

Радиолокационные и радионавигационные системы

DOI 10.24412/2221-2574-2021-444-5-12

УДК 621.396: 528.835

ОПТИМАЛЬНАЯ ОЦЕНКА РАДИАЛЬНОЙ СКОРОСТИ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ МАКСИМАЛЬНОГО ПРАВДОПОДОБИЯ С ПОМОЩЬЮ РСА-ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Бабокин Михаил Иванович

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник АО «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В.В. Тихомирова»¹.

E-mail: m.baboki57@mail.ru

Стёпин Виталий Георгиевич

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

E-mail: vitalii.stepin@mail.ru

Костров Виктор Васильевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»².

E-mail: vvk@mit.ru

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

²*Адрес:* 602264, Российская Федерация, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, д. 23.

Аннотация: В статье рассмотрены вопросы формирования отражённых от движущихся объектов сигналов и их совместной обработки в двухканальной авиационной радиолокационной станции (РЛС) с синтезированием апертуры антенны (РСА). Представлена модель траекторного сигнала и синтез оптимальных алгоритмов интерферометрической обработки парных сигналов при обнаружении и оценке радиальной скорости малоразмерных движущихся объектов методом максимального правдоподобия при наличии отражений от неподвижной земной поверхности. Произведена оценка потенциальной точности измерения радиальной скорости и восстановленного азимутального положения.

Ключевые слова: РЛС с синтезированной апертурой антенны, интерферометрическая обработка, движущийся объект, оптимальные алгоритмы, метод максимального правдоподобия.

Введение

Задача селекции движущихся целей (СДЦ) относится к одной из самых сложных задач современных систем дистанционного зондирования Земли с использованием радиолокаторов с синтезированием апертуры антенны (РСА) [1–4]. Основную проблему при её решении составляет задача компенсации отражений от земной поверхности для обнаружения и измерения параметров малоразмерного движущегося объекта (ДО), причём эта задача характерна как для авиационных, таи космических РСА

[4, 5]. В связи с этим обоснование методов съёмки, синтез оптимальных алгоритмов оценки радиальной скорости и измерения координат малоразмерных наземных ДО при наблюдении на фоне отражений от земной поверхности являются актуальными задачами.

Наиболее привлекательными являются методы СДЦ с использованием однолучевой диаграммы направленности антенны, что не требует сложных режимов обзора и программных решений. Одним из таких методов является метод доплеровской фильтрации, основанный

на измерении доплеровской частоты траекторного сигнала в зависимости от углового положения объекта при реализации нормального бокового или скошенного режимов [2, 4]. При простоте реализации съёмки этот метод СДЦ требует формирования узкой диаграммы направленности антенны с низким уровнем боковых лепестков, что выливается в отдельную сложную техническую задачу. Кроме того, метод плохо работает при обнаружении малоподвижных объектов и не обеспечивает обнаружение-измерение высокоскоростных объектов из-за ограничения на максимальное значение частоты повторения зондирующего сигнала [4].

Более качественные результаты по оценке скорости наземных ДО могут быть получены с использованием моноимпульсной системы СДЦ или метода СДЦ с остановленным фазовым центром [2, 4, 5]. Принцип селекции движущихся объектов в РСА с моноимпульсной антенной основывается на различном доплеровском смещении частоты движущегося и неподвижного объектов, находящихся в одной точке пространства. Для подавления сигналов фона или неподвижного объекта, имеющего ту же частоту, что и сигнал движущегося объекта, применяется разностная диаграмма направленности, равносигнальное направление которой направлено на неподвижный объект [2, 4]. В системе СДЦ с остановленным фазовым центром используется интерферометр с разнесёнными антеннами либо приёмная антенна с фазовыми центрами, которые разнесены вдоль линии пути носителя РСА. Одним из наиболее распространённых вариантов методов СДЦ с остановленной фазой является метод продольной интерферометрии [5, 6].

Методы радиолокационной интерферометрии положены также в основу реализации метода СДЦ по тангенциальной скорости [7]. Такая селекция в многоканальных РСА, как правило, не требует осуществления специальных режимов работы, а реализуется дополнительными алгоритмами обработки радиоголограмм или комплексных радиолокационных изобра-

жений (РЛИ) [5, 8–10]. Принцип реализации режима СДЦ по тангенциальной составляющей скорости основан на формировании динамического фазового портрета, который представляет собой РЛИ, интенсивность каждой точки которого пропорциональна разности фаз сигналов двух разнесённых во времени и/или пространстве каналах РСА соответствующего участка земной поверхности [5].

Следует отметить, что интерферометрические РСА обладают высокой информативностью [8] и применяются в задачах, например, оценки рельефа местности [11], изменений объектов, смещений земной поверхности [8–14].

Применение в авиационных системах землеобзора двухканальных РСА интерферометрического типа позволяет [1, 2] обеспечить обнаружение и измерение углового положения сигналов наземных ДО. В данной работе для подавления фона в виде отражений от земной поверхности используются фазовые различия сигналов в двух каналах секционированной апертуры антенны РСА.

Цель работы — рассмотреть модель сигналов двухканальных авиационных РСА при наблюдении движущихся на земной поверхности объектов, получить оптимальные по критерию максимального правдоподобия интерферометрические алгоритмы оценивания радиальной скорости движущихся объектов и измерения их координат

Модель сигнала РСА интерферометра

На рис. 1 представлена плановая схема обзора земной поверхности авиационной РСА с движущимся объектом на ней с использованием двух приёмных антенн (подрешёток), разнесённых в пространстве по азимуту на величину d_f (расстояние между фазовыми центрами). Облучение поверхности когерентной электромагнитной волной (ЭМВ) с длиной волны λ осуществляется в импульсном режиме через период зондирования T_p единым ан-

тенным полотном размером: $d = 2d_f$. Носитель РСА движется со скоростью V на высоте H . Наблюдение за участком земной поверхности на дальности R_0 и азимуте α_0 (центр зоны) осуществляется в телескопическом режиме [1–3] некоторое время $t = -T_c/2 \dots + T_c/2$, где T_c — время синтезирования. На схеме (рис. 1) представлены в одном строке дальности движущейся объект с координатами: (R_0, α_0) , сигнал от которого за счёт собственного движения перемещается по частоте и суммируется с сигналом от неподвижного фона.

Движение объекта в системе координат YOX определяется вектором скорости V_0 и углом ϕ_0 относительно линии визирования «ДО — носитель РСА».

Движение объекта рассматривается относительно вектора скорости движения носителя: модуль скорости V_0 и угол ϕ_0 относительного движения объекта. Первый из определяющих параметров может быть разложен на радиальную $v_{r0} \approx v_0 \cos(\phi_0)$ и тангенциальную $v_{\tau 0} \approx v_0 \sin(\phi_0)$ составляющие (см. рис. 1).

Траекторные сигналы двух пространственных каналов РСА-интерферометра одного независимого m -го строка дальности при наблюдении ДО и неподвижного фона можно представить в виде суммы:

$$\begin{aligned} \xi_{m1}(t) &= s_{m\phi 1}(t) + s_{m\delta 1}(t) + n_{m1}(t), \\ \xi_{m2}(t) &= s_{m\phi 2}(t) + s_{m\delta 2}(t) + n_{m2}(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $n_{m1,2}(t)$ — реализации мешающих белых гауссовских шумов [1, 2] наблюдения двух независимых приёмных каналов, имеющих одинаковую спектральную плотность N_0 .

Для описания отражений от земной поверхности воспользуемся функцией радиолокационного рассеяния (РЛР) [4, 5] e_{mn} , представляемой в виде дискретной матрицы, каждый m, n -й элемент которой, определяется как

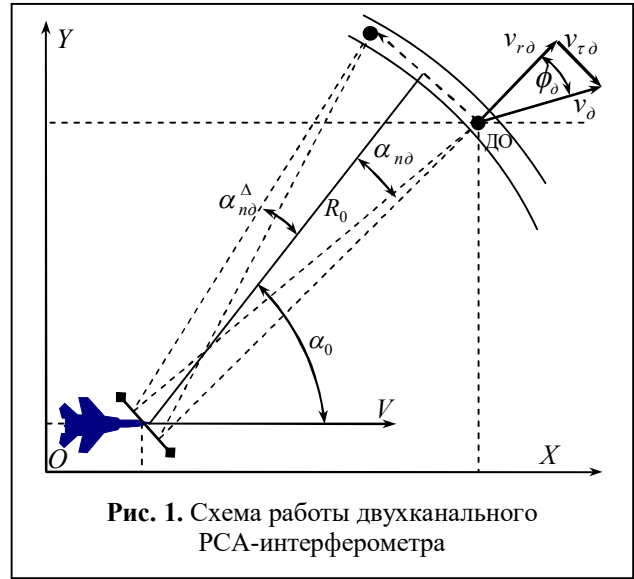


Рис. 1. Схема работы двухканального РСА-интерферометра

среднее на площадке пространственного разбиения размером $\delta_x \times \delta_y$, где δ_y — разрешение в направлении дальности и δ_x — линейная разрешающая способность в ортогональном (азимутальном) направлении. Модуль каждого элемента функции РЛР пропорционален корню квадратному из значения удельной эффективной поверхности отражения и пространственной разрешающей способности, а фаза определяется свойствами поверхности, условиями полёта и наблюдения.

Объект будем считать точечным по сравнению с элементом разрешения и воспользуемся тем условием, что движение на интервале синтезирования не приводит к значительным искажениям сигнала (выполнение этого условия достигается за счёт согласования разрешающей способности РСА и предполагаемой скорости движения объекта), поэтому составляющие принимаемого сигнала можем записать в виде:

$$\begin{aligned} s_{m\phi 1}(t) &= \sum_n e_{mn\phi} G_{uzl} G_{1n} \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} r_n(t) \right\}, \\ s_{m\delta 1}(t) &= e_{m\delta} G_{uzl} G_{1n\delta} \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} (r_{n\delta}(t) + v_{r0}t) \right\}, \\ s_{m\phi 2}(t) &= \sum_n e_{mn\phi} G_{uzl} G_{2n} \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} r_n(t) \right\}, \end{aligned}$$

$$s_{m\Delta}(t) = e_{m\Delta} G_{изл} G_{2n\Delta} \exp\left\{j \frac{4\pi}{\lambda} (r_{n\Delta}(t) + v_{r\Delta} t)\right\}$$

— принимаемые сигналы от неподвижного фона и ДО,

$$G_{1n} = G(\alpha_n) \exp(j \frac{\pi}{2\lambda} d_f \sin(\alpha_n)),$$

$$G_{1n\Delta} = G(\alpha_{n\Delta}) \exp(j \frac{\pi}{2\lambda} d_f \sin(\alpha_{n\Delta})),$$

$$G_{2n} = G(\alpha_n) \exp(-j \frac{\pi}{2\lambda} d_f \sin(\alpha_n)),$$

$$G_{2n\Delta} = G(\alpha_{n\Delta}) \exp(-j \frac{\pi}{2\lambda} d_f \sin(\alpha_{n\Delta}))$$

— комплексные коэффициенты усиления первой и второй подрешёток относительно неподвижного фона и ДО. Здесь $G_{изл}$ — коэффициент усиления антенны на излучение; $\alpha_{n\Delta} = \alpha_n + \Delta$ — кажущееся положение ДО по азимуту; $\alpha_{n\Delta}$ — истинный азимут,

$\Delta \approx \frac{v_{r\Delta}}{V \sin(\alpha_0)}$ — азимутальное смещение;

$r_n(t) \approx V \sin(\alpha_0) \alpha_n t$ — изменение дальности (считаем, что изменение дальности относительно центра зоны точно известно); $r_{n\Delta}^\Delta(t) \approx V \sin(\alpha_0) \alpha_{n\Delta} t = r_n(t) + v_{r\Delta} t$, $\alpha_n = \delta \alpha_n$;

$\delta \alpha \approx \frac{\delta x}{R_0}$; δx — линейная разрешающая способность по азимуту; $\alpha_n = \delta \alpha_n$, $\delta \alpha \approx \delta x / R_0$.

Оценка радиальной скорости

Оценка радиальной скорости оптимальная по некоторому критерию качества должна быть сформирована по принимаемым сигналам на фоне собственных шумов приёмных каналов, при наличии отражений от неподвижной земной поверхности в соответствии с теорией оценивания статистической радиотехники [15–17].

При решении различных задач радиолокационного комплекса к выбору критерия предъявляются противоречивые требования. Кроме того, этот критерий должен быть удобен для математических преобразований [15]. Для слу-

чая, когда о наблюдаемой величине не известно ничего, кроме условного закона распределения результата наблюдения, для нахождения оптимальной оценки целесообразно воспользоваться методом максимального правдоподобия.

Пусть имеется уравнение наблюдения вида (1) и известен функционал плотности вероятностей шума наблюдения. Все задачи синтеза основаны на единой базе теории оптимальной фильтрации в основном для ситуации приёма радиосигналов на фоне широкополосных помех типа белого гауссовского шума. В этом частном случае функционал плотности вероятностей имеет вид

$$F\{n(t)\} = C \cdot \exp\left\{-\frac{1}{N_0} \int_0^{T_c} |n(t)|^2 dt\right\}, \quad (2)$$

где C — множитель, независимый от оцениваемых параметров; T_c — время наблюдения сигнала.

Заменой переменных найдём аналитическое выражение для функционала условной плотности вероятности

$$F\{\xi_m(t) | v_{r\Delta}\} = C \exp\left\{-\frac{1}{N_0} \int_0^T |\xi_m(t) - s_m(t, v_{r\Delta})|^2 dt\right\}, \quad (3)$$

где $s_m(t, v_{r\Delta}) = s_{m\phi}(t) + s_{m\Delta}(t)$.

В соответствии с критерием максимального правдоподобия наиболее близким является то значение $\hat{v}_{r\Delta}$, при котором функция правдоподобия траекторного сигнала оказывается максимальной

$$\frac{d}{dv_r} \ln F\{\xi_m(t) | v_r\} |_{v_r = \hat{v}_r} = 0, \quad (4)$$

где $F\{\xi_m(t) | v_r\}$ рассматривается как условный функционал плотности распределения вероятности траекторного сигнала на входе РСА.

Если подставить аналитическое выражение для функционала плотности вероятности (3) в выражение (4) и преобразовать подынтегральную функцию, то уравнение правдоподобия при получении оптимальной оценки параметра $v_{r\Delta}$ принимает вид:

$$\frac{d}{dv_r} \frac{1}{N_0} \int_T \left\{ \xi_m^*(t) s_m^*(t, \hat{v}_r) + \xi_m(t) s_m(t, \hat{v}_r) \right\} dt \Big|_{v_r = \hat{v}_r} = 0. \quad (5)$$

Для формирования модели сигналов $s_m^*(t, \hat{v}_r)$, например для второго независимого канала, воспользуемся оценкой функции РЛР, представленной в [1, 2] для одного приёмного канала,

$$\hat{e}_n = \frac{1}{G_{1n}} \int_T \xi_{1m}(t) \exp \left\{ -\frac{4\pi}{\lambda} V \sin(\alpha_0) \alpha_n t \right\} dt.$$

При $n = n_{\Delta}$ имеем $\hat{e}_n = \hat{e}_{\phi n} + \frac{G_{n\Delta}}{G_{n\Delta}} \hat{e}_\Delta$. В

остальных случаях $\hat{e}_n = \hat{e}_{\phi n}$.

Если $G(\alpha_{n\Delta}) \approx G(\alpha_{n\Delta})$:

$$\begin{aligned} \hat{e}_{1n\Delta} &\approx e_{\phi n\Delta} + e_\Delta \exp(j\delta\varphi_\Delta), \\ \hat{e}_{2n\Delta} &\approx e_{\phi n\Delta} + e_\Delta \exp(-j\delta\varphi_\Delta), \end{aligned} \quad (5)$$

где $\delta\varphi_\Delta = \frac{\pi}{2\lambda} d_f \cos(\alpha_{n\Delta}) \frac{v_{r\Delta}}{V_r}$.

В этом случае можно записать:

$$\begin{aligned} &\frac{d}{dv_r} \left[\sum_n \hat{e}_{1n} \frac{1}{G_{2n}^*} \int_T \left\{ \xi_{2m}^*(t) \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} r_n(t) \right\} \right\} dt + \right. \\ &\left. + \sum_n \hat{e}_{1n}^* \frac{1}{G_{2n}} \int_T \left\{ \xi_{2m}(t) \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} r_n(t) \right\} \right\} dt \right] \Big|_{v_r = \hat{v}_r} = 0, \end{aligned}$$

и преобразовать к виду:

$$\frac{d}{dv_{r\Delta}} \left[\sum_n \hat{e}_{1n}^* \hat{e}_{2n} + \sum_n \hat{e}_{1n} \hat{e}_{2n}^* \right] \Big|_{v_r = \hat{v}_r} = 0.$$

Только при условии $n = n_{\Delta}$ каждая из оставшихся производных не равна нулю (считаем, что в одном строке дальности только один движущийся объект):

$$\begin{aligned} &\left[\exp(j\delta\varphi_\Delta) [e_\Delta \hat{e}_{2n\Delta}^* + \hat{e}_{1n\Delta}^* e_\Delta] - \right. \\ &\left. - \exp(-j\delta\varphi_\Delta) [e_\Delta \hat{e}_{2n\Delta} + \hat{e}_{1n\Delta} e_\Delta] \right] \Big|_{v_r = \hat{v}_r} = 0. \end{aligned}$$

Используя выражения (5), получим определяющее соотношение

$$e_\Delta = (\hat{e}_{1n\Delta} - \hat{e}_{2n\Delta}) / (\sin(\delta\varphi_\Delta) 2j),$$

поэтому:

$$\begin{aligned} \exp\{j2\delta\varphi_\Delta\} &= \left[(\hat{e}_{1n\Delta} - \hat{e}_{2n\Delta})^* \hat{e}_{2n\Delta} - \hat{e}_{1n\Delta} (\hat{e}_{2n\Delta}^* - \hat{e}_{1n\Delta}^*) \right] \times \\ &\times \frac{1}{\left[(\hat{e}_{1n\Delta}^* - \hat{e}_{2n\Delta}^*) \hat{e}_{2n\Delta} - \hat{e}_{1n\Delta} (\hat{e}_{2n\Delta} - \hat{e}_{1n\Delta}) \right]}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\Delta\varphi_{n\Delta} = \frac{\pi}{2\lambda} d_f \sin(\alpha_{n\Delta})$.

Используя (6) можно определить оценку радиальной скорости движущегося объекта с компенсацией отражений от земной поверхности:

$$\begin{aligned} \hat{v}_{r\Delta} &= \frac{\lambda V \sin(\alpha_0)}{\pi d_f \cos(\alpha_{n\Delta})} \times \\ &\times \arg \left[(\hat{e}_{1n\Delta} - \hat{e}_{2n\Delta})^* \hat{e}_{2n\Delta} - \hat{e}_{1n\Delta} (\hat{e}_{2n\Delta}^* - \hat{e}_{1n\Delta}^*) \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Синтез оптимального алгоритма (6) проводился при условии, что в m -ой полоске дальности и n -ом доплеровском фильтре присутствует сигнал от движущегося объекта. На самом деле, частота и дальность могут быть любые, поэтому оценивая $\hat{v}_{r\Delta}$ для всех элементов, решается задача обнаружения при обоснованном (из точности оценивания радиальной скорости) выборе порога.

Отметим также особенности алгоритма (7). Анализ показывает, что вначале производится фазовая коррекция двух комплексных РЛИ двух независимых пространственных каналов, с тем условием, чтобы при их вычитании компенсировался неподвижный фон, который определяющим образом влияет на работу обнаружителя и измерителя малоразмерных движущихся объектов.

Точность оценивания радиальной скорости

Под потенциальной точностью оценивания параметра сигнала понимают [15, 17] минимальное значение среднеквадратической ошибки, которое определяется из соотношения Рао — Крамера:

$$\sigma_{vr\delta\min} = \sqrt{\frac{1}{M \left\{ \frac{d^2}{dv_{r\delta}^2} \ln F[\xi_m(t) | v_{r\delta}] \right\}}} \approx \frac{\lambda V}{\pi d_f} \sqrt{\frac{N_0}{2 \cos(2\delta\phi_0) |e_\delta|^2}},$$

поскольку $\cos(\alpha_{n\delta}) \approx 1$ и $M\{\dot{e}_\delta e_\delta^*\} = 0$.

На рис. 2 представлена зависимость потенциальной точности оценивания радиальной скорости ДО от азимутального угла наблюдения. Видим, что при малых азимутальных углах наблюдения потенциальная точность оценивания радиальной скорости значительно выше.

Конечно же, реальная точность будет отличаться и не в лучшую сторону, но даже если реально точность будет в 1,5..2 раза ниже, это 0,6...2 м/с. Особенно следует подчеркнуть то, что эти цифры достижимы для медленно движущихся (радиальная скорость 2...10 м/с), малоразмерных объектов на фоне отражений от пересечённой местности.

Для восстановления истинного азимута движущегося объекта воспользуемся известным [2, 3] соотношением:

$$\alpha_{n\delta} = \alpha_{n\delta}^\Delta + \frac{\hat{v}_{r\delta}}{V \sin(\alpha_0)}.$$

При определённых выше параметрах авиационного РСА-интерферометра потенциальная точность восстановления азимута составляет 0,1...0,2°. Точность измерения радиальной скорости и азимута движущихся объектов можно значительно повысить за счёт повторяемости наблюдений и фильтрации.

Таким образом, в работе была обоснована модель относительного движения объекта, траекторного сигнала двухканального интерферометра, получены оптимальные алгоритмы оценивания по критерию максимального правдоподобия его радиальной скорости, произведена оценка потенциальной точности измерения радиальной скорости и восстановленного азимутального положения.

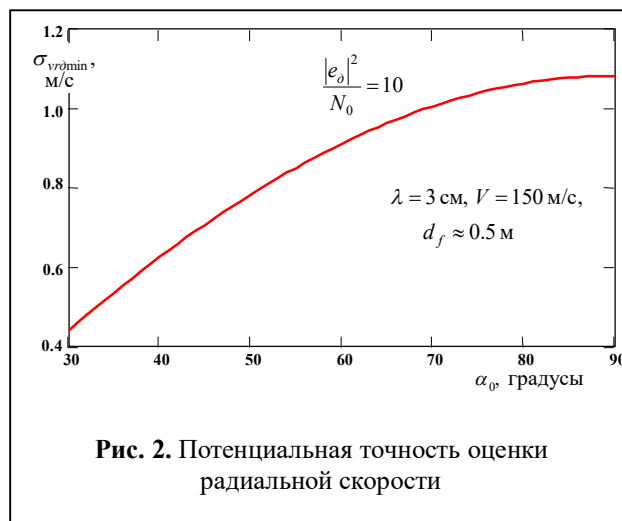


Рис. 2. Потенциальная точность оценки радиальной скорости

Литература

1. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В.И. 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. 530 с.
4. Авиационные системы радиовидения / Под ред. Г.С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2015. 648 с.
5. Вербя В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук Э.Г. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В.С. Вербя. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
6. Бабокин М.И., Цветков О.Е. Алгоритмы интерферометрической обработки сигналов РСА при идентификации движущихся объектов // Радиотехника. №10. 2012. С. 87–92.
7. Khratov K.K., Tolstov E.F., Kostrov V.V. The Tangential Velocity Estimation Algorithm for Spaceborne SAR // Journal of Physics: Conference Series. MPRSRWPD 2021. 1991 (2021) 012021. IOP Publishing. DOI:10.1088/1742-6596/1991/1/012021.
8. 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.
9. Бабокин М.И., Зайцев С.Э. Фазовое наблюдение за движением объектов космическим комплексом «Кондор-ФКА» // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2021. № 4 (27). С. 4–14.

лекоммуникационные системы. 2018. № 2 (30). С. 26–34.

10. *Бабокин М.И., Толстов Е.Ф.* Фазовое портретирование в многоканальных РСА // VI Всероссийские Армадовские чтения: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред. Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2016. С. 287–297.

11. *Сосновский А.В.* Интерферометрическая обработка данных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой при создании цифровых моделей рельефа земной поверхности: состояние и проблемы // Ural Radio Engineering Journal. 2020; № 4(2). Pp. 198–233. DOI: 10.15826/urej.2020.4.2.004.

12. *Бабокин М.И., Ефимов А.В., Стёпин В.Г.* Фазовый мониторинг динамических процессов с помощью авиационных комплексов РСА // VIII Всероссийские Армадовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2018. С. 423–428.

13. *Бабокин М.И.* Измерение сдвигов земной поверхности в комплексах дистанционного зондирования Земли // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. № 8. С. 25–34.

14. *Бабокин М.И., Ефимов А.В., Зайцев С.Э., Костров В.В.* Обнаружение сдвигов земной поверхности с помощью РСА интерферометра при переднебоковом обзоре // VII Всероссийские Армадовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2017. С. 101–111.

15. *Тихонов В.И., Харисов В.Н.* Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М.: Радио и связь, 2004. 608 с.

16. *Тихонов В.И.* Оптимальный приём сигналов. М.: Радио и связь, 1983. 320 с.

17. Марковская теория оценивания в радиотехнике / Под ред. *М.С. Ярлыкова*. М.: Радиотехника, 2004. 505 с.

Поступила 21 сентября 2021 г.

English

OPTIMAL SAR-INTERFEROMETER ESTIMATION OF THE RADIAL VELOCITY OF GROUND MOVING OBJECTS BY THE MAXIMUM LIKELIHOOD METHOD

Mikhail Ivanovich Babokin – Grand Dr. in Engineering, Leading Research Associate, JSC “RIIE named after V.V. Tikhomirov”¹.

E-mail: m.baboki57@mail.ru

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

E-mail: vitalii.stepin@mail.ru

Victor Vasilyevich Kostrov — Grand Dr. in Engineering, Professor of Radio Engineering Department, Murom Institute (branch) “Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletovs”².

E-mail: vyk@mit.ru

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

²*Address:* 602264, Russian Federation, Vladimir Region, Murom, Orlovskaya st., 23.

Abstract: The article discusses generation of signals reflected from moving targets and their co-processing in dual-channel airborne SAR (synthetic aperture radar). Antenna system mouth of the radar in question is divided into two segments, each of which has its own receiver. Probing signal emission is performed simultaneously from each sub-aperture (sub-array) or standalone transmitting antenna. Mathematical model of flight path signal is obtained, which is presented as output response of each channel for a moving target and static background. Synthesis of optimal algorithms of interferometric processing of paired signals was done upon detection and estimation of radial velocity of small-size moving targets by maximum likelihood method in case of reflections from static land surface. The ratio was obtained to calculate radial velocity of moving target, in which basic operations are phase correction of integrated radar images and subsequent noise compensation of static background. Estimation of possible measurement accuracy of radial speed is performed based on Rao-Cramer inequality. It was made clear that achievable measurement accuracy of radial speed can be 0.6 ... 1 m/s. The ratio is given to calculate renewed azimuthal position, which includes radial velocity estimation of moving target and navigation parameters of SAR carrier. Calculations showed that achievable average mean square error of azimuth renewal is not more than 0.2 degrees when using the proposed velocity

estimation algorithm. Therefore, the paper validated the model of target relative movement, flight path signal of dual-channel interferometer; there were obtained optimal algorithms for its radial velocity estimation by maximum likelihood criterion, and evaluation of achievable measurement accuracy and renewed azimuthal position was performed.

Keywords: synthetic aperture radar (SAR), interferometer processing, moving object, optimal algorithms.

References

1. *Antipov V.I., Goryainov V.T., Kulin A.N.*, et al. Radar stations with digital synthesis of the antenna aperture. 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. *Shkolny L.A.*, et al. Radar systems of aerial reconnaissance, decoding of radar images: a textbook for cadets of the VVIA named after Professor N.Ye. Zhukovsky. Moscow: VVIA named after Professor N.Ye. Zhukovsky, 2008. 530 p.
4. Aviation radio vision systems. Ed. by *G.S. Kondratenkov*. Moscow: Radiotekhnika, 2015. 648 p.
5. *Verba V.S., Neronskiy L.B., Osipov I.G., Turuk E.G.* Space-based ground survey radar systems. Ed. by *V.S. Verba*. Moscow: Radiotekhnika, 2010. 680 p.
6. *Babokin M.I., Tsvetkov O.E.* Algorithms for interferometer processing of SAR signals for identifying moving objects. Radiotekhnika. No. 10. 2012. Pp.87–92.
7. *Khramov K.K., Tolstov E.F., Kostrov V.V.* The Tangential Velocity Estimation Algorithm for Space-borne SAR. Journal of Physics: Conference Series. MPRSRWPD 2021. 1991 (2021) 012021. IOP Publishing. DOI:10.1088/1742-6596/1991/1/012021.
8. *Babokin M.I., Tolstov E.F., Kostrov V.V.* Phase portrait in space-borne SAR of radio vision. Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy. 2017. № 4 (27). Pp.4–14.
9. *Babokin M.I., Zaitsev S.E.* Phase observation of the movement of objects by the space complex "Kondor-FKA". Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy. 2018. No. 2 (30). Pp. 26–34.
10. *Babokin M.I., Tolstov E.F.* Phase portrait in multi channel SAR. VI All-Russian Armand readings: Radio-physical methods in remote sensing of environment. 2016. Murom: MI VISU, 2016. Pp. 287–297.
11. *Sosnovsky A.V.* InSAR data processing in digital elevation models creating tasks: state-of-art and issues. Ural Radio Engineering Journal. 2020; No. 4(2). Pp. 198–233. DOI: 10.15826/urej.2020.4.2.004.
12. *Babokin M.I., Efimov A.V., Stepin V.G.* Phase monitoring of dynamic processes using SAR aircraft SAR systems. Proc. VIII All-Russian open Armand readings: Modern problems of remote sensing, radar and wave diffraction. 2018. Murom: MI VISU, 2018. Pp. 423–428.
13. *Babokin M.I.* Measurement of shifts of the Earth's surface in Earth remote sensing complexes. Informacionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy. 2010. No. 8. Pp. 25–34.
14. *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. 2017. Murom: MI VISU, 2017. Pp. 101–111.
15. *Tikhonov V.I., Kharisov V.N.* Statistical analysis and synthesis of radio engineering devices and systems. Moscow: Radio i svyaz, 2004. 608 p.
16. *Tikhonov V.I.* Optimal signal reception. Moscow: Radio i svyaz, 1983. 320 p.
17. Markov theory of estimation in radio engineering. Ed. by *M.S. Yarlykov*. Moscow: Radiotekhnika, 2004. 505 p.