что требует использования более сложных алгоритмов СНДЦ и накладывает ограничения на возможности его бортового оборудования.

В современных РСА наиболее часто применяется интерферометрический метод СНДЦ [2 – 5]. Однако такой метод требует наличия как минимум двух приёмных антенн, разнесённых на значительное расстояние, необходимое для выделения низкоскоростных целей, что является одной из особенностей

интерферометрического метода СНДЦ. На практике реализацию большой базы реальной интерферометрической антенной системы невозможно обеспечить на одном малогабаритном носителе.

Таким образом, возникает потребность обеспечить оценку двух составляющих скорости цели с использованием одной реальной антенны (РА). В работе рассматривается комплексированный метод обработки траекторных сигналов, полученных радиолокационной системой (РЛС) с синтезированием апертуры, находящейся на борту летательного аппарата, который позволяет оценить составляющие вектора скорости НДЦ и направление её движения.

Описание рассматриваемой ситуации и предлагаемого алгоритма решения задачи

Рассмотрим следующую тактическую ситуацию, в рамках которой будет исследована задача обнаружения НДЦ и оценки составляющих вектора скорости её движения. Бортовая РЛС, расположенная на носителе самолётного типа, осуществляет наблюдение наземных целей в режиме синтезирования апертуры антенны. Наземная цель представляет собой подвижный точечный отражатель, составляющие вектора скорости которой описываются радиальной ($V_{rл}$) и тангенциальной ($V_{tгн}$) составляющими. Носитель в течение времени синтезирования движется по прямолинейной траектории на высоте H над подстилающей поверхностью с постоянной скоростью V_H , на удалении $R_{Нц}$ от НДЦ. Высота носителя H существенно меньше дальности до НДЦ, что даёт возможность пренебречь вертикальной составляющей вектора скорости носителя при анализе отражённого сигнала. РЛС наблюдает участок местности с НДЦ под углом θ_H относи-

тельно вектора скорости носителя. НДЦ смещена относительно центра формируемого кадра радиолокационного изображения (РЛИ) на угол $\theta_{ц}$, абсолютная величина которого считается малой. Описанная тактическая ситуация показана на рис. 1.

Закон изменения дальности $r_{Hц}(t)$ до НДЦ с радиальной и тангенциальной составляющими вектора скорости описывается выражением (1):

$$r_{Hц}(t) = R_{Hц} + (V_H + V_{tgц}) \cos(\theta_H + \theta_{ц})t + V_{rc}t + \frac{((V_H + V_{tgц}) \sin(\theta_H + \theta_{ц})t)^2}{2R_{Hц}} + nR(t), \quad (1)$$

где $nR(t)$ – случайные возмущения траектории носителя относительно прямолинейного движения.

Приращение расстояния, определяемое (1), описывает закон фазовой модуляции, возникающей в комплексной огибающей траекторного сигнала при синтезировании апертуры.

Как видно из (1), движение наблюдаемой наземной цели приводит к появлению дополнительных линейного и квадратичного приращений дальности по сравнению с изменением расстояния до неподвижной цели.

Для обеспечения заданных показателей разрешающей способности по азимуту требуется компенсировать набег фазы траекторного сигнала и когерентно суммировать отсчеты полученного сигнала. Реализовать когерентное накопление можно за счёт свёртки траекторного сигнала и опорной функции вида:

$$h_{оп}(t) = \exp\left(-j2W\left(V_H \cos(\theta_H)t + \frac{(V_H \sin(\theta_H)t)^2}{2R_H}\right)\right), \quad (2)$$

где W – волновое число.

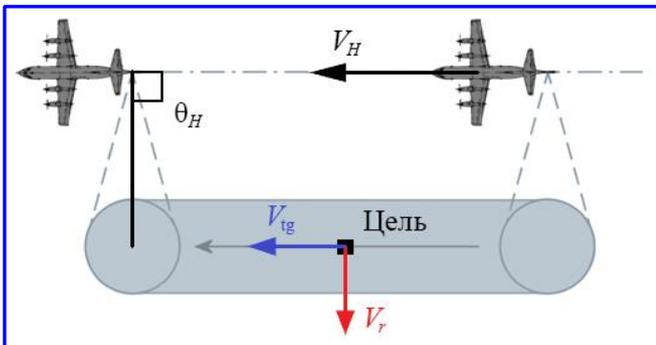


Рис. 1. Иллюстрация рассматриваемой ситуации

В случае наличия у наблюдаемой НДЦ радиальной составляющей вектора скорости отметка НДЦ на РЛИ приобретёт сдвиг по азимуту, величина которого пропорциональна радиальной скорости [1].

Предположим, что с целью оценки радиальной скорости НДЦ в рассматриваемой РЛС используется моноимпульсный метод СДЦ. Он основан на измерении истинного углового положения цели с помощью направленных свойств реальной антенны за счёт реализации суммарно-разностной моноимпульсной угломерной системы в азимутальной плоскости. Наблюдаемое положение цели определяется по её отклику на сформированном РЛИ, по разнице угловых положений наблюдаемой отметки и истинной $\Delta\hat{\Theta}$ оценивается радиальная скорость цели [1]:

$$\hat{V}_r = -V_H \sin(\theta_H) \Delta\hat{\Theta}. \quad (3)$$

Полученная оценка радиальной скорости даёт возможность скорректировать положение отметки НДЦ на сформированном РЛИ.

Перейдём к оценке тангенциальной составляющей скорости. Известный алгоритм, описанный в [6 – 8], заключается в разбиении траекторного сигнала в канале дальности цели на две подапертуры. Далее сигнал одной из подапертур инвертируется во времени и перемножается с другой. По смещению максимума спектральной плотности произведения подапертур Δf можно оценить тангенциальную составляющую скорости НДЦ:

$$\hat{V}_{tg} = -\frac{\lambda R_H \Delta f}{2V_H T_c}, \quad (4)$$

где λ – длина волны; T_c – время синтезирования; Δf – смещение максимума спектральной плотности произведения сигналов подапертур.

Алгоритм, описанный выше, основывается на фазоразностной автофокусировке РЛИ, используемой для повышения их качества в условиях недостаточной точности оценки параметров движения носителя навигационными датчиками летательного аппарата (ЛА) [1].

Аналогичными возможностями по дофокусировке РЛИ обладает алгоритм на основе оценки средней доплеровской частоты (СДЧ) траекторного сигнала. Схема предлагаемого алгоритма показана на рис. 2. Покажем возможность его использования для решения задачи оценки тангенциальной скорости НДЦ.

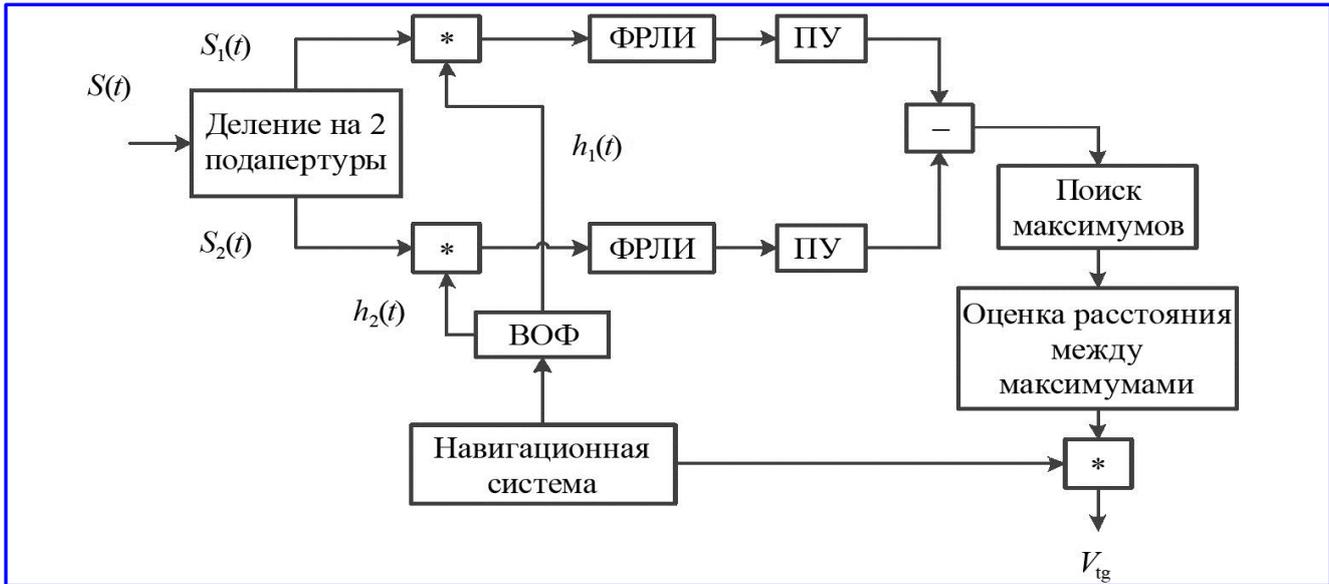


Рис. 2. Схема предлагаемого алгоритма оценки тангенциальной скорости наземных движущихся целей

Алгоритм оценки тангенциальной скорости НДЦ, основанный на алгоритме оценки СДЧ отражённого сигнала, подразумевает разбиение сигнала на две подапертуры. Исходная опорная функция, рассчитываемая вычислителем опорной функции (ВОФ) по данным навигационных систем ЛА, разбивается на две части аналогичным образом, после чего обе перемножаются с входными сигналами. В блоках формирования РЛИ (ФРЛИ) осуществляется накопление результатов перемножения опорных функций и входных сигналов, после чего вычисляются модули накопленных значений отсчётов РЛИ. Пороговые устройства (ПУ) осуществляют сравнение всех отсчётов РЛИ с порогом, выделяя только отсчёты, которые его превышают. Далее производится поэлементное вычитание РЛИ, полученных по двум подапертурам. Возможность подавления сигналов неподвижных отражателей основана на том, что отметки неподвижных объектов на обоих РЛИ совпадут. Если же цель имеет тангенциальную составляющую скорости, отметки на двух РЛИ будут смещены вследствие наличия набега фазы отражённых сигналов. Комплексные амплитуды отсчётов РЛИ, сформированных по двум подапертурам, соответствующие отметке движущейся цели, будут определяться как:

$$\dot{S}_{\text{ДЦ1}} = \int_{-\frac{T_c}{2}}^0 \exp \left(jW \left[\frac{V_{\text{тгр}} \cos(\theta_H + \Delta\theta_1)t + V_n \sin(\theta_H + \Delta\theta_1)t +}{\left(2V_{\text{тгр}}V_H + V_w^2 \right) (\sin(\theta_H + \Delta\theta_1)t)^2} + \frac{2R_{\text{нл}}}{2R_{\text{нл}}} \right] \right) dt; \quad (5)$$

$$\dot{S}_{\text{ДЦ2}} = \int_0^{\frac{T_c}{2}} \exp \left(jW \left[\frac{V_{\text{тгр}} \cos(\theta_H + \Delta\theta_2)t + V_n \sin(\theta_H + \Delta\theta_2)t +}{\left(2V_{\text{тгр}}V_H + V_w^2 \right) (\sin(\theta_H + \Delta\theta_2)t)^2} + \frac{2R_{\text{нл}}}{2R_{\text{нл}}} \right] \right) dt. \quad (6)$$

При поэлементном вычитании сформированных на разных подапертурах изображений отметки неподвижных объектов будут скомпенсированы, при наличии на зондируемом участке поверхности цели, движущейся с тангенциальной скоростью, получим от неё две отметки, сдвиг между которыми пропорционален тангенциальной составляющей скорости цели. Далее необходимо определить расстояние между отметками и по известным условиям наблюдения и определить оценочное значение тангенциальной скорости НДЦ по соотношению:

$$\hat{V}_{\text{тг}} = \Delta\hat{\Theta}_{\text{ас}} \frac{R_{\text{нл}}}{T_c} \cos(2\Delta\theta_H). \quad (7)$$

Оценка эффективности предложенного алгоритма

Подтвердим приведённые выше рассуждения результатами математического моделирования. Моделируемая обстановка описывается следующим образом: носитель РСА движется прямолинейно, наклонная дальность до центра кадра составляет $R_n = 10$ км, угол наблюдения в азимутальной плоскости $\theta_n = 90^\circ$, скорость носителя составляет $V_n = 200$ м/с.

Шум приемника является белым гауссовским, отношение сигнал/шум (ОСШ) равно 25 дБ. Отношение сигнал/фон (ОСФ) – 10 дБ. Для зондирования используется последовательность прямоугольных импульсов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Длительность импульса $t_{\text{имп}} = 2$ мкс, период повторения импульсов $T_n = 1$ мс, время синтеза $T_c = 0,75$ с, что обеспечивает разрешение по азимуту 1 м. Длина волны зондирующего сигнала $\lambda = 3$ см, девиация частоты $f_{\text{дев}} = 50$ МГц.

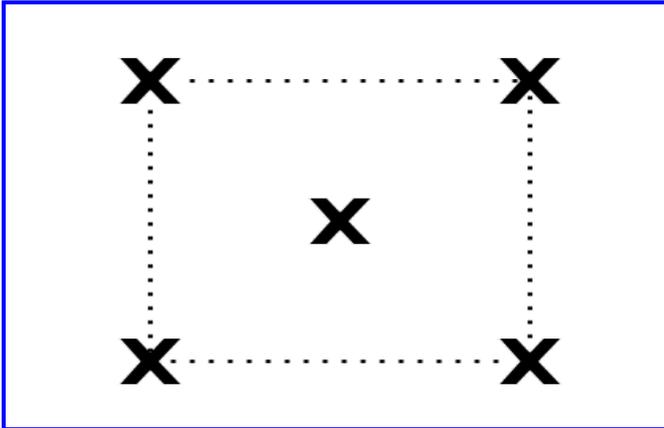


Рис. 3. Расположение целей в моделируемом кадре

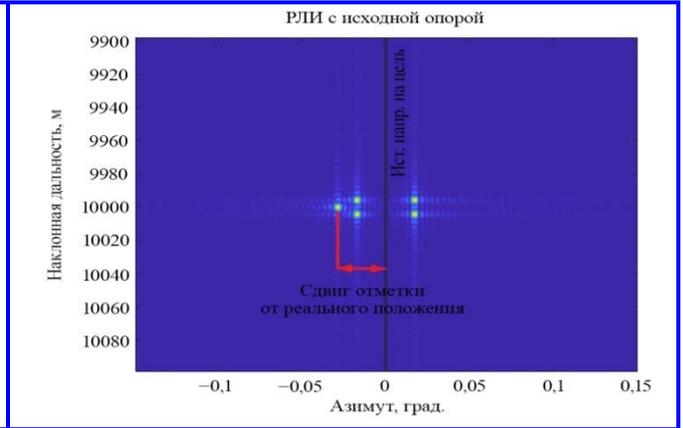


Рис. 4. Иллюстрация к моноимпульсному методу измерения радиальной скорости цели

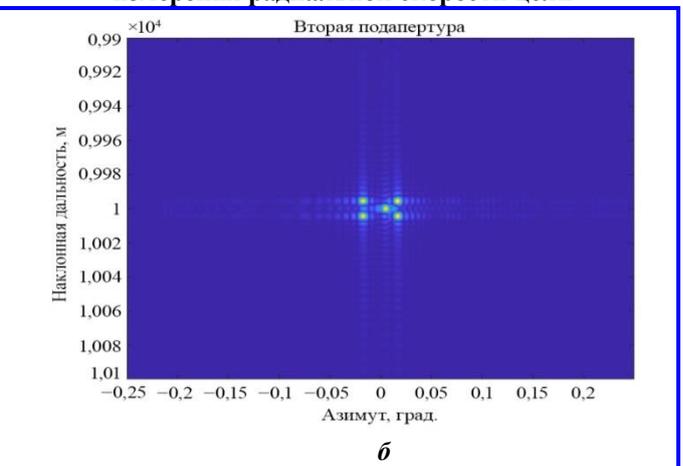
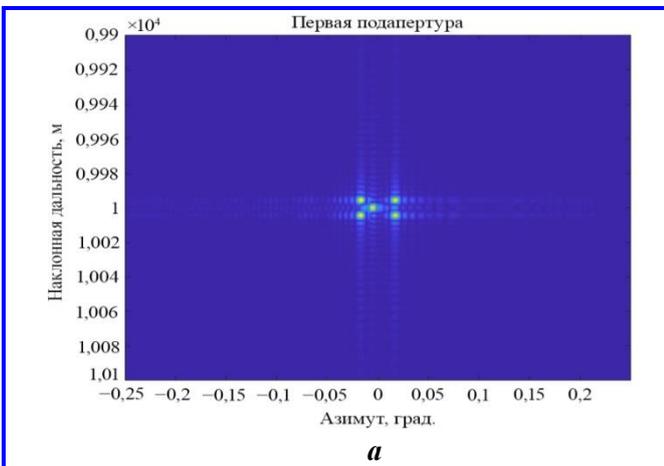


Рис. 5. Радиолокационное изображение по левой (а) и правой (б) подапертурам

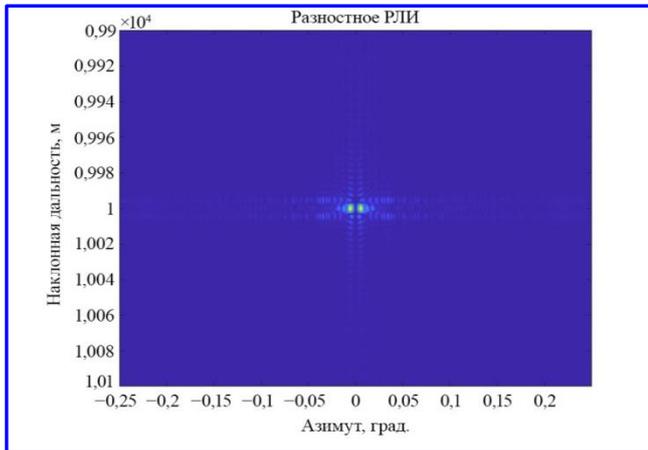


Рис. 6. Разностное радиолокационное изображение

Для начала сформируем следующую сцену зондируемого кадра местности, как показано на рис. 3. Расположенные по углам квадрата точечные отражатели являются неподвижными, расстояние между ними равно 6 метров. Цель в центре является точечным подвижным объектом, её скорость задаётся тангенциальной и радиальной составляющими.

На первом этапе моделирования, исходя из выбранной сцены и геометрии наблюдения формируется отражённый сигнал, на основе анализа которого будет решаться задача СНДЦ. Далее реализация отражённого сигнала сжимается по дальности и азимуту с формированием амплитудного РЛИ. На рис. 4 показано сформированное РЛИ при радиальной скорости НДЦ 0,5 м/с.

Радиальная составляющая скорости цели оценивается по сдвигу между угловым положением отметки НДЦ на сформированном РЛИ и её угловой координатой, оцененной моноимпульсным измерителем. После оценки радиальной скорости проводится процедура коррекции положения её отметки на сформированном РЛИ.

Далее проводится оценка тангенциальной скорости цели. Рис. 5, а и б, иллюстрируют РЛИ, полученные по двум подапертурам сигнала. Как видно из приведённых РЛИ, отметка цели смещается влево и вправо на разных подапертурах относительно своего исходного положения. С помощью некогерентного вычитания по сдвигу откликов цели с двух подапертур на разностном РЛИ вычисляется тангенциальная составляющая скорости (рис. 6).

При необходимости, опорная функция может быть скорректирована с учетом полученной оценки тангенциальной скорости, что позволит получить сфокусированное изображение движущейся цели. Далее на исходное РЛИ можно наложить скорректированную отметку цели и вывести формуляр с оцененными значениями параметров её движения.

На рис. 7, *a – z* изображён случай, когда все цели неподвижны.

Далее представлен рис. 8, на котором центральная цель имеет составляющие скорости $V_R = 0,1$ м/с и $V_{tg} = 5$ м/с.

Как уже говорилось ранее, радиальная скорость цели оценивается по сдвигу между отметкой на РЛИ и реальным положением цели. Сдвиг составил $-0,0269$ град., а рассчитанная $V_{расч} = 0,094$ м/с (величина заданной радиальной скорости составляет $0,1$ м/с).

Рассчитанная радиальная составляющая используется для компенсации постоянного частотного сдвига в опорной функции. РЛИ, полученная по скорректированной опорной функции, показано на рис. 9.

Видно, что после компенсации постоянного частотного сдвига отметка от цели практически совпадает с реальным положением. Оставшееся отклонение вызвано погрешностями вычисления радиальной составляющей скорости.

После устранения смещения отклика цели относительно истинного положения производится оценка тангенциальной скорости методом на основе СДЧ или на основе фазоразностного метода.

Результаты оценки тангенциальной составляющей скорости (при $V_r = 0$) методом на основе СДЧ приведены на рис. 10.

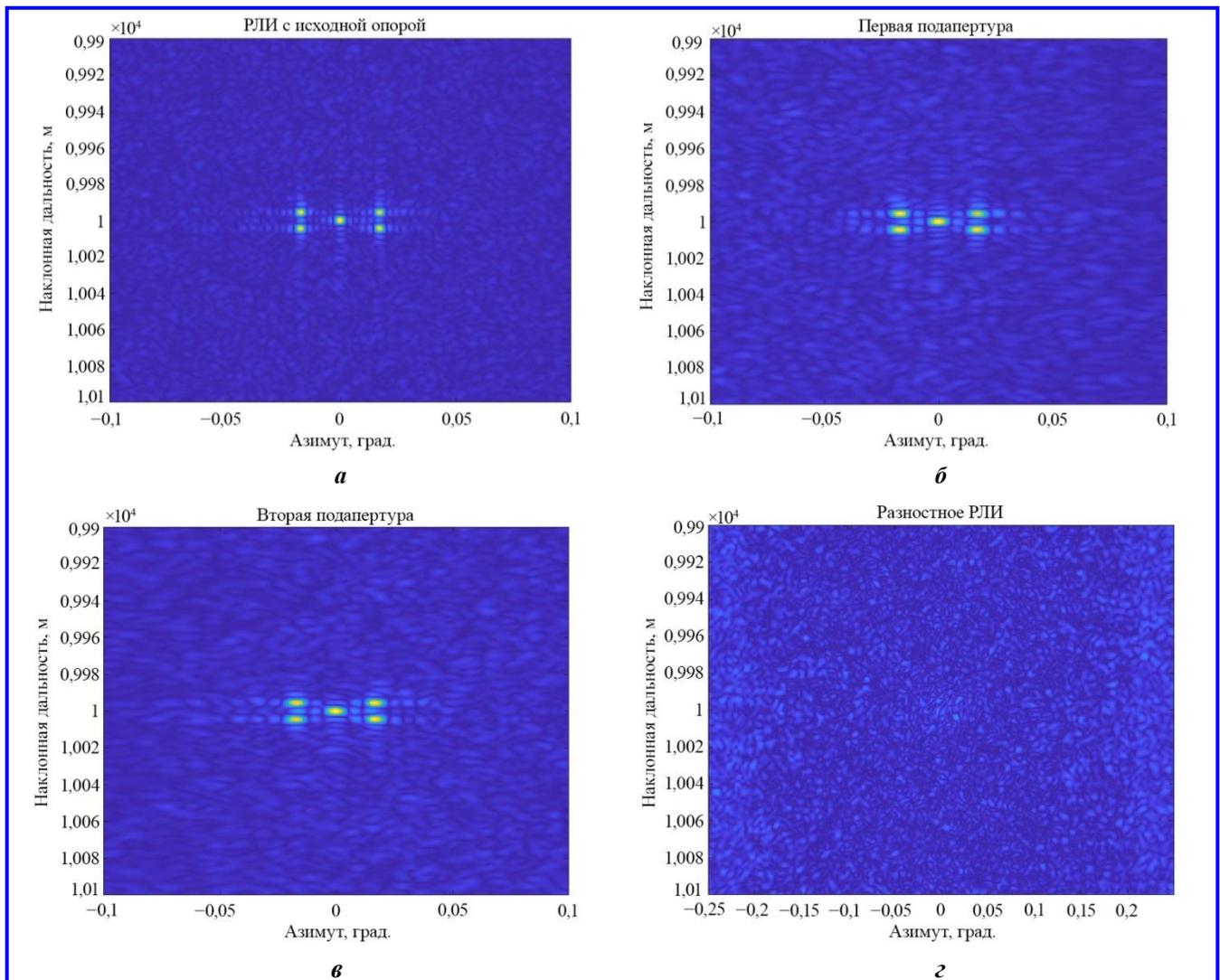


Рис. 7. Радиолокационные изображения неподвижных целей: *a* – по полной апертуре; *б, в* – по первой и второй подапертурам; *г* – разностное

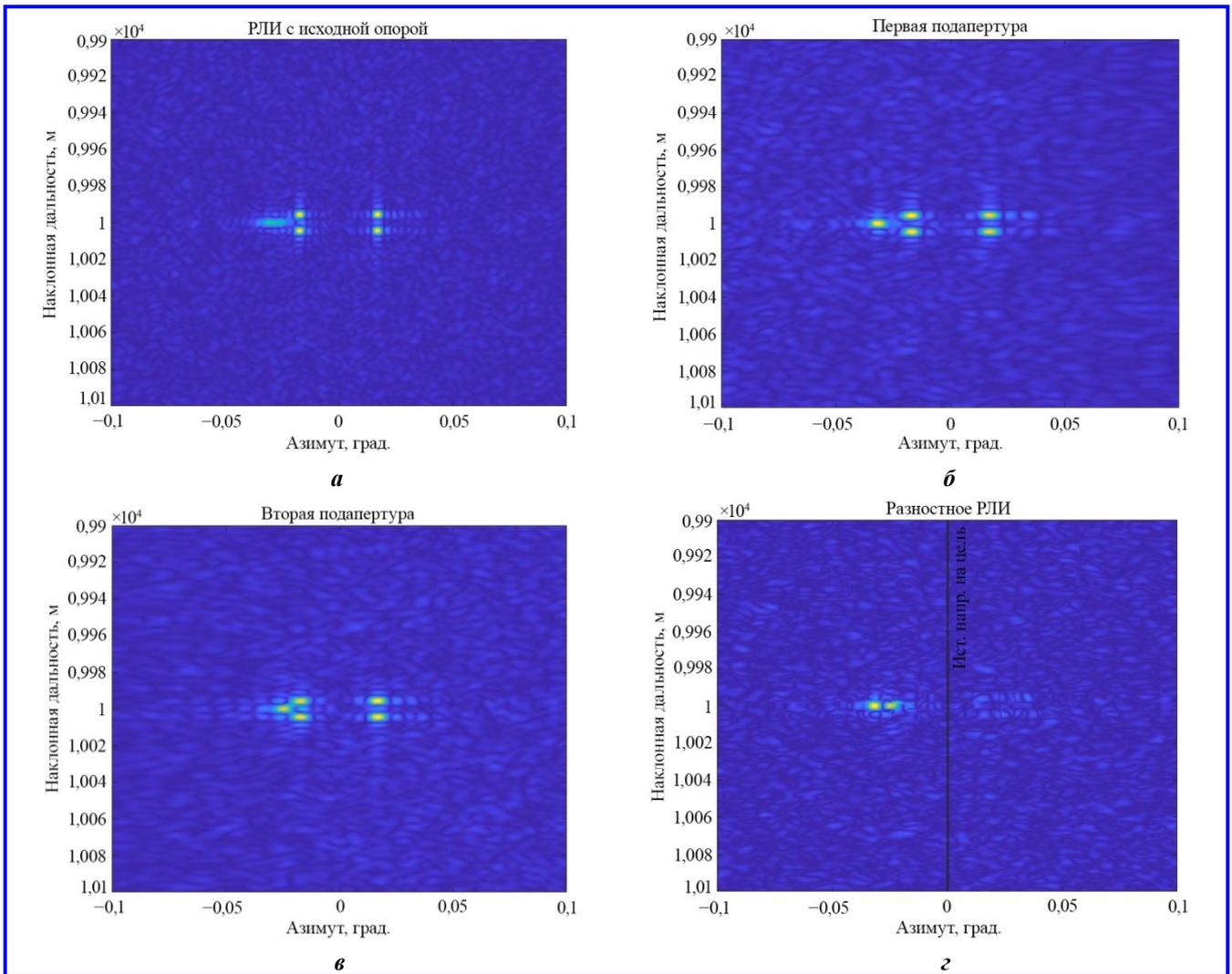


Рис. 8. Радиолокационные изображения неподвижных и движущихся целей: *а* – по полной апертуре; *б, в* – по первой и второй подапертурам; *г* – разностное

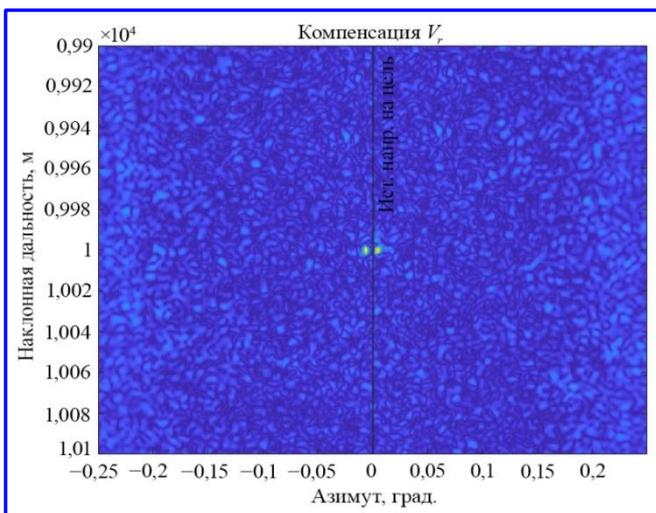


Рис. 9. Радиолокационное изображение со скорректированной опорной функцией

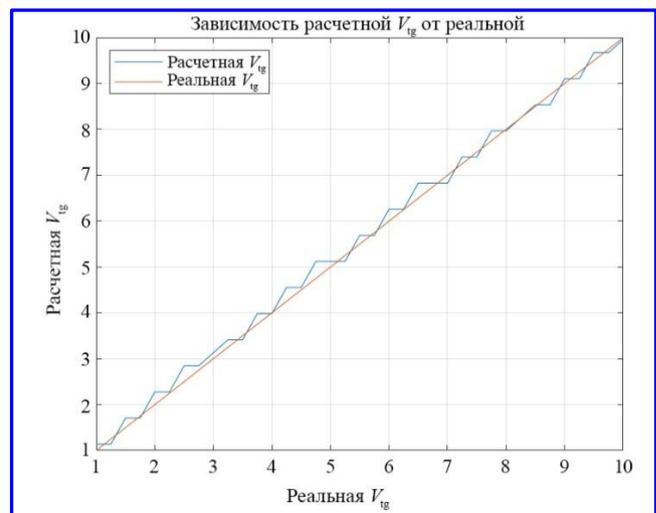


Рис. 10. Зависимость расчетной V_{tg} от реальной

Оценка точностных характеристик рассматриваемого алгоритма

На РЛИ, сцена которого содержала движущуюся цель, видно, что отклик движущейся цели сдвинулся левее по азимуту и стал «размытым» в азимутальном направлении. Смещение отметки обусловлено наличием нескомпенсированного постоянного частотного сдвига, который вызван наличием радиальной составляющей скорости цели. Расфокусировка объясняется наличием нескомпенсированного набега фаз, вызванного тангенциальной составляющей скорости цели. При разделении на подапертуры расфокусировка отклика подвижной цели уменьшается, так как из-за уменьшения времени накопления уменьшается и фазовый набег, который возникает вследствие линейного изменения частоты (квадратичного изменения фазы) за время накопления. Отклики подвижной цели на двух подапертурах сдвинуты друг относительно друга, а отклики неподвижных целей совпадают. Таким образом, при вычитании РЛИ, полученных с двух подапертур, отклики неподвижных целей компенсировались. Оставшиеся два отклика принадлежат одной цели. Их смещение друг относительно друга пропорционально тангенциальной скорости цели, а общий сдвиг относительно реального положения – радиальной скорости цели.

Оценим далее точностные характеристики предлагаемого алгоритма СНДЦ.

На рис. 11 представлена зависимость оценки радиальной составляющей вектора скорости от реальной при отсутствии у цели тангенциальной компоненты вектора скорости. При нулевом значении тангенциальной составляющей скорости становится невозможно оценить значение скорости при относительно малых значениях радиальной составляющей

(от 0 до 0,15 м/с). Это связано с тем, что сдвиг между двумя откликами на двух подапертурах недостаточно велик, то есть при вычитании одного РЛИ из другого два отклика просто взаимокompенсированы. При величине радиальной скорости более 1,3 м/с отметка на РЛИ из-за наличия нескомпенсированного постоянного частотного сдвига уходит за пределы кадра, следовательно, измерить радиальную составляющую без дополнительной обработки становится невозможно. В диапазоне от 0,15 до 1,3 м/с алгоритм при заданных условиях успешно выполняет измерения, ошибка оценки радиальной составляющей не превышает 0,018 м/с.

Рассмотрим точностные характеристики оценки тангенциальной скорости на основе фазоразностного метода фокусировки. Зависимость оценки тангенциальной составляющей от реальной изображена на рис. 12. Видно, что в диапазоне от 0 до 5,5 м/с алгоритм способен измерить тангенциальную составляющую. Погрешность оценки не превышает 0,17 м/с.

Рассмотрим зависимость оценки радиальной скорости от её смоделированного значения при величине тангенциальной скорости 5,5 м/с, которая приведена на рис. 13. В этом случае алгоритм может оценить в том числе и малые значения скорости, так как сдвиг между откликами на двух подапертурах увеличивается за счет тангенциальной составляющей вектора скорости целей. Погрешность измерения не превышает 0,04 м/с. Увеличение ошибки оценки тангенциальной скорости цели связано с тем, что наличие тангенциальной составляющей вносит нескомпенсированный квадратичный набег фаз, из-за которого возникает расфокусировка отклика, а, следовательно, точность оценки положения максимума уменьшается.

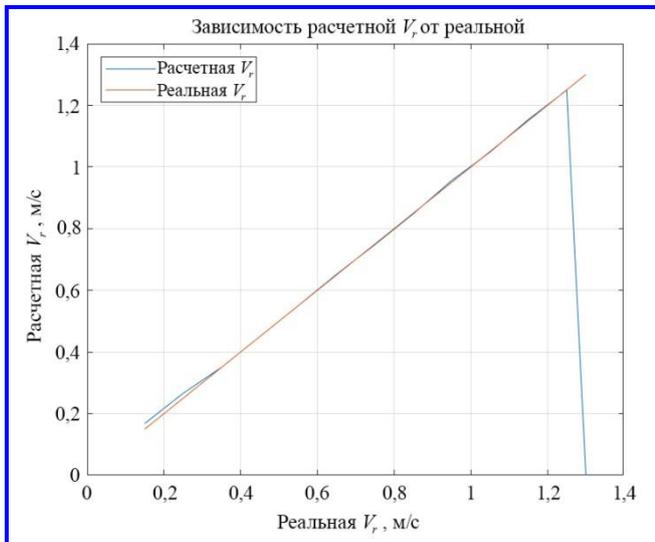


Рис. 11. Зависимость расчетной V_r от реальной при $V_{tg} = 0$ м/с

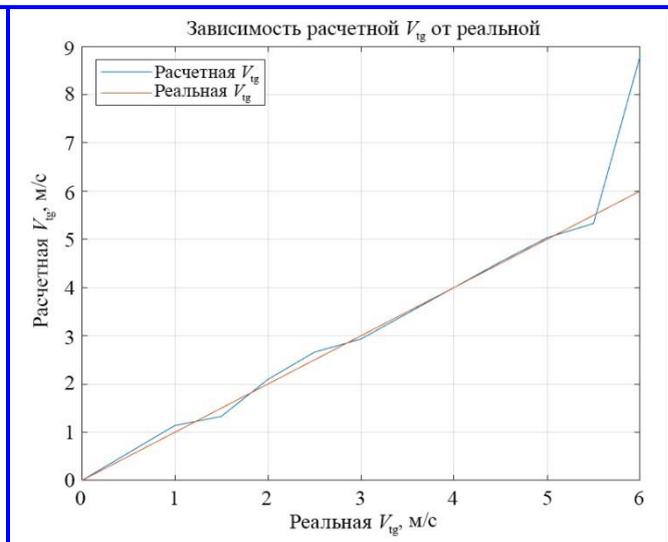


Рис. 12. Зависимость расчетной V_{tg} от реальной

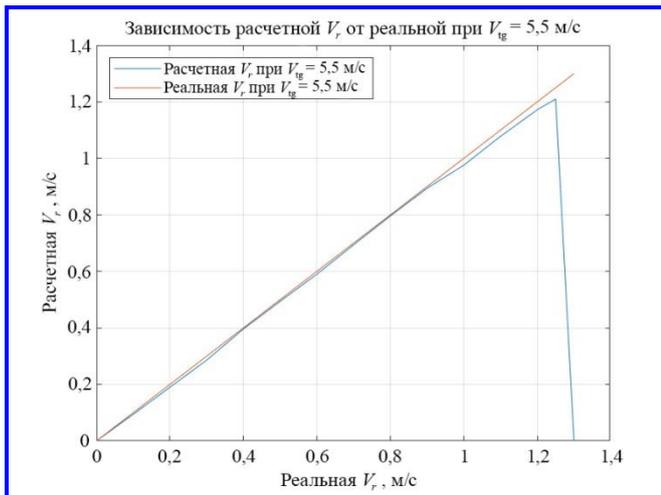


Рис. 13. Зависимость расчетной V_r от реальной при $V_{tg} = 5,5$ м/с

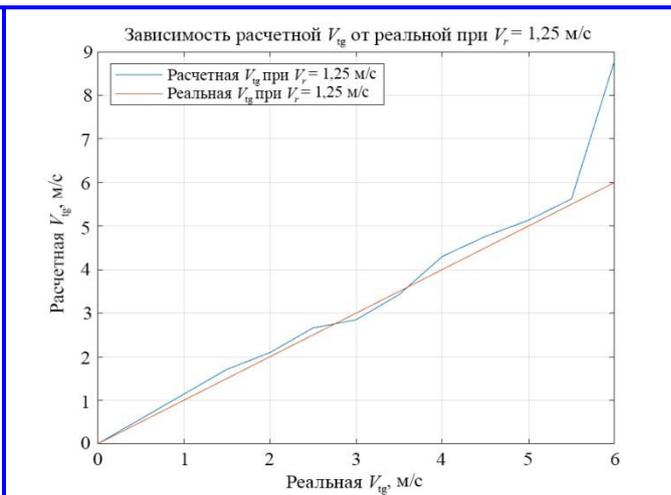


Рис. 14. Зависимость расчетной V_{tg} от реальной при $V_r = 1,25$ м/с

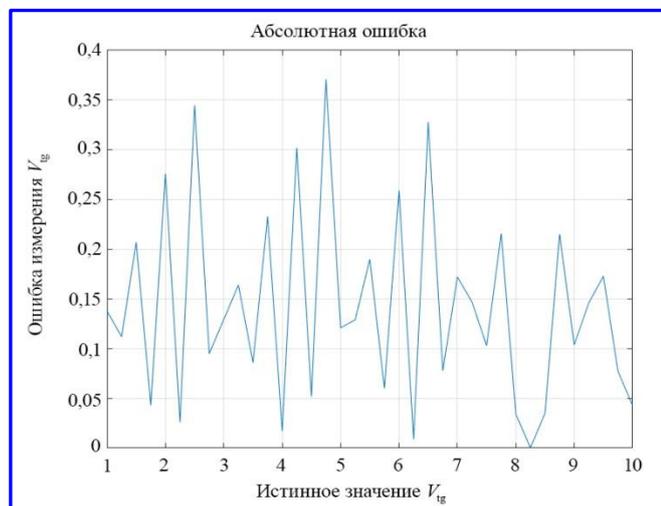


Рис. 15. Зависимость абсолютной ошибки оценки тангенциальной скорости от значения тангенциальной скорости

При наличии радиальной составляющей, равной 1,25 м/с, алгоритм способен оценить тангенциальную скорость в диапазоне от 0 до 5,5 м/с (рис. 14). При дальнейшем увеличении величины тангенциальной скорости её однозначная оценка становится невозможной из-за появления второго пика в спектре произведения сигналов двух подапертур.

При использовании алгоритма оценки тангенциальной скорости на основе СДЧ получены точностные показатели, представленные на рис. 15.

Из приведенного графика видно, что абсолютная ошибка определения тангенциальной скорости НДЦ не превышает 0,37 м/с.

Достаточно высокие точности оценок составляющих вектора скорости НДЦ объясняются отсутствием в модели возмущающих воздействий (тра-

екторных нестабильностей), а также точным характером наблюдаемых целей. Для реальных объектов, имеющих размеры до 10 метров, точность оценки будет существенно хуже.

Заключение

Приведённые в статье результаты позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Предложенный способ оценки составляющих вектора скорости НДЦ при измерении радиальной скорости опирается на моноимпульсный алгоритм, при измерении тангенциальной компоненты – на алгоритм, базой которого является автофокусировка отражённого сигнала на основе СДЧ.

2. Предложенный алгоритм оценки тангенциальной скорости НДЦ предполагает разбиение сигнала на две подапертуры с формированием двух РЛИ и их последующим вычитанием, что даёт возможность отсеleccionировать отметку НДЦ от неподвижного фона.

3. При тангенциальной скорости цели выше 5,5 м/с, при ее оценке алгоритмом на основе фазоразностного метода, в спектре произведения двух подапертур появляются дополнительные пики, которые не позволяют однозначно определить тангенциальную составляющую скорости цели. Из-за этого определить истинное положение наземной движущейся цели и ее скорость становится невозможно.

4. Оценка тангенциальной скорости алгоритмом на основе СДЧ позволяет расширить диапазон оцениваемых скоростей при ухудшении точностных характеристик.

В озвученных пределах применяемая комбинация методов СНДЦ позволяет оценить путевую скорость движения целей.

Литература

1. Авиационные системы радиовидения: монография / В. Н. Антипов, А. Ю. Викентьев, Е. Е. Колтышев [и др.]; под ред. Г. С. Кондратенкова. – Москва : Радиотехника, 2015. – 648 с.
2. Zhang, S. Ground Moving Target Indication for the Geosynchronous-Low Earth orbit Bi-Static Multi-channel SAR System / S. Zhang, Y. Gao, R. Guo // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – May 2021. – Vol. 14. – P. 5072–5090. – DOI : 10.1109/JSTARS.2021.3077003.
3. Горячкин, О. В. Характеристики обнаружения и особенности обработки сигналов воздушных объектов на радиолокационных изображениях космических радиолокаторов с синтезированной апертурой / О. В. Горячкин, А. В. Борисенков, А. С. Лифанов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – Самара, 2022. – Т. 25. – № 4. – С. 79–87.
4. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс; пер. с англ. – Изд. 3-е, исправ. и допол. : – Москва : Техносфера, 2012. – 1104 с.
5. Kirscht, M. Detection and focused imaging of moving objects evaluating a sequence of single-look SAR images / M. Kirscht // International Geoscience and Remote Sensing Symposium – IGARSS'96 (Lincoln, NE, USA, 31 May 1996). – IEEE, 2002. – DOI : 10.1109/IGARSS.1996.516331. – URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/516331>.
6. Когерентная селекция наземных движущихся целей при вращении фазовых центров реальных антенн / Б. Г. Татарский, Д. А. Ясенцев, Е. В. Майстренко [и др.] // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2016. – Т. 14. – № 3. – С. 23–28.
7. Ясенцев, Д. А. Оценка тангенциальной составляющей вектора скорости наземной движущейся цели в РСА при поступательном движении фазового центра реальной антенны / Д. А. Ясенцев, А. Д. Кучмий // 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика»: сборник тезисов докладов конференции. – Москва : Издательство «Перо», 2020. – С. 363–365.
8. Кучмий, А. Д. Селекция наземных движущихся целей по тангенциальной скорости в РСА / А. Д. Кучмий, Д. А. Ясенцев // XLVII Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения – 2021»: Сборник тезисов работ XLVII международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения – 2021» (Москва, 20 – 23 апреля 2021 года). – Москва : Издательство «Перо», 2021. – С. 546.

Поступила в редакцию 03.06.2024

Артём Дмитриевич Кучмий, аспирант кафедры 410, начальник сектора, т. +7 (980) 735-71-46, e-mail: artem.kuchmy@yandex.ru. (МАИ (НИУ); АО «НПП «Исток» им. Шокина»).

Игорь Денисович Шалаяев, инженер, т. +7 (925) 512-97-84, e-mail: igor.shalyaev@mail.ru. (АО «НПП «Исток» им. Шокина»).

Дмитрий Александрович Ясенцев, доктор технических наук, профессор кафедры 410, старший научный сотрудник, т. +7 (926) 623-53-57, e-mail: yasentsev@yandex.ru. (МАИ (НИУ); АО «НПП «Исток» им. Шокина»).

ESTIMATION OF THE COMPONENTS OF THE VELOCITY VECTOR OF GROUND MOVING TARGETS IN SYNTHETIC APERTURE RADAR

A. D. Kuchmy, I. D. Shalyaev, D. A. Yasentsev

In parallel with the development of systems and means of highly detailed mapping of the underlying surface, methods of selection (detection) of ground moving targets were also improved. A drastic improvement in the characteristics of airborne radar systems (radars) in terms of resolution occurred after the introduction of mapping modes with the synthesis of artificial antenna aperture. The appearance of radars with synthesized artificial antenna aperture made it possible to detect moving targets against the background of reflections from the underlying surface, which made it possible to further implement ground moving targets indication algorithms for detecting low-speed moving ground objects. The proposed algorithm can be used to increase the informativeness of radar images, clarify the true position of targets and roughly estimate their trajectory.

Key words: radial velocity, synthetic aperture radar, ground moving target indication, tangential velocity.

References

1. Aviation radio vision systems: monograph / V. N. Antipov, A. Y. Vikentiev, E. E. Koltyshev [et al.]; edited by G. S. Kondratenkov. – Moscow : Radio Engineering, 2015. – 648 p.
2. Zhang, S. Ground Moving Target Indication for the Geosynchronous-Low Earth orbit Bi-Static Multi-channel SAR System / S. Zhang, Y. Gao, R. Guo // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – May 2021. – Vol. 14. – P. 5072–5090. – DOI : 10.1109/JSTARS.2021.3077003.
3. Goryachkin, O. V. Characteristics of detection and processing of signals of aerial objects on radar images of space radars with synthesized aperture / O. V. Goryachkin, A.V. Borisenkov, A. S. Lifanov // Physics of wave processes and radio engineering systems. – Samara, 2022. – Vol. 25. – No. 4. – P. 79–87.

4. Gonzalez, R. Digital image processing / R. Gonzalez, R. Woods; translated from English Ed. – 3rd, revised. and additional. – Moscow : Technosphere, 2012. – 1104 p.
5. Kirscht, M. Detection and focused imaging of moving objects evaluating a sequence of single-look SAR images / M. Kirscht // International Geoscience and Remote Sensing Symposium – IGARSS'96 (Lincoln, NE, USA, 31 May 1996). – IEEE, 2002. – DOI : 10.1109/IGARSS.1996.516331. – URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/516331>.
6. Coherent selection of ground-based moving targets during rotation of phase centers of real antennas / B. G. Tatarsky, D. A. Yasentsev, E. V. Maistrenko [et al.] // Information measuring and control systems. – 2016. – Vol. 14. – No. 3. – P. 23–28.
7. Yasentsev, D. A. Estimation of the tangential component of the velocity vector of a ground-based moving target in the radar with the translational motion of the phase center of a real antenna / D. A. Yasentsev, A.D. Kuchmiy // 19th International Conference «Aviation and Cosmonautics»: collection of abstracts of the conference reports. – Moscow : Pero Publishing House, 2020. – P. 363–365.
8. Kuchmiy, A. D. Selection of terrestrial moving targets by tangential velocity in the RSA / A. D. Kuchmiy, D. A. Yasentsev // XLVII International Youth Scientific Conference «Gagarin Readings – 2021»: Collection of abstracts of the XLVII International Youth Scientific Conference «Gagarin Readings – 2021» (Moscow, April 20 – 23, 2021). – Moscow : Publishing House «Pero», 2021. – P. 546.

*Artyom Dmitrievich Kuchmiy, postgraduate student of Department 410, head of the sector,
t. +7 (980) 735-71-46, e-mail: artem.kuchmy@yandex.ru.*

(MAI (National Research University); JSC «RPC «ISTOK» named after Shokin»).

Igor Denisovich Shalyaev, engineer, t. +7 (925) 512-97-84, e-mail: igor.shalyaev@mail.ru.

(JSC «RPC «ISTOK» named after Shokin»).

*Dmitry Alexandrovich Yasentsev, Doctor of Technical Sciences, Professor of Department 410, Senior Researcher,
t. +7 (926) 623-53-57, e-mail: yasentsev@yandex.ru.*

(MAI (National Research University); JSC «RPC «ISTOK» named after Shokin»).