

Радиолокационные и радионавигационные системы

DOI 10.24412/2221-2574-2022-4-19-28

УДК 621.396: 528.835

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВЕКТОРА ДВИЖЕНИЯ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ АВИАЦИОННОГО РСА ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Степин Виталий Георгиевич

старший инженер АО «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В.В. Тихомирова»¹.

E-mail: vitalii.stepin@mail.ru

¹Адрес: 140180, Российская Федерация, Московская обл., г. Жуковский, ул. Гагарина, д. 3.

Аннотация: В статье рассмотрены вопросы целесообразности использования авиационного радиолокатора с синтезированием апертуры антенны (РСА) в интерферометрическом режиме съёмки для обнаружения, измерения скорости и координат малоразмерных движущихся объектов при эффективном подавлении отражений от земной поверхности в широком диапазоне углов. Обоснована структура двухканального РСА для эффективной компенсации отражений от неподвижной земной поверхности, обнаружения и измерения координат, а также организацией нескольких сеансов наблюдения с целью измерения тангенциальной скорости движущихся объектов. Приведены практические результаты использования двухканального двухсеансного авиационного РСА интерферометра для обнаружения и измерения параметров движущихся объектов на фоне отражений от неподвижной земной поверхности.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой антенны, РСА, интерферометрическая обработка, движущийся объект, радиальная скорость, тангенциальная скорость.

Введение

Авиационные радиолокаторы с синтезированием апертуры антенны (РСА) широко применяются для селекции движущихся объектов. Изображение движущегося объекта (ДО) смещено относительно своей азимутальной координаты пропорционально радиальной скорости движения. Существует неопределённость между азимутом и радиальной скоростью. При устранении данной неопределённости используют [1, 2] антенные измерения для определения азимутального положения движущегося объекта.

Как нельзя лучше для обнаружения и измерения параметров наземных малоразмерных движущихся объектов подходит телескопический обзор при стабилизации луча антенны на определённом участке местности в течение одного или нескольких интервалов синтеза. В этом случае процесс формирования радиолокационного изображения (РЛИ) пред-

ставляет собой одновременное получение спектральных отсчётов, соответствующих вееру синтезированных диаграмм направленности. Многократное возобновление телескопического обзора по одному участку поверхности позволит решить задачу восстановления вектора движения наземных движущихся объектов, включая малоразмерные и медленно движущиеся, в условиях отражений от земной или водной поверхности.

При обеспечении высокого разрешения по дальности (использованием широкополосных зондирующих сигналов) движущейся объект за время синтеза перемещается из элемента разрешения по дальности в соседние элементы. Как правило, РСА настроен на формирование РЛИ неподвижного объекта, и отметка движущейся цели размывается (расширяется) по дальности относительно истинного положения и ослабляется. Этот эффект сам по себе является основанием для постановки за-

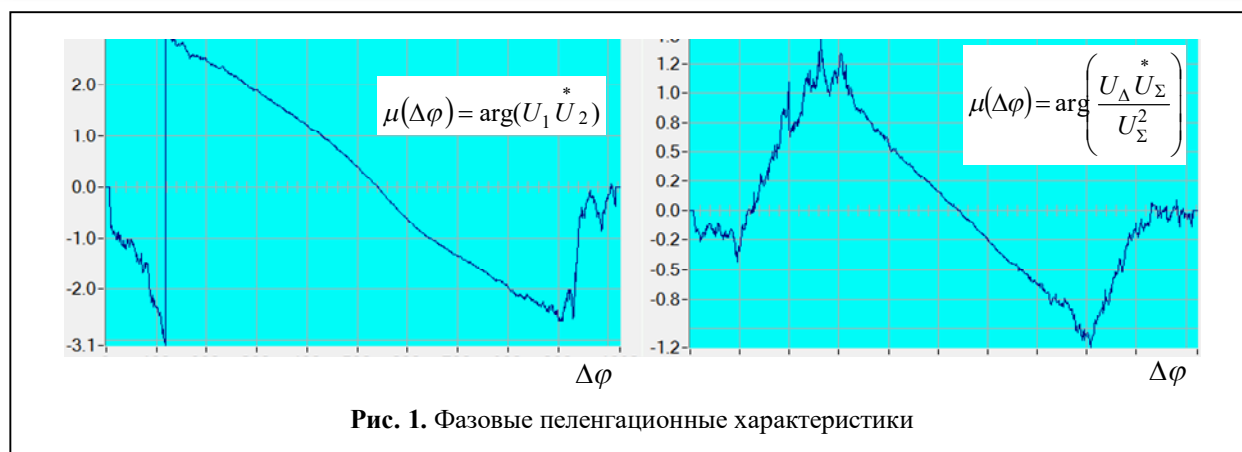


Рис. 1. Фазовые пеленгационные характеристики

дачи обнаружения движущегося объекта, но в данном случае считаем, что разрешение по дальности не столь высоко, а радиальная скорость объекта не превышает определённой величины, чтобы ослабление сигнала не было значительным.

В настоящее время известны различные методы выделения движущихся объектов на основе использования когерентно-импульсных сигналов [1–6], которые включают схемы подавления мешающих отражений от земной поверхности во временной, частотной, пространственной области.

Широкое применение получили когерентные пространственно-временные моноимпульсные измерители, которые осуществляют одновременный суммарно-разностный приём отражённых сигналов и амплитудное подавление неподвижного «фона»: $U_{\Delta} - kU_{\Sigma}$ [4–9], где U_{Δ} — сигнал разностного канала; U_{Σ} — сигнал суммарного канала.

В данной работе исследуется двухканальный РСА интерферометр [10, 11], когда облучение земной поверхности осуществляется одной антенной, а одновременный приём — на две разнесённые в пространстве подрешётки, формируя при этом парные сигналы. Подавление неподвижного «фона» осуществляется за счёт фазового сопряжения и вычитания сигналов после РСА обработки: $U_1 \exp(j\Delta\phi) - U_2 \exp(-j\Delta\phi)$, где U_1 — сигнал первого канала (подрешётки); U_2 — сигнал

второго канала; $\Delta\phi$ — разность фаз сигналов двух подрешёток относительно неподвижной земной поверхности.

В случае моноимпульсного измерителя внутри фильтра РСА сигнал разностного канала имеет значительную амплитудную модуляцию, которая по суммарному каналу практически отсутствует. Это серьёзно влияет на качество компенсации неподвижного «фона».

Во втором случае двухканального интерферометра паразитная межканальная модуляция внутри фильтра РСА практически отсутствует, а это значительно повышает качество компенсации отражений от «фона». Это, в свою очередь, определяет потенциальные характеристики, качество обнаружения и точность измерения координат движущегося объекта.

Можно отметить ещё одну особенность РСА интерферометра. Исследуя его фазовые межканальные соотношения, можно определить область однозначности:

$$\arg(U_1^* U_2) = \arg(\exp(j2\Delta\phi)) \in [-\pi \dots \pi],$$

в то время, как для моноимпульсного РСА измерителя:

$$\arg(U_1 - U_2) = \arg(\sin(\Delta\phi)) \in [-\pi/2 \dots \pi/2].$$

На рис. 1 представлены фазовые пеленгационные характеристики этих измерителей, восстановленные по одному и тому же сигналу.

Однозначный диапазон пеленгационной характеристики моноимпульса составляет около половины анализируемого азимутального участка, в то время как однозначный диапазон

интерферометра достигает 70...75%, да и крутизна фазовой пеленгационной характеристики интерферометра значительно выше.

Это определяет целесообразность исследования авиационного РСА интерферометра для обнаружения, измерения скорости и координат малоразмерных движущихся объектов при эффективном подавлении отражений от земной поверхности в широком диапазоне углов. Следует также отметить, что фазовая информация, как продукт радиолокационных интерферометрических измерений, может эффективно использоваться при решении различных задач мониторинга земной поверхности [12–15], вплоть до высокоточных измерений сдвигов и смещений.

Организация РСА интерферометра

На рис. 2 представлена плановая схема обзора земной поверхности авиационным РСА интерферометром с использованием двух, разнесённых в пространстве (по азимуту) на величину d (расстояние между фазовыми центрами) приёмных антенн (подрешёток фазированной антенной решетки — ФАР). Облучение поверхности когерентной электромагнитной волной с длиной λ осуществляется в импульсном режиме через период зондирования T_p . Носитель РСА движется равномерно со скоростью V , на высоте H . Наблюдение за участком поверхности на дальности R_0 и азимуте α (центр зоны) осуществляется в телескопическом режиме [1–4] некоторое время $t = 0 \dots \kappa T_c$, где T_c — время синтезирования, $\kappa = 2, 3, \dots$

На схеме в начальный момент времени в одном строке дальности представлены движущейся объект (ДО) с координатами $(R_0, \alpha_0 + \alpha)$, сигнал от которого за счёт собственного движения перемещается по частоте, и сигнал от неподвижно-

го «фона». Рассмотрение ведётся в системе координат синтезирования (СКС). В начальный момент времени ось OY_c направлена от проекции точки ФЦА суммарной ФАР на земную поверхность к точке центра зоны телескопического обзора. Ось OY_c в плане ортогональна оси OX_c . Ось OZ_c проходит через точку фазового центра антенны (ФЦА) суммарной ФАР и ортогональна земной плоскости. Движение объекта характеризуется вектором скорости движения носителя: модуль скорости v и угол α_0 относительного движения объекта.

Для РСА интерферометра важны фазовые соотношения, поэтому определим относительное изменение наклонной дальности до движущегося объекта и ФЦА второй подрешётки ФАР относительно первой (при условии: $\cos(\beta) \approx 1$, β — угол скольжения):

$$\begin{aligned} \Delta r(t) &= r_2(t) - r_1(t) \approx \\ &\approx \sqrt{r_1(t)^2 + (d + \sin(\alpha)R_0 - (V_\tau + v_\tau)t)^2} - r_1(t) \approx \\ &\approx d\alpha - \frac{d[V \sin(\alpha_0 + \alpha) + v \sin(\alpha_0)]t}{R_0}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta r(t) &= r_2(t) - r_1(t) \approx \\ &\approx \sqrt{r_1(t)^2 + (d + \sin(\alpha)R_0 - (V_\tau + v_\tau)t)^2} - r_1(t) \approx \\ &\approx d\alpha - \frac{d[V \sin(\alpha_0 + \alpha) + v \sin(\alpha_0)]t}{R_0}. \end{aligned}$$

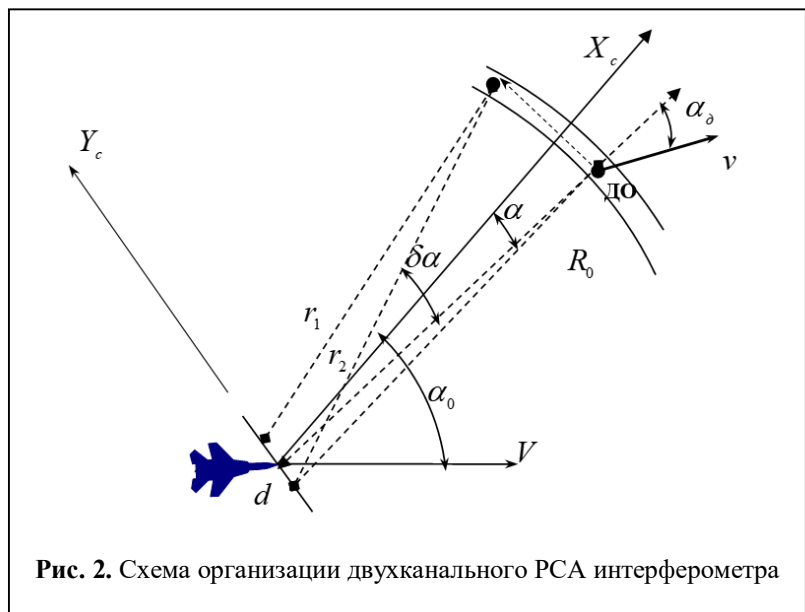


Рис. 2. Схема организации двухканального РСА интерферометра

Поскольку только приём осуществляется на разные подрешётки, то в фазовой области эта разность имеет вид: $\Delta\varphi(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r(t)$.

Предварительно по известной информации можем произвести фазовую коррекцию на следующую расчётную величину:

$$\Delta\hat{\varphi}(t) \approx \frac{2\pi}{\lambda} d \left[(\alpha + \delta\alpha) + \frac{V \sin(\alpha_0 + \alpha + \delta\alpha)}{R_0} t \right],$$

где $\delta\alpha \approx \frac{v_r}{V \sin(\alpha_0)}$ — азимутальное смещение ДО.

Оставшееся фазовое отклонение определяется следующим образом:

$$\Delta\varphi_{\Delta}(t) \approx \frac{2\pi}{\lambda} d \left[\frac{v_r}{V \sin(\alpha_0)} + \frac{[v_r \operatorname{ctg}(\alpha_0) + v_{\tau}]_t}{R_0} \right],$$

где $v_r = v \cos(\alpha_0)$, $v_{\tau} = v \sin(\alpha_0)$.

Первая составляющая фазового отклонения линейно зависит от радиальной скорости, вернее от соотношения радиальной скорости объекта и тангенциальной скорости носителя. Измерение этого фазового отклонения позволит не только обнаружить, но и восстановить истинное азимутальное положение α движущегося объекта.

Вторая составляющая линейно зависит от времени, тангенциальной и радиальной скорости объекта. По величине она значительно меньше первой составляющей, но достаточна для измерения, если время между сеансами измерения будет значительным.

На рис. 3 представлена схема организации двухканального двухсеансного РСА интерферометра для восстановления полного вектора движения наземного объекта.

Сеансы формируются через интервал времени T_0 и фазовые отклонения можно записать следующим образом:

$$\Delta\varphi_{\Delta}(0) \approx \frac{2\pi}{\lambda} d \frac{v_r}{V \sin(\alpha_0)},$$

$$\Delta\varphi_{\Delta}(T_0) \approx \frac{2\pi}{\lambda} d \frac{v_r}{V \sin(\alpha_0)} + \frac{2\pi}{\lambda} d \frac{[v_r \operatorname{ctg}(\alpha_0) + v_{\tau}]}{R_0} T_0.$$

После несложных преобразований можно получить оценки параметров вектора движения:

$$\hat{v}_r \approx \frac{\Delta\varphi_{\Delta}(0) \lambda V \sin(\alpha_0)}{2\pi d},$$

$$\hat{v}_{\tau} \approx \frac{\left[\Delta\varphi_{\Delta}(T_0) - \Delta\varphi_{\Delta}(0) - \hat{v}_r \frac{2\pi d T_0 \operatorname{ctg}(\alpha_0)}{\lambda R_0} \right] \lambda R_0}{2\pi d T_0}. \quad (1)$$

В работе [11] получена оптимальная по критерию максимума функционала правдоподобия траекторного сигнала оценка радиальной скорости движущегося объекта при двухканальном односеансном наблюдении:

$$\hat{v}_r = \frac{\lambda V \sin(\alpha_0)}{2\pi d} \arg \left[(\hat{e}_1 - \hat{e}_2)^* \hat{e}_2 - \hat{e}_1 (\hat{e}_2 - \hat{e}_1)^* \right], \quad (2)$$

где \hat{e}_1, \hat{e}_2 — РСА оценки по двум пространственным каналам, приведённые по фазе относительно ровной неподвижной земной поверхности.

В соответствии с выражением (1), двукратная оценка (2) в разные сеансы наблюдения позволит оценить полный набор параметров движения объекта:

$$\alpha_u = \alpha + \frac{\hat{v}_r}{V \sin(\alpha_0)} \text{ — истинный азимут объекта;}$$

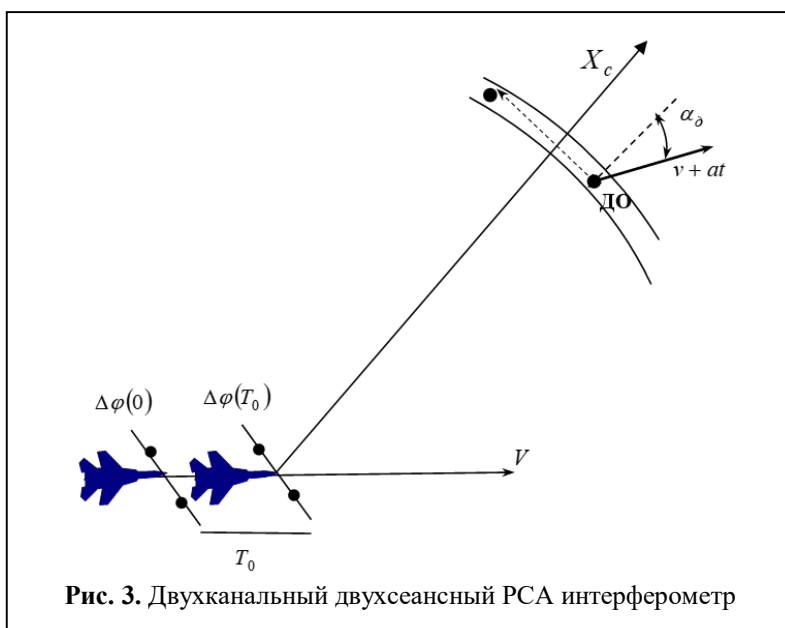


Рис. 3. Двухканальный двухсеансный РСА интерферометр

$\hat{\alpha}_d \approx \arg\left(\frac{\hat{v}_r}{\hat{v}_t}\right)$ — угол движения; $\hat{v} \approx \sqrt{\hat{v}_r^2 + \hat{v}_t^2}$

— модуль скорости.

Особого внимания заслуживает выбор времени T_0 между сеансами наблюдения. Фактически в результате оценки фазового отклонения в двух или нескольких сеансах отклонения имеем низкочастотный процесс, состоящий из двух или более измерений, и необходимо обосновать шаг представления этого процесса.

С одной стороны его можно получить из условия однозначности: $[\Delta\varphi(2T_0) - \Delta\varphi(0)] < 2\pi$, откуда получим ограничение на выбор базового параметра интерферометра $T_0 < \lambda R_0 / dv_t$.

Пример. При $\lambda \approx 0,03$ м, $R_0 \approx 20$ км, $d \approx 0,5 \dots 1$ м, $v_t \approx 30 \dots 40$ м/с, $T_0 < 20 \dots 30$ с.

Во-первых, при таких временах между сеансами измерения необходимо обеспечить смещение движущегося объекта по дальности, что осуществляется по результатам измерений первого сеанса.

Во-вторых, из-за тангенциального движения объекта РСА изображение его может быть размытым и между сеансами наблюдения не произойдет точного совпадения положения обнаруженного объекта, поэтому необходимо произвести дополнительный поиск в локальной области для определения максимальной корреляции парных сигналов.

Экспериментальная проверка работы РСА интерферометра

Для экспериментальной проверки работы РСА интерферометра были использованы двухканальные радиолограммы, записанные в цифровом виде на борту авиационного носителя. Условия регистрации: высота — 3 км, скорость — 170 м/с, дальность — 20 км, азимут — $+40^\circ$, разрешающая способность по дальности — 30 м, разрешающая способность по азимуту — 7 м, база пространственного интерферометра:

$d = 0,5$ м, база временного интерферометра: $T_0 \approx 5$ с.

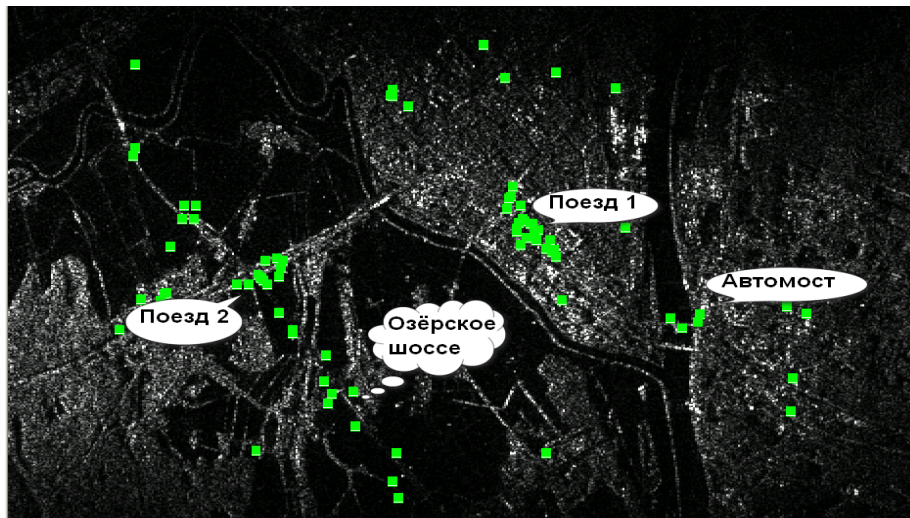
Формировались два сеанса наблюдения, следующие через время T_0 . В каждом сеансе съёмки РСА производилась обработка сигналов двух пространственных каналов, полученных одновременно, затем интерферометрическая обработка в соответствии с (1), (2).

На рис. 4, а, б, в представлены РЛИ района г. Коломна и восстановленное положение движущихся объектов (квадратики с зелёным цветом) после обнаружения. Фактически продемонстрирована работа односеансного двухканального РСА интерферометра. На трёх изображениях отдельно выделены характерные объекты: местное Озёрское шоссе и федеральная трасса М4, мост через Оку, проходящие поезда.

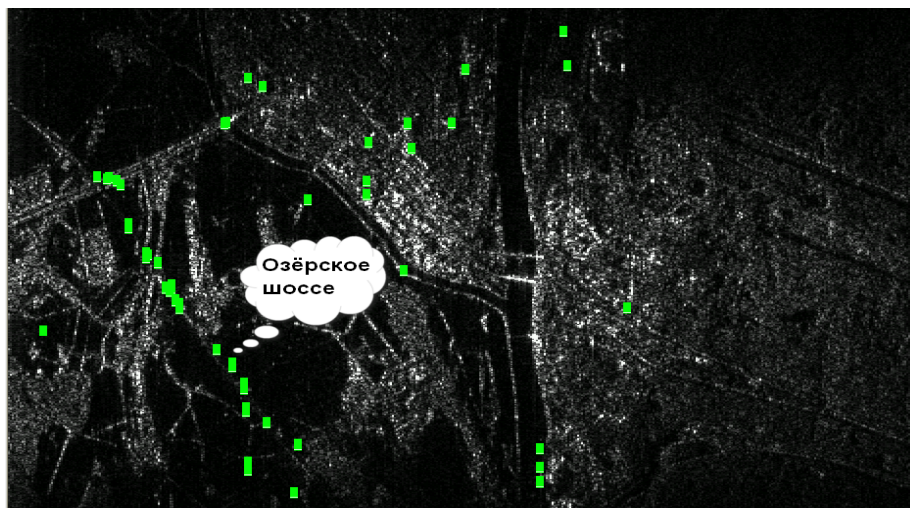
Все эти объекты имеют точную геодезическую привязку, а обнаруженные объекты сосредоточены вблизи магистралей (дорог), и по относительному отклонению от них можно судить о точности восстановления азимутального положения. Можно сделать вывод, что точность восстановления азимута равна нескольким единицам элементов разрешения по азимуту ($\approx 10 \dots 20$ м). Есть, конечно же, отдельные аномалии, скорее всего связанные с резким торможением или ускорением.

Автомагистрали зачастую пролегают в пределах города, то есть РСА наблюдение произошло в сложных помеховых условиях на фоне отражений от контрастной земной поверхности и искусственных строений.

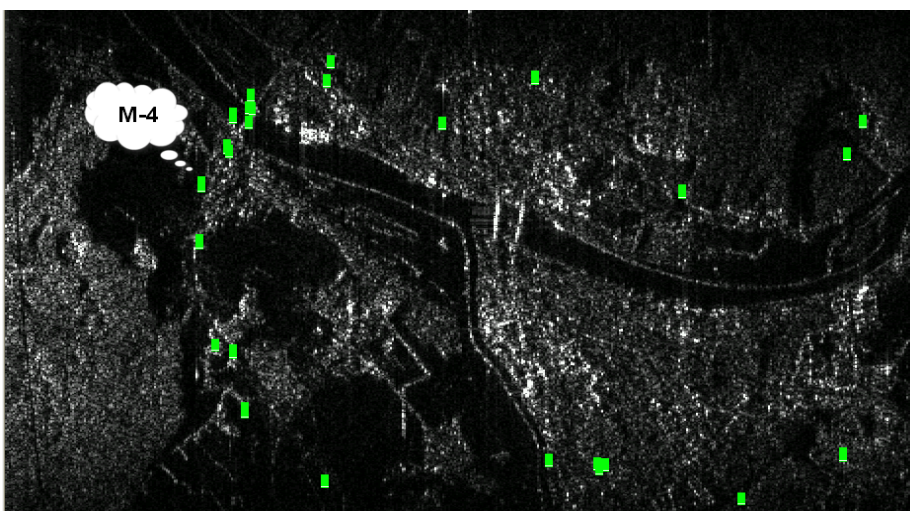
На следующем этапе экспериментальной проверки был подвергнут двухсеансный двухканальный РСА интерферометр. Использовались всё те же три радиолограммы. В соответствии с (2) производилась оценка \hat{v}_t , а затем восстанавливались $\hat{\alpha}_d$ и \hat{v} . На рис. 5 представлены гистограммы распределения



а)



б)



в)

Рис. 4. Иллюстрация работы односансного РСА интерферометра

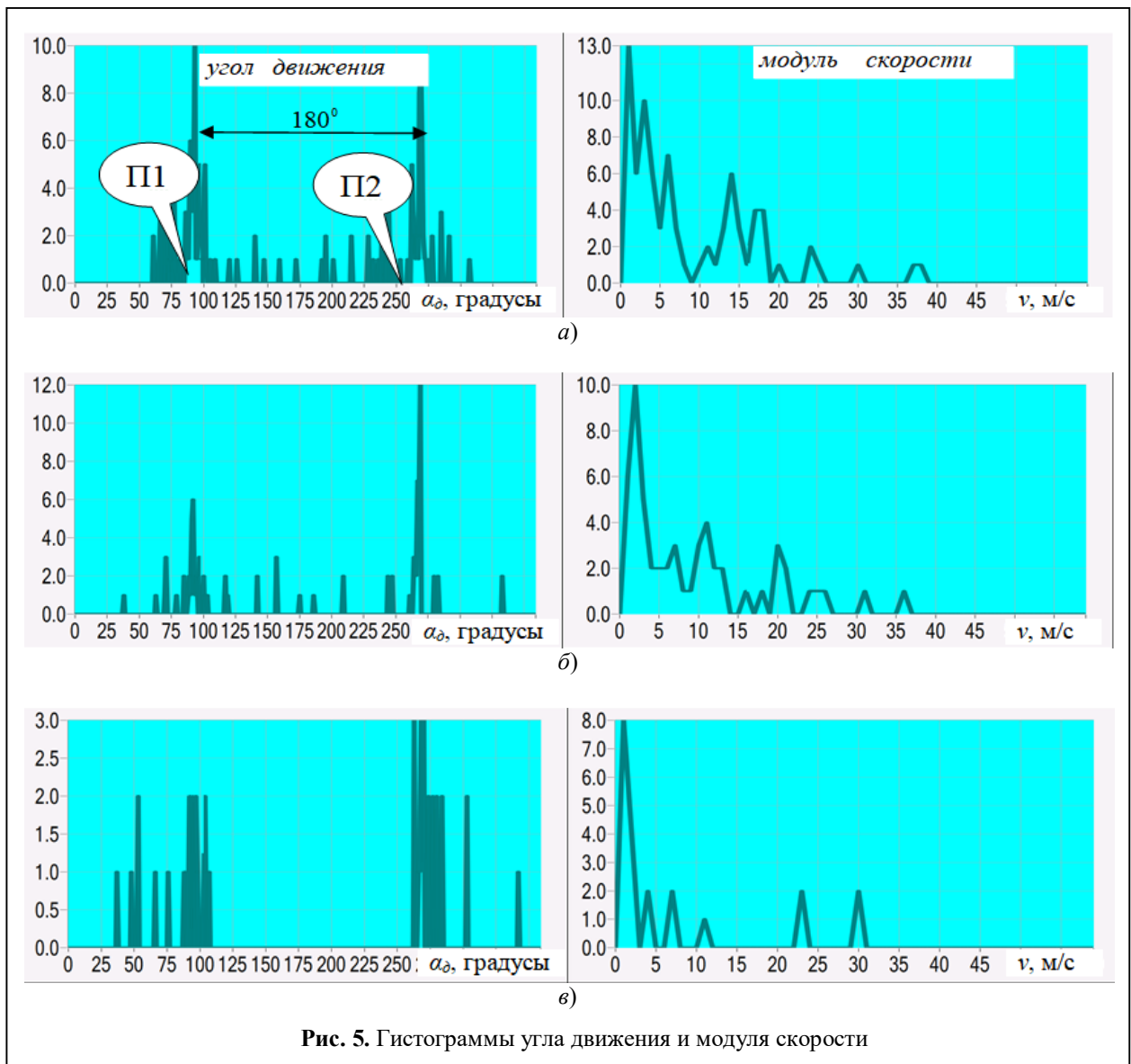


Рис. 5. Гистограммы угла движения и модуля скорости

значений угла движения $\hat{\alpha}_\delta$ и модуля скорости \hat{v} обнаруженных объектов.

Гистограммы представляют количество обнаруженных объектов, параметры которых в соответствии с (1)...(2) имеют определённые значения $\alpha_\delta = 0...360^\circ$, $v = 0...50$ м/с.

Интересно наблюдать «встречное» движение, которое проявляется на гистограммах угла движения во всех трёх фрагментах. Выделяются два доминирующих «всплеска», сдвинутых на 180° . Если в первых двух случаях (рис. 4, а и 5, а; рис. 4, б и 5, б) шоссе прямое и чётко выражены два встречных направления движения, то в третьем случае (рис. 4, в и 5, в) шоссе

дугообразное и нет выраженных встречных потоков. В прямом и обратном направлении присутствует целый спектр (до 20°) углов обнаруженных объектов.

На рис. 4, а и 5, а отдельно выделены два поезда, движущиеся навстречу друг другу. Анализируя гистограмму, можно определить относительное их угловое смещение $\Delta\alpha_\delta \approx 20^\circ$, а, значит, и отклонение ж/д полотна на участках движения этих поездов.

По величине скорости движения выделяется диапазон до 10 м/с. Высокоскоростных объектов среди всех выбранных фрагментов не более 10%.

К сожалению, условия проведения эксперимента не позволили обеспечить предполагаемую точность: база временного интерферометра T_0 всего лишь в два раза больше времени T_c , что в несколько раз меньше расчётного значения.

Вместе с тем, полученные положительные результаты по восстановлению полного вектора скорости движения объекта подтвердили обоснованность модели сигнала и алгоритмов интерферометрической РСА обработки.

Заключение

1. Авиационный интерферометр РСА позволяет эффективно решать задачи обнаружения, измерения скорости и координат малоразмерных движущихся объектов в сложных условиях и в широком диапазоне углов визирования.
2. Интерферометрическое подавление неподвижного «фона» позволило повысить точность измерения параметров движущихся объектов.
3. Полученные положительные результаты показывают возможность оценивания полного вектора скорости движения объекта в двухканальных интерферометрических РСА.

Литература

1. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В.Н. Антипов, В.Т. Горяинов, А.Н. Кулин и др.; Под ред. В.Т. Горяинова. М.: Радио и связь, 1988. 304 с.
2. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов / Под ред. Г.С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.
3. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений: учебник для курсантов ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского / Л.А. Школьный и др. М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. 531 с.
4. Авиационные системы радиовидения / Под ред. Г.С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2015. 648 с.
5. Антипов В.Н., Ильчук А.Р., Колтышев Е.Е., Янковский В.Т. Алгоритмы селекции сигналов движущихся объектов в когерентно-импульсных РЛС // Радиотехника. 1998. № 4. С. 69–78.

6. Колтышев Е.Е. Селекция целей в многоканальных РСА // Радиотехника. 2006. № 7. С.41–47.

7. Гришин В.Ю., Костров В.В., Орлов А.В., Ракитин А.В. Мониторинг подвижных целей радиолокационными системами с синтезированием апертуры антенны космического базирования // Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли / Материалы XVII научно-технической конференции. Калуга: Манускрипт, 2021. С. 116–122.

8. Бабокин М.И., Бекирбаев Т.О., Карнов О.А. Экспериментальные исследования селектора наземных движущихся объектов в моноимпульсных РСА // Цифровая обработка сигналов в РСА / Под ред. Е.Ф. Толстова. Смоленск, Изд-во ВА ВПВО ВС РФ, 2005. С. 221–225.

9. Khranov K.K., Tolstov E.F., Kostrov V.V. The Tangential Velocity Estimation Algorithm for Spaceborne SAR // MPRSRWPD 2021, IOP Publishing, Journal of Physics: Conference Series 1991 (2021) 012021. Pp. 1–9.

10. Бабокин М.И., Цветков О.Е. Алгоритмы интерферометрической обработки сигналов РСА при идентификации движущихся объектов // Радиотехника. 2012. №10. С. 87–92.

11. Бабокин М.И., Степин 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.

12. Бабокин М.И., Костров В.В., Толстов Е.Ф. Фазовый портрет в космических РСА радиовидения // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2017. № 4 (27). С. 4–14.

13. Бабокин М.И., Зайцев С.Э. Фазовое наблюдение за движением объектов космическим комплексом «Кондор-ФКА» // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2018. № 2 (30). С. 26–34.

14. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Стёпин В.Г. Фазовый мониторинг динамических процессов с помощью авиационных комплексов РСА // VIII Всероссийские Армандовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской научной конференции. Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2018. С. 423–428.

15. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Зайцев С.Э., Костров В.В. Обнаружение сдвигов на земной поверхности с помощью РСА интерферометра при переднебоковом обзоре // VII Всероссийские Армандовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской научной конференции. Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2017. С. 101–111.

Поступила 15 августа 2022 г.

English

MOTION VECTOR RESTORATION FOR GROUND OBJECTS USING AIRBORNE SAR INTERFEROMETER

Vitaly Georgievich Stepin — Senior Engineer, JSC “RIIE named after V.V. Tikhomirov”¹.

E-mail: vitalii.stepin@mail.ru

¹*Address:* 140180, Russian Federation, Moscow region, Zhukovsky, Gagarin st., 3.

Abstract: The article deals with issues of expediency for using airborne SAR (synthetic aperture radar) in interferometric shooting mode for detecting, measuring the velocity and coordinates of small-size moving objects with efficient suppression of ground reflections in a wide angular range. Phase and direction-finding features were analyzed for two methods of processing SAR signals. The analysis revealed that dynamic range and direction-finding characteristic curvature of monopulse method is worse than that of SAR interferometer. There was substantiated structure of operation management for two-channel SAR for efficient multiple-echo compensation from stationary ground surface, detection and coordinate measurements. The sensing pattern of managing several SAR observation sessions is considered to the effect to measure the tangential velocity of moving objects or directions of their movement. There were obtained equations to calculate motion vector parameters and the required time between sessions, as well as numerical illustration of their using. Practical effects of using two-channel single-session and two-session airborne SAR interferometer for detecting and measuring parameters of moving objects amid reflections from stationary ground surface are given. Radar images for single-session SAR interferometer were synthesized. Analysis of radar images and histograms of motion angle estimates and velocity modulus of moving targets revealed that the considered SAR interferometer enables to separate two opposite directions of cars and trains movement as well as to evaluate traffic parameters in a wide range. The obtained positive results in respect to restoration of full vector for target velocity confirmed essential theoretical constructs and performance efficiency of proposed shooting patterns and processing algorithms.

Keywords: synthetic aperture radar, SAR, Interferometric processing, moving object, radial velocity, tangential velocity.

References

1. Radar stations with digital synthesis of the antenna aperture / *V.N. Antipov, V.T. Goryainov, A.N. Kulin et al*; Ed. by *V.T. Goryainov*. Moscow: Radio i svyaz', 1988. 304 p.
2. *Kondratenkov G.S., Frolov A.Yu.* Radiovision. Radar systems for remote sensing of the Earth. Textbook for universities / Ed. by *G.S. Kondratenkov*. Moscow: Radiotekhnika, 2005. 368 p.
3. Radar systems of aerial reconnaissance, decoding of radar images: a textbook for cadets of the VVIA named after Professor N.Ye. Zhukovsky / *L.A. Shkolny et al.* Moscow: Published VVIA them. prof. N.Ye. Zhukovsky, 2008. 531 p.
4. Aviation radio vision systems / Ed. by *G.S. Kondratenkov*. Moscow: Radiotekhnika, 2015. 648 p.
5. *Antipov V.N., Ilchuk A.R., Koltyshev E.E., Yankovsky V.T.* Algorithms for the selection of signals from moving objects in coherent-pulse radars. Radiotekhnika. 1998. No. 4. Pp. 69–78.
6. *Koltyshev E.E.* Selection of targets in multichannel SAR. Radiotekhnika. 2006. No.7. Pp. 41–47.
7. *Grishin V.Yu., Kostrov V.V., Orlov A.V., Rakitin A.V.* Monitoring of moving targets by space-borne radar systems with synthetic aperture antenna. Earth observation, monitoring and remote sensing systems / Proceedings of the XVII Scientific and Technical Conference. Kaluga: Manuscript, 2021. Pp. 116–122.
8. *Babokin M.I., Bekirbaev T.O., Karpov O.A.* Experimental studies of the selector of ground moving objects in monopulse SAR // Digital signal processing in SAR / Ed. by *E.F. Tolstov*. Smolensk: Publishing house of VA VPO RF Armed Forces, 2005. Pp. 221–225.
9. *Khramov K.K., Tolstov E.F., Kostrov V.V.* The Tangential Velocity Estimation Algorithm for Space-borne SAR. MPRSRWPD 2021, IOP Publishing, Journal of Physics: Conference Series 1991 (2021) 012021. Pp.1–9.
10. *Babokin M.I., Tsvetkov O.E.* Algorithms for interferometric processing of SAR signals for identifying moving objects. Radiotekhnika. 2012. No.10. Pp. 87–92.
11. *Babokin M.I., Stepin V.G., Kostrov V.V.* Optimal estimation of the radial velocity of small-sized moving objects by the maximum likelihood method by SAR interferometer. Radioengineering and telecommunication systems. 2021. No. 4(44). Pp.5–12.

12. Babokin M.I., Kostrov V.V., Tolstov E.F. Phase portrait in space-borne SARs. Radio engineering and telecommunication systems. 2017. No. 4 (27). Pp. 4–14.

13. Babokin M.I., Zaitsev S.E. Phase observation of the movement of objects by the space complex "Kondor-FKA". Radioengineering and telecommunication systems. 2018. No. 2 (30). Pp. 26–34.

14. Babokin M.I., Efimov A.V., Stepin V.G. Phase monitoring of dynamic processes using SAR aircraft systems. Proc. VIII All-Russian open Armand readings. Modern problems of remote sensing, radar and wave diffraction. – Murom: MI VIGU, 2018. Pp. 423–428.

15. Babokin M.I., Efimov A.V., Zaitsev S.E., Kostrov V.V. Detection of displacements of the earth's surface using a SAR interferometer in an anterolateral view. Proc. VII All-Russian open Armand readings. Modern problems of remote sensing, radar and wave diffraction. Murom: MI VIGU, 2017. Pp. 101–111.