



АЛГОРИТМ РАЗРЕШЕНИЯ ФАЗОВОЙ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ПРИ ОЦЕНКЕ ПАРАМЕТРОВ НАЗЕМНЫХ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ

В.Г. Степин¹, М.И. Бабокин^{1,2}, П.Е. Шимкин¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Россия, Москва, ул. Красноказарменная 14

²АО «АЭРОКОН»,
140181, Россия, Жуковский, ул. Жуковского 1

Статья поступила в редакцию 28 ноября 2024 г.

Аннотация. Рассмотрены схема организации и основные характеристики аэрокосмического РСА-интерферометра при дистанционном зондировании земной поверхности, работающего в телескопическом режиме. Предложен алгоритм разрешения фазовой неоднозначности при оценке радиальной и тангенциальной скоростей наземных движущихся объектов. Проверена работоспособность данного метода путём имитационного моделирования в среде MATLAB. Показана возможность использования предлагаемого способа разрешения неоднозначности совместно с многомерной разностно-фазовой обработкой при оценке параметров движущихся объектов. Приведены экспериментальные результаты по обнаружению и оценке скорости движущихся объектов, при совместном применении интерферометрической обработки и алгоритма разрешения фазовой неоднозначности для радиоголограмм, зарегистрированных на авиационном носителе и принятых по двум пространственным каналам.

Ключевые слова: синтезирование апертуры антенны, однопроходный интерферометр, имитационное моделирование, интерферометрическая обработка, движущийся объект, фазовая неоднозначность.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00507, <https://rscf.ru/project/24-29-00507/>

Автор для переписки: Степин Виталий Григорьевич, vitalii.stepin@mail.ru

Введение

В настоящее время одной из важных задач радиолокационного мониторинга земной поверхности является обнаружение движущихся объектов в широком диапазоне скоростей [1,2]. Данную задачу можно решить посредством применения радиолокационного аэрокосмического интерферометра [3,4]. Применение только широко известного фазового метода для оценки скоростных параметров наблюдаемых объектов даёт точное решение, однако существует проблема однозначности получаемых в данном процессе измерений.

Цель данной работы заключается в разработке алгоритма разрешения фазовой неоднозначности при оценке скоростных параметров наземных движущихся объектов в широком диапазоне допустимых скоростей.

1. Модель организации РСА-интерферометра

Для решения задачи восстановления полного вектора движения наземного объекта, рассмотрим изменение ракурса наблюдения во времени с помощью многоканального мультивременного интерферометра. Для большинства задач, достаточной реализацией этого способа можно считать двухканальный двухсеансный РСА-интерферометр, схема организации которого изображена на рисунке 1.

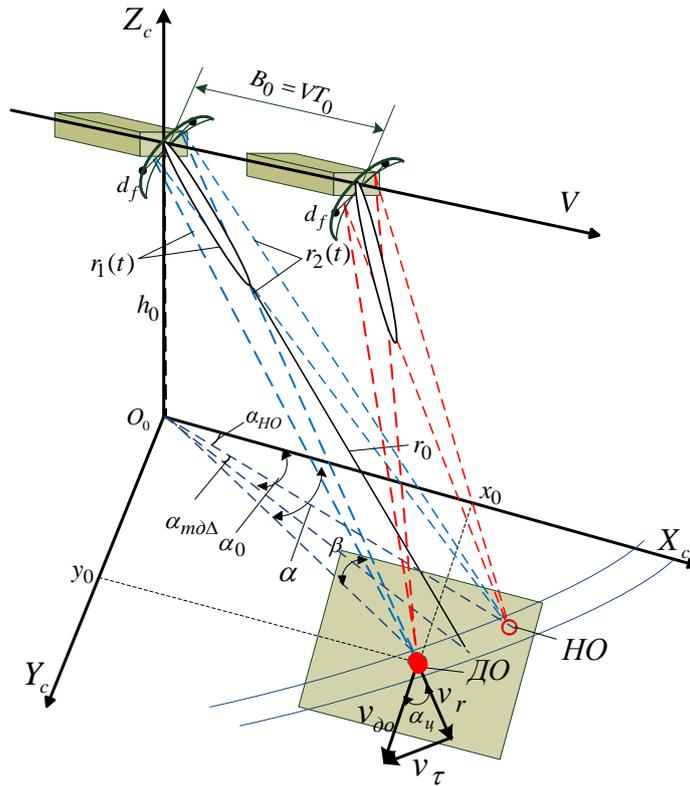


Рис. 1. Схема организации однопроходного двухсеансного РСА-интерферометра.

Облучение земной поверхности осуществляется когерентной электромагнитной волной с длиной волны λ всем плотном антенной решётки, а приём реализован по двум пространственным каналам. В процессе прямолинейного полёта носителя комплекса РСА со скоростью V формируются два сеанса через интервал времени T_0 .

Используя данную схему, появляется возможность варьировать величину базы B_0 , что необходимо для вскрытия неоднозначности фазовых измерений.

Как известно [5-7], сигнал от движущегося объекта (ДО) смещается по азимуту (на частоту Доплера) и квадратичное отклонение дальности будет отличаться от изменения дальности до неподвижного объекта (НО). Данный эффект можно выразить через изменение фазы, с учётом принятия $\cos(\beta) \approx 1$ (1):

$$\begin{aligned} \delta\phi_{do}(t) &\approx \frac{4\pi V^2}{\lambda r_0} \left(\sin(\alpha_{do})^2 - \sin(\alpha_{no})^2 \right) \frac{t^2}{2} + \frac{2\pi V \sin(\alpha_0) v_\tau t^2}{\lambda r_0} \approx \\ &\approx \frac{4\pi V_\tau v_{rdo}}{\lambda r_0} \cos(\alpha_{no}) t^2 + \frac{2\pi V_\tau v_{\tau do} t^2}{\lambda r_0} \approx \frac{2\pi V_\tau t^2}{\lambda r_0} \left[2v_{rdo} \cos(\alpha_{no}) + v_{\tau do} \right], \end{aligned} \quad (1)$$

где V – скорость носителя РСА; R_0 – наклонная дальность; $\alpha_{\partial o}$ – положение ДО по азимуту; α_{ho} – положение НО по азимуту; $v_{r\partial o}$ – радиальная скорость ДО; $v_{\tau\partial o}$ – тангенциальная скорость ДО.

Оценку разности фаз в предложенной организации интерферометра можно определить в соответствии с алгоритмом оценивания многопозиционной РСА, используя квазиоптимальный алгоритм по критерию минимума среднеквадратичного отклонения [8,9]. Оценка $\delta\hat{\phi}_{\partial o}(t)$ в случае двухсеансного РСА-интерферометра выглядит следующим образом (2):

$$\begin{aligned} \delta\hat{\phi}_{\partial o}(T_0) &\approx \\ &\approx \arg \left(\int_0^{T_c} \xi_1(t) \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} r_{m1}(t) \right) dt \int_0^{T_c} \xi_1^*(t+T_0) \exp \left(j \frac{4\pi}{\lambda} r_{m1}(t+T_0) \right) dt \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\xi_1(t) = s_1(t) + n_1(t)$ – принятый радиолокационный сигнал, представляющий собой аддитивную смесь отражённого сигнала $s(t)$ и шума $n_1(t)$ со спектральной плотностью N_0 и нулевым математическим ожиданием, $r_{m1}(t)$ – изменение дальности во времени.

Раскрывая выражение (2), получаем относительное фазовое смещение принятого сигнала от движущейся цели за время между сеансами наблюдения T_0 , с учётом синтезирования апертуры в каждом сеансе:

$$\begin{aligned} \delta\hat{\phi}_{изм}(T_0) &\approx \frac{2\pi V_{\tau} T_0 T_c}{\lambda r_0} \left[2v_{r\partial o} \cos(\alpha_{ho}) + v_{\tau\partial o} \right] \approx \\ &\approx \frac{2\pi B_0 T_c}{\lambda r_0} \left[2v_{r\partial o} \cos(\alpha_{ho}) + v_{\tau\partial o} \right] \sin(\alpha_0) \end{aligned} \quad (3)$$

Из анализа выражения видно, что на изменение фазы влияют две составляющие скорости движущегося объекта – радиальная и тангенциальная.

Оценку радиальной скорости ДО можно получить, используя разность фаз сигналов, полученных в одном сеансе наблюдения двухканального интерферометра [10,11]:

$$\hat{v}_{rdo} \approx \frac{\Delta\hat{\varphi}_{\partial o1} \lambda V_{II} \sin(\alpha_0)}{2\pi d_f}, \quad (4)$$

где $\Delta\hat{\varphi}_{\partial o1}$ – оценка фазы, полученная при обработке сигнала одного сеанса в соответствии с оптимальным алгоритмом, изложенным в источнике [6].

Для анализа возможных пределов используем следующие параметры:

- длина волны – (X-диапазон) $\lambda = 3$ см;
- азимутальный угол центра зоны обзора – $\alpha_0 = 70^\circ$;
- расстояние между ФЦА двух подрешёток – $d_f = 0,5$ м;
- скорость носителя РСА – $V_{II} = 190$ м/с;
- однозначный диапазон фазовых измерений – $\Delta\hat{\varphi}_{\partial o1} = [0 \dots 2\pi]$.

Диапазон значений радиальной скорости наземных движущихся объектов может быть однозначно определён по формуле (4) – $\Delta\hat{v}_{rdo} = [0 \dots 10,5]$ м/с.

Далее рассмотрим влияние изменения тангенциальной составляющей скорости ДО (при максимальной радиальной) на изменение фазы при следующих параметрах:

- длина волны – $\lambda = 3$ см;
- наклонная дальность – $R_0 = 50$ км;
- азимутальный угол неподвижного объекта – $\alpha_{но} = 65^\circ$;
- время синтезирования – $T_c = 2$ с;
- время между сеансами наблюдения – $T_0 = 0,25$ с;
- диапазон тангенциальной скорости наземной движущейся цели – $v_{tdo} = 0,1 \dots 30$ м/с;
- скорость носителя РСА – $V_{II} = 190$ м/с;
- азимутальный угол центра зоны обзора – $\alpha_0 = 70^\circ$.

Исходя из данных параметров, построим зависимость разности фаз между сеансами от тангенциальной скорости движущегося объекта (рисунок 2).

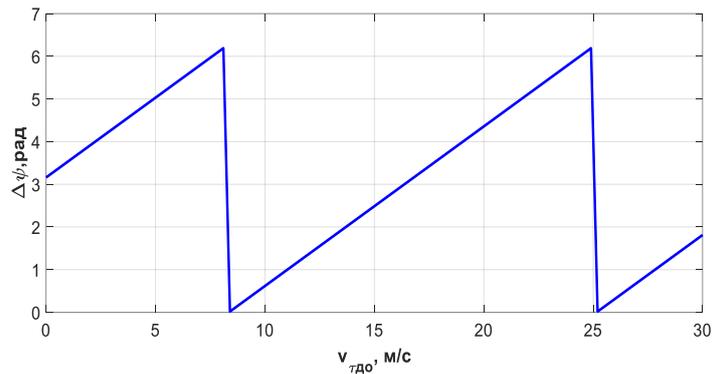


Рис. 2. Зависимость разности фаз от тангенциальной скорости наземной движущейся цели при $T_0 = 0.25$ с.

Анализ зависимости, представленной на рисунке 2, приводит к выводу о том, что при увеличении $v_{тдо}$ проявляется фазовая неоднозначность. Наблюдаются не только скачкообразные переходы разности фаз, но и возможны значения $\Delta\hat{\varphi}_{до}$ практически равные нулю, хотя в этих элементах разрешения ДО присутствуют с тангенциальной скоростью 8.4 и 25.2 м/с.

При постоянной скорости носителя РСА $V_{П} = 190$ м/с за время синтеза T_c , можно изменить базу интерферометра B_0 , тем самым реализовав много шкальный измеритель. На рисунке 3 представлены зависимости разности фаз от тангенциальной скорости наземного ДО при использовании различных значений базы.

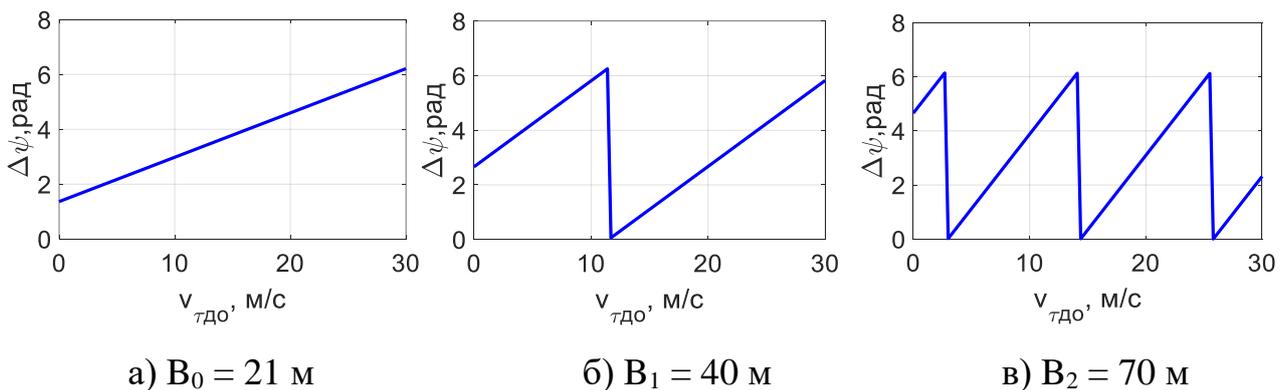


Рис. 3. Зависимость разности фаз от тангенциальной скорости движущегося объекта при различных значениях базы интерферометра.

Данные результаты показали, что использование различных значений базы интерферометра позволяет раскрыть фазовую неоднозначность для определённого диапазона скоростей. На рисунке 3а представлен случай

однозначной оценки. При этом точность оценки $\hat{v}_{\tau\partial o}$ снижается из-за размера базы интерферометра.

Использование нескольких (двух или трёх) измерений позволит произвести однозначную оценку разности фаз при высокой точности измерения тангенциальной скорости.

2. Алгоритм разрешения фазовой неоднозначности

Чтобы решить проблему неоднозначности и достичь большей точности оценки тангенциальной скорости ДО, предлагается следующий алгоритм:

- 1) Измерение фазовой разности $\Delta\hat{\phi}_{изм}$ произвести при

$$B_0 \approx \frac{\lambda R_0}{T_c [2v_{r\partial o\max} \cos(\alpha_{ho}) + v_{\tau\partial o\max}] \sin(\alpha_0)},$$

полученной из выражения (3), где

$v_{r\partial o\max}$ – максимальное однозначное значение радиальной скорости ДО (в данном случае – 10,5 м/с), $v_{\tau\partial o\max}$ – максимальное значение интересующего однозначного диапазона тангенциальной скорости ДО (в данном случае – 30 м/с). $B_0 \approx 21$ м или $T_0 = 0,11$ с – значения справедливы при тех условиях, описанных выше – достаточная величина для однозначного оценивания тангенциальной скорости ДО в диапазоне от 0,1 до 30 м/с. При изменении условий полёта T_0 определить исходя из $T_0 = B_0 / V_{п}$.

- 2) Далее произвести увеличение базового параметра на коэффициент

$$k = \frac{[2v_{r\partial o\max} \cos(\alpha_{ho}) + v_{\tau\partial o\max}]}{[2v_{r\partial o} \cos(\alpha_{ho}) + v_{\tau\partial o}]},$$

при условии неизменности

остальных параметров. Следовательно, база равна: $B_1 \approx kB_0$.

- 3) При этом если после изменения B_1 измеренная фаза стала значительно меньше, чем была на первом этапе алгоритма, то необходимо уменьшить B_1 до того момента, когда будет выполняться условие $\Delta\hat{\phi}_{изм}(T_n) > \Delta\hat{\phi}_{изм}(T_0)$.

- 4) Полученную оценку $\Delta\hat{\phi}_{изм}(T_n)$ можно считать удовлетворительной для приведённых условий и по ней определяется $\hat{v}_{\text{до}}$.

3. Результаты имитационного моделирования

Проверка работоспособности предложенного алгоритма осуществлялась с помощью имитационной модели – цифровой матрицы радиолокационного рассеяния. На анализируемом участке были расположены два движущихся объекта с радиальной скоростью, равной 5 м/с. Параметры наблюдения: $R_0 = 50$ км; $\alpha_{\text{но}} = 65^\circ$; $V_{\text{п}} = 190$ м/с; $\alpha_0 = 70^\circ$; $T_c = 2$ с; $T_0 = 0,11$ с.

Результат двухсеансной обработки показан на рисунке 5.

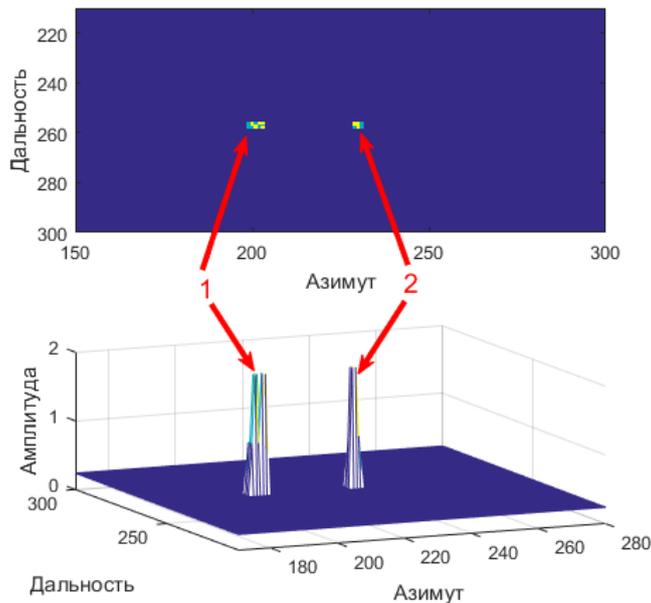


Рис. 5. РЛИ и 3D-изображение модели земной поверхности с наличием движущихся объектов.

Анализируя рисунок, можно заметить «размытие» метки первого ДО из-за наличия существенной тангенциальной скорости. В результате двухсеансной интерферометрической обработки получаем две оценки разности фаз: для первого движущегося объекта – $1,2\pi$ и для второго – $0,5\pi$. В таком случае выбирается наибольшее значение $\Delta\hat{\phi}_{изм}$, по которой оценивается величина тангенциальной скорости для дальнейшего расчёта коэффициента k второго шага полученного алгоритма.

После выполнения всех шагов предложенного метода получаем следующие результаты: $B_1 = 31$ м, $v_{\tau l \partial o} = 19,28$ м/с, $v_{\tau l \partial o} = 3,63$ м/с.

4. Экспериментальная проверка работоспособности РСА-интерферометра

Для экспериментальной проверки интерферометрической обработки с использованием алгоритма разрешения фазовой неоднозначности были взяты двухканальные радиоголограммы, зарегистрированные в цифровом виде на борту авиационного носителя РСА в 2005 году.

Условия полёта и параметры обзора были следующие:

- наклонная дальность – $R_0 = 20$ км;
- скорость носителя РСА – $V = 180$ м/с;
- высота $h_0 = 3$ км;
- азимут зоны обзора – 40° ;
- разрешающая способность по дальности – 30 м;
- разрешающая способность по азимуту – 7 м;
- время синтезирования – $T_c = 5$ с;
- время между сеансами наблюдения – $T_0 = 0.1$ с;

Результат интерферометрической обработки радиоголограмм представлен на рисунке 6.

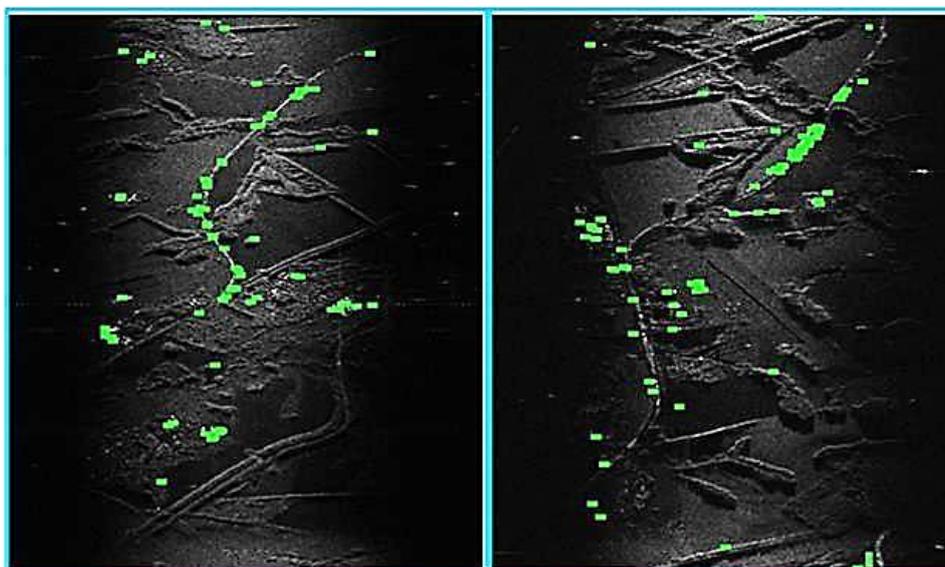


Рис. 6. Экспериментальная проверка обнаружения и восстановления азимута движущихся объектов.

Из рисунка видно, что метки обнаруженных движущихся объектов локализованы вблизи и на автомобильных дорогах при том, что наблюдение проводилось в сложных помеховых условиях.

После определения радиальных и тангенциальных составляющих скоростей ДО, была получена матрица оценок среднего модуля скоростей с использованием полученного алгоритма разрешения фазовой неоднозначности по зарегистрированному радиолокационному сигналу. Результат работы представлен на рисунке 7.

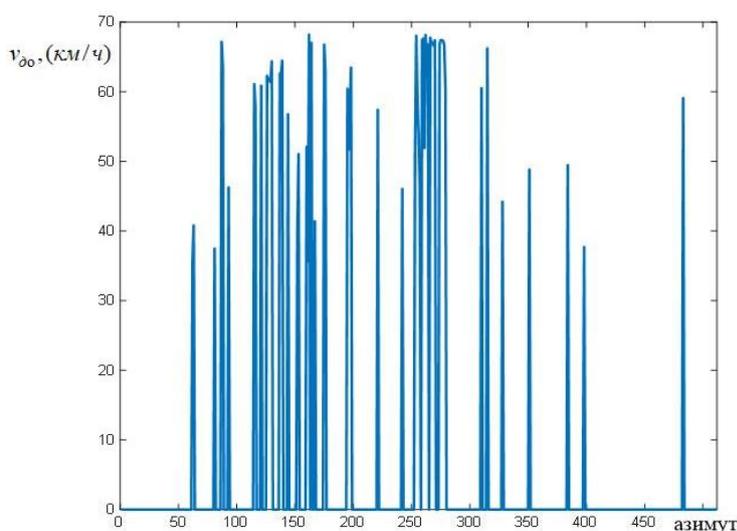


Рис. 7. Распределение оценок среднего модуля скоростей движущихся целей по азимуту.

Как можно заметить из данных рисунка 7, многие движущиеся цели двигались со скоростью больше 50 км/ч, что очевидно, так как на наблюдаемой земной поверхности присутствуют автомобильные дороги.

Заключение

Представленный в работе алгоритм позволяет получить не только однозначно измеренное значение разности фаз, но и повысить точность оценки тангенциальной скорости наземной движущейся цели.

В ходе экспериментальной проверки подтвердилась работоспособность предложенного алгоритма. В результате оптимального подбора базы

интерферометра удалось разрешить фазовую неоднозначность при этом увеличить диапазон однозначных скоростей.

Предложенный метод разрешения фазовой неоднозначности может значительно расширить возможности алгоритмов определения параметров наземных движущихся объектов при организации авиационных и космических РСА-интерферометров.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00507, <https://rscf.ru/project/24-29-00507/>

Литература

1. Richards M.A. Fundamentals of radar signal processing. 3rd ed. N.Y.: McGraw Hill, 2022. 513 p.
2. Ouchi K. Recent trend and advance of synthetic aperture radar with selected topics // *Remote Sensing*. – 2013. – Т. 5. – №. 2. – С. 716-807.
3. Richards, M.A. A Beginner's Guide to interferometric SAR concepts and signal processing [AESS Tutorial IV] // *IEEE Aerospace Electronic Systems Magazine*. - 2007. –Т. 22 - №.9. – С. 5–29.
4. Moreira A. et al. A tutorial on synthetic aperture radar // *IEEE Geoscience and remote sensing magazine*. – 2013. – Т. 1. – №. 1. – С. 6-43.
5. Антипов В.Н. и др. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны. – Радио и связь, 1988.
6. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. – 2005.
7. Сколник М.И. Справочник по радиолокации / Под ред. МИ Сколника. Пер. с англ. под общей ред. ВС Вербы. В 2 книгах. Книга 1 Москва: Техносфера, 2014.–672 с., ISBN 978-5-94836-381-3.
8. Ярлыков М.С. и др. Марковская теория оценивания в радиотехнике. – 2004.
9. Бабокин М.И. Авиационные и космические комплексы дистанционного зондирования Земли с интерферометрической обработкой многомерных сигналов: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2010. 336 с.

10. Бабокин М.И., Стёпин В.Г., Костров В.В. Оптимальная оценка радиальной скорости малоразмерных движущихся объектов методом максимального правдоподобия с помощью РСА-интерферометра //Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2021. – №. 4 (44). – С. 5-12.
11. Стёпин В.Г. Восстановление вектора движения наземных объектов с помощью авиационного РСА-интерферометра //Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2022. – №. 4. – С. 19-28.

Для цитирования:

Стёпин В.Г., Бабокин М.И., Шимкин П.Е. Алгоритм разрешения фазовой неоднозначности при оценке параметров наземных движущихся объектов. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. –№ 3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.3.5>