

**М.В. Балабан¹, Ю.В. Гончаренко², В.Н. Горобец¹,
Ф.В. Кивва¹, А.Л. Коворотный¹, Г. Фаркухарсон³**

¹Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: vgorobets777@gmail.com

²Microwave Systems Laboratory, Colorado State University, Fort Collins, CO 80523, USA

³Air-Sea Interaction and Remote Sensing Department, Applied Physics Laboratory,
University of Washington, Seattle, WA 98105, USA

Модификация алгоритма обратного проецирования для повышения вероятности обнаружения движущихся целей при обработке данных РСА

***Предмет и цель работы.** Статья посвящена получению и обработке радиолокационных изображений (РЛИ) радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА). Целью работы является модификация известного алгоритма обратного проецирования (АОП) во временной области, который используется для создания РЛИ РСА, путем коррекции угла обзора радара на этапе обработки.*

***Методы и методология работы.** Для достижения поставленной цели использовались методы математического моделирования. Результаты моделирования сравнивались с данными экспериментальных исследований.*

***Результаты работы.** Предложена модификация алгоритма обратного проецирования, который позволяет детектировать быстродвижущиеся цели на стационарном РЛИ РСА скошенного бокового обзора. На примере экспериментальных данных, полученных для быстроходного катера, показано, что использование АОП с коррекцией сквинт-угла (squintangle) позволяет получить РЛИ с сигнатурами быстродвижущихся целей в тех случаях, когда они не видны на РЛИ при обработке данных классическим АОП.*

***Заключение.** Предложенная модификация алгоритма позволяет повысить вероятность детектирования быстродвижущихся целей на РЛИ без усложнения классического АОП и дополнительных затрат времени на вычисления. Ил. 7. Библиогр.: 19 назв.*

***Ключевые слова:** радиолокатор с синтезированной апертурой, радиолокационное изображение, алгоритм обратного проецирования, движущаяся цель.*

За последние десятилетия успехи в развитии твердотельной электроники, а так же методов и средств радиолокации стационарных и движущихся объектов, привели к разработке и созданию малогабаритных бортовых радиолокационных станций с синтезированной апертурой (РСА) обнаружения, измерения координат и распознавания параметров окружающей среды и объектов в ней. Такие системы нашли широкое применение в решении задач навигации, сельского хозяйства, метеорологии, экологии и др. В качестве носителей в РСА системах

используются искусственные спутники Земли, самолеты, шары-зонды, корабли, а также стационарные наземные и морские носители приемников излучений. Теоретической базой для их разработки стали основополагающие работы классиков радиолокации, основанные на анализе принципа неопределенности применительно к системам, параметры которых ограничены во времени и пространстве. Стало очевидным, что известные противоречия между возможностями непрерывных и импульсных сигналов, обладающих равными энергиями,

можно преодолеть путем расширения базы сигналов, а угловую разрешающую способность систем – путем синтеза апертуры.

Изначально технология РСА была разработана для мониторинга и дистанционного зондирования поверхности Земли и расположенных на ней стационарных объектов с высоким разрешением. Основные успехи в этом направлении были достигнуты в картографировании земной поверхности и, как следствие, в повышении эффективности воздушной и космической разведки.

Дальнейшее развитие технологии обработки радиолокационных сигналов позволило проводить визуализацию и позиционирование наземных движущихся целей, что привлекло к РСА внимание как в гражданских, так и в военных сферах [1, 2].

Бортовые РСА формируют радиолокационное изображение (РЛИ) путем когерентной обработки сигналов, отраженных от подстилающей поверхности и объектов на ней. В результате такой обработки образы движущихся объектов на синтезированном изображении оказываются смазанными, расфокусированными и смещенными относительно истинного положения на сцене [3]. Несмотря на это использование РСА для обнаружения и распознавания подвижных объектов нашло широкое применение в системах воздушного и космического базирования. При этом решение задачи обнаружения объектов в большинстве случаев переносится на этап обработки сигналов радаров и изображений.

За последнее время разработано несколько алгоритмов формирования РЛИ по необработанным данным радаров [4–6]. Многие из них включают в себя задачу обнаружения движущихся объектов [7–10].

Алгоритм обратного проецирования (АОП) и его модификации [11–14] относятся к алгоритмам формирования изображений из необработанных данных РСА. Основным недостатком АОП является большой объем вычислений, поэтому большинство модификаций направлено на увеличение их быстродействия.

Одним из возможных подходов к детектированию движущихся целей с помощью АОП является метод, основанный на использовании предварительной информации о скорости и на-

правлении движения цели при синтезе опорного сигнала [15]. Принципиально иным является подход, который заключается в двухэтапной обработке «сырых» данных с введением поправочных коэффициентов на втором этапе. Расчет таких коэффициентов выполняется по результатам обработки данных на первом этапе [16]. Первый метод, помимо использования априорной информации о траектории и скорости цели, предполагает внесение определенных изменений в АОП. Второй метод также предполагает некоторые изменения АОП при обработке данных на втором этапе. По сравнению с первым методом, он более универсальный, но в большей мере вычислительно затратный.

Целью настоящей работы является модификация классического АОП во временной области, который используется для создания РЛИ РСА скошенного бокового обзора, путем введения коррекции угла обзора радара (коррекции диаграммы направленности) на этапе синтеза опорного сигнала, что позволяет повысить вероятность детектирования быстро движущихся целей на РЛИ без усложнения классического АОП и дополнительных затрат времени на вычисления.

1. Алгоритм обратного проецирования.

Различают два типа алгоритмов обратного проецирования – в частотной и временной областях. В этой работе для обработки «сырых» радиолокационных данных используется АОП во временной области. Суть этого алгоритма заключается в поиске соответствий между накопленными и опорными данными, синтезированными алгоритмом. Этот алгоритм хорошо подходит для обработки локационных данных самолетных РСА (малые высоты, нелинейность траектории полета носителя). Для синтеза опорных данных используются траекторные данные инерциальной навигационной системы и цифровой карты высот рассеивателей [11].

Фактически, алгоритм поиска соответствий является алгоритмом расчета коэффициентов взаимной корреляции между реально накопленным сигналом и опорным сигналом, синтезированным для каждой из точек интересующей (осматриваемой) области. При этом принято считать, что как накопленный, так и синтезированный сигналы являются функциями быстрого (характеризующего время распространения

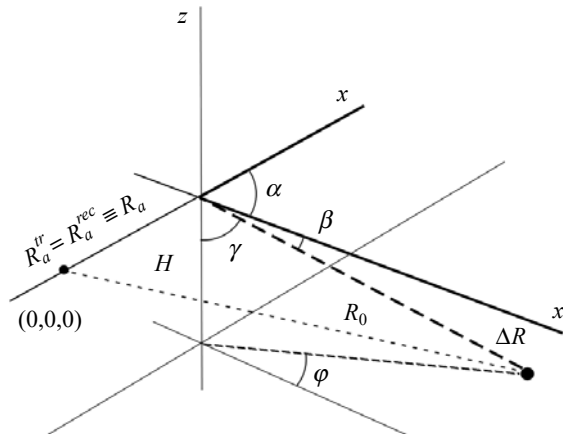


Рис. 1. Геометрия РСА скошенного бокового обзора

импульса) и медленного (связанного с движением РСА вдоль траектории полета) времен. Следовательно, расчет коэффициента взаимной корреляции производится в двумерном пространстве изменений этих параметров.

Математическая модель описанного выше алгоритма может быть сформулирована следующим образом.

Рассмотрим декартову систему координат с началом координат в некоторой точке пространства $(0,0,0)$ (рис. 1). Положим, что координаты передающей антенны заданы радиусом-вектором \vec{R}_a^{tr} , а координаты приемной антенны – радиусом-вектором \vec{R}_a^{rec} .

Предположим, что в передатчике сформирован линейно-частотно-модулированный (ЛЧМ) сигнал следующего вида [17]:

$$s(\eta, t) = \exp(-i(2\pi f_0 t + \pi k_r t^2)), \quad (1)$$

где f_0 – стартовая частота ЛЧМ-импульса; k_r – параметр, определяющий девиацию частоты; η и t – медленное и быстрое время, соответственно.

Сигнал, отраженный от одиночного отражателя, расположенного в точке с радиусом-вектором \vec{R} , после демодуляции на приемнике будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} S_{\vec{R}}(\eta, t) &= s_{\vec{R}}(\eta, t) \cdot s(\eta, t)^* = \\ &= A_{\vec{R}}(\eta, t) \sigma_{\vec{R}} \exp(i(2\pi k_r \tau_{\vec{R}}(\eta, t)t - \\ &- \pi k_r \tau_{\vec{R}}(\eta, t)^2 + 2\pi f_0 \tau_{\vec{R}}(\eta, t))), \end{aligned} \quad (2)$$

где $A_{\vec{R}}(\eta, t)$ – амплитудная функция, зависящая от расстояния до одиночного отражателя, угла

падения и диаграмм направленности передающей и приемной антенн; $\sigma_{\vec{R}}$ – эффективная поверхность рассеяния цели; $\tau_{\vec{R}}(\eta, t)$ – функция времени распространения в обоих направлениях (от антенны передатчика до точки рассеяния и обратно к антенне приемника), определяемая как

$$\tau_{\vec{R}}(\eta, \tau) = \frac{|\vec{R}_a^{tr}(\eta, \tau) - \vec{R}| + |\vec{R}_a^{rec}(\eta, \tau) - \vec{R}|}{c_0},$$

где c_0 – скорость света в свободном пространстве.

Тогда демодулированный сигнал, отраженный от всех точек рассматриваемой области как функция быстрого и медленного времени, определяется следующим выражением:

$$S(\eta, t) = \int_{\Omega} S_{\vec{R}}(\eta, t) d\vec{R}. \quad (3)$$

Для реконструкции РЛИ вычислим корреляционную функцию в каждой из точек рассматриваемой области по следующей формуле:

$$\begin{aligned} \sigma(\vec{R}) &= I(\vec{R}) = \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} \int_0^{t_{chirp}} w(\eta_n, t) S(\eta_n, t) \cdot C_{\vec{R}}^*(\eta_n, t) dt, \\ \vec{R} &\in \Omega, \end{aligned} \quad (4)$$

где t_{chirp} – длительность каждого импульса; N – количество импульсов в накопленных данных; $C_{\vec{R}}(\eta, t)$ – синтезированный по формуле (2) опорный сигнал; $w(\eta, t)$ – оконная функция, необходимая для устранения скачков сигнала на границе области.

Следует отметить, что наличие амплитудной функции $A_{\vec{R}}(\eta, t)$ в выражении (2) фактически определяет количество импульсов, которые следует учитывать при расчете РЛИ по формуле (4). Действительно, функция $C_{\vec{R}}(\eta, t)$ для заданного радиуса-вектора \vec{R} отлична от нуля в определенный временной интервал $\eta_n \in [\eta_{\vec{R},C}^{start}, \eta_{\vec{R},C}^{stop}]$. В тоже время совпадение опорного сигнала с реальным сигналом следует ожидать лишь для тех точек траектории самолета, для которых \vec{R} лежит в области «освещенной» радаром (принадлежит следу диаграммы направленности антенной системы радара), т. е. для временных отсчетов

$\eta_n \in [\eta_{\bar{R},S}^{start}, \eta_{\bar{R},S}^{stop}]$. И, следовательно, для расчета $\sigma(\bar{R})$ следует выбирать лишь те η_n , которые принадлежат $[\eta_{\bar{R},S}^{start}, \eta_{\bar{R},S}^{stop}] \cap [\eta_{\bar{R},C}^{start}, \eta_{\bar{R},C}^{stop}]$. Из этого, в частности, следует тривиальное замечание, что для синтеза опорного сигнала желательно использовать данные инерциальной навигационной системы и цифровой карты высот рассеивателей с максимально возможной точностью. Из анализа выражений (2) и (4) также следует, что для получения максимального расчетного значения $\sigma(\bar{R})$ необходимо, чтобы частоты (как функции быстрого и медленного времени) реального и опорного сигналов совпадали.

2. Теоретическая оценка азимутального смещения для движущейся цели. Как было отмечено выше, технология РСА разработана для мониторинга и дистанционного зондирования с высоким разрешением поверхности Земли и расположенных на ней стационарных объектов. При обработке накопленных данных с АОП и построении опорного сигнала также используется допущение стационарности каждой из точек рассматриваемой области. Поэтому для стационарных объектов синтезированный опорный сигнал в теории совпадает с сигналом в накопленных данных. Следовательно, при расчете функции $\sigma(\bar{R})$ должно удовлетворяться условие совпадения доплеровских частот и скорости совпадения доплеровской частоты реального и опорного сигналов, а также условие совпадения времен $[\eta_{\bar{R},S}^{start}, \eta_{\bar{R},S}^{stop}] = [\eta_{\bar{R},C}^{start}, \eta_{\bar{R},C}^{stop}]$. В реальности для стационарных объектов ввиду различных погрешностей в данных (погрешности работы измерительной аппаратуры, модели высот поверхности и пр.) не удается добиться полного совпадения как доплеровских частот и скорости совпадения доплеровской частоты, так и временных интервалов. Это приводит к размытию РЛИ (преимущественно, в допустимых пределах).

Обнаружение произвольно движущихся объектов на земной или морской поверхности с помощью РСА – достаточно трудная задача. Ее основная трудность заключается в обнаружении и распознавании сигнатуры такой цели на РЛИ. Это не всегда удается и причиной этому, как правило, является некогерентность сиг-

нала в накопленных данных (наличие в сигнале шумов, помех и пр.), а также неоптимальные методы обработки накопленных «сырых» данных. В случае использования алгоритма обратного проецирования, последнее, как правило, связано с несовпадением опорного сигнала с реальным сигналом от подвижного объекта, что, как следствие, приводит к размытию и смещению образа цели на РЛИ [11].

Получим оценку для смещения образа движущейся цели на РЛИ в азимутальном направлении. Для упрощения расчетов пренебрегаем изменением доплеровской частоты в быстром времени, т. е. рассмотрим работу РСА при так называемом «*stop-and-hope*» допущении. Также предположим, что приемная и передающая антенны РСА совмещены в пространстве в каждый момент времени ($\bar{R}_a^{tr} = \bar{R}_a^{rec} \equiv \bar{R}_a$) (рис. 1).

Пусть \bar{R}_a^0 – радиус-вектор антенной системы РСА в начальный момент времени; \bar{R}^0 – радиус-вектор позиции цели в начальный момент времени; $\bar{v}_a = (0, v_y^a, 0)$ и $\bar{v} = (v_x^t, v_y^t, v_z^t)$ – постоянные векторы скоростей носителя (самолета) и цели соответственно; при этом вектор $\Delta \bar{R}^0 = \bar{R}^0 - \bar{R}_a^0$. Зададим уравнения движения антенной системы и цели следующим образом:

$$\bar{R}_a(\eta) = \bar{R}_a^0 + \bar{v}_a \eta,$$

$$\bar{R}(\eta) = \bar{R}^0 + \bar{v} \eta.$$

Найдем асимптотическое выражение для расстояния между самолетом и целью как функции медленного времени для малых значений времени:

$$\begin{aligned}
 |\Delta \bar{R}(\eta)| &= |\bar{R}(\eta) - \bar{R}_a(\eta)| = |\Delta \bar{R}^0 + (\bar{v} - \bar{v}_a) \eta| \cong \\
 &\cong |\Delta \bar{R}^0| \times \\
 &\times \left(1 + \frac{\langle (\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma), (v_x, v_y - v_y^a, v_z) \rangle}{|\Delta \bar{R}^0|} \eta \right),
 \end{aligned} \tag{5}$$

где $\cos \alpha = \Delta R_x^0 / |\Delta \bar{R}^0|$, $\cos \beta = \Delta R_y^0 / |\Delta \bar{R}^0|$ и $\cos \gamma = \Delta R_z^0 / |\Delta \bar{R}^0|$ – направляющие косинусы вектора $\Delta \bar{R}^0$.

Отметим, что в случае, когда цель неподвижна ($\bar{v} = \vec{0}$), выражение для изменения расстоя-

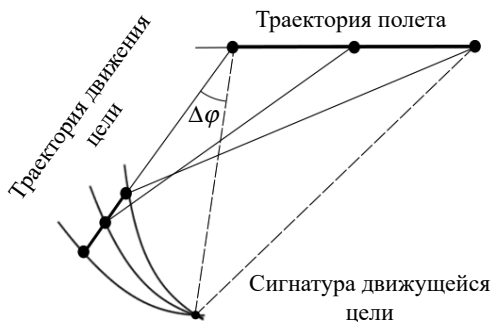


Рис. 2. Смещение отклика радиально движущейся цели от истинного положения на РЛИ

ния выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}
 |\Delta \bar{R}(\eta)| &= |\Delta \bar{R}^0| \times \\
 &\times \left(1 + \frac{\langle (\cos \bar{\alpha}, \cos \bar{\beta}, \cos \bar{\gamma}), (0, -v_y^a, 0) \rangle}{|\Delta \bar{R}^0|} \eta \right) = \\
 &= |\Delta \bar{R}^0| \left(1 - \frac{v_y^a \eta}{|\Delta \bar{R}^0|} \right). \quad (6)
 \end{aligned}$$

Как было отмечено выше, для стационарной цели смещения сигнатуры на РЛИ не возникает. Исходя из выражений (5) и (6), можно заключить, что задача поиска аналитического выражения для оценки смещения образа движущейся цели может быть переформулирована следующим образом: требуется найти новые значения направляющих углов $(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \bar{\gamma})$ некоторого вектора $\Delta \bar{R}^0$, для которых выполняется полиномиальное равенство

$$\begin{aligned}
 &\left[\langle (\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma), (v_x, v_y - v_y^a, v_z) \rangle - \right. \\
 &\left. - \langle (\cos \bar{\alpha}, \cos \bar{\beta}, \cos \bar{\gamma}), (0, -v_y^a, 0) \rangle \right] \eta + \\
 &+ \left[|\Delta \bar{R}^0| - |\Delta \bar{R}^0| \right] = 0. \quad (7)
 \end{aligned}$$

Приравняв свободный член левой части уравнения к нулю, получим $|\Delta \bar{R}^0| = |\Delta \bar{R}^0|$ и, следовательно, в предположении, что рельеф местности идеально горизонтален, получим $\bar{\gamma} = \gamma$. Приравняв к нулю выражение при первой степени η в левой части (7), получим следующее выражение:

$$\begin{aligned}
 \cos \bar{\beta} &= \cos \beta - (v_x / v_y^a) \cos \alpha - (v_y / v_y^a) \cos \beta - \\
 &- (v_z / v_y^a) \cos \gamma = \cos \beta - \frac{\langle \vec{v}, \vec{n}_{\Delta \bar{R}^0} \rangle}{|\vec{v}_a|}. \quad (8)
 \end{aligned}$$

Выражение для $\cos \bar{\alpha}$ следует из тождества для направляющих косинусов и может быть записано в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 \cos \bar{\alpha} &= \pm \sqrt{1 - \cos^2 \bar{\beta} - \cos^2 \bar{\gamma}} = \\
 &= \pm \sqrt{1 - \left(\cos \beta - \frac{\langle \vec{v}, \vec{n}_{\Delta \bar{R}^0} \rangle}{|\vec{v}_a|} \right)^2 - \cos^2 \gamma}. \quad (9)
 \end{aligned}$$

Фактически выражения (8) и (9) являются трансцендентными уравнениями для искомых величин $(\bar{\alpha}, \bar{\beta})$. Отметим также, что по тройке $(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \bar{\gamma})$ направляющих углов вектора $\Delta \bar{R}^0$, а также его длине, можно однозначно восстановить координаты «эквивалентной» (для заданной прямолинейно движущейся цели) стационарной точки на РЛИ и, следовательно, определить угол ее азимутального смещения.

Полученные выражения (8) и (9) несколько громоздки и, следовательно, не всегда удобны для практического использования. В результате несложных математических преобразований можно получить, что

$$\sin \bar{\varphi} = \sin \varphi - \frac{\langle \vec{v}, \vec{n}_{\Delta \bar{R}^0} \rangle}{|\vec{v}_a|}, \quad (10)$$

где φ – азимутальный угол направления на цель в момент времени начала визирования цели; $\bar{\varphi}$ – азимутальный угол направления на стационарный «эквивалент» цели в тот же момент времени.

Следовательно, угол смещения цели в азимутальном направлении может быть в первом приближении рассчитан по следующей формуле:

$$\Delta \varphi = \varphi - \arcsin \left(\sin \varphi - \frac{\langle \vec{v}, \vec{n}_{\Delta \bar{R}^0} \rangle}{|\vec{v}_a|} \right). \quad (11)$$

Это широко известное соотношение [10], которое представляет интерес с практической точки зрения и позволяет в первом приближении оценить угол смещения сигнатуры реальной движущейся цели в азимутальном направлении.

Иллюстрацией к полученной формуле служит рис. 2, на котором схематически приведена точечная цель, движущаяся в радиальном направлении, а также ее РСА-сигнатура, смещенная вверх по азимуту на угол $\Delta \varphi$.

3. Настройка АОП для обнаружения движущихся целей. При наличии у движущейся цели ненулевой радиальной составляющей скорости наблюдается смещение сигнатуры цели на РЛИ в азимутальном направлении. При относительно небольших скоростях движения цели такое смещение является пренебрежимо мало, однако для высокоскоростных целей можно наблюдать существенное смещение и ослабление интенсивности (вплоть до исчезновения) сигнатуры цели на РЛИ. Эффект ослабления интенсивности, как правило, наблюдается в РСА-системах с достаточно узкой диаграммой направленности в азимутальной плоскости и связан с уменьшением времени когерентной обработки сигнала. На рис. 3 приведена схема, иллюстрирующая расхождение интервалов наблюдения быстро движущейся в радиальном направлении цели и эквивалентной ей точки на РЛИ.

В рассматриваемом случае интервалы реального и синтезированного треков самолета, соответствующие временным интервалам $[\eta_{R,S}^{start}, \eta_{R,S}^{stop}]$ и $[\eta_{R,C}^{start}, \eta_{R,C}^{stop}]$, не пересекаются. Это означает, что в подобном случае, при обработке реальных данных с помощью описанного выше алгоритма обратного проецирования, сигнатура быстро движущейся (в радиальном направлении) цели наблюдаться не будет, несмотря на то, что сигнал отклика от такой цели содержится в накопленных данных. Использование стандартного АОП приводит к тому, что сигнал отклика от быстро движущихся (в радиальном направлении) целей «отфильтровывается» в процессе обработки. При этом возникает вопрос, возможна ли определенная модификация алгоритма обратного проецирования, которая позволит использовать его для детектирования быстро движущихся целей. Для ответа на этот вопрос рассмотрим алгоритм формирования опорного сигнала $C_{\vec{R}}(\eta, t)$ более детально.

В процессе обработки накопленных данных, для формирования опорного сигнала используется выражение вида (2), где $A_{\vec{R}}(\eta, t)$ – амплитудная функция расстояния, заданная с учетом диаграммы направленности антенной системы РСА. Для упрощения рассуждений предположим, что антенная система имеет секторальную диаграмму направленности с

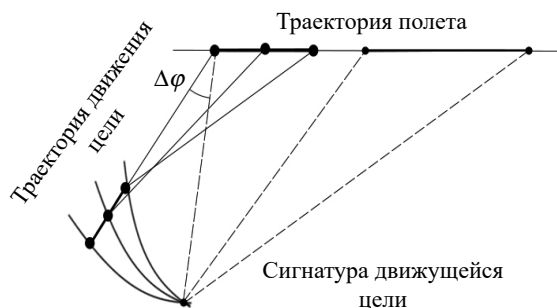


Рис. 3. Расхождение интервалов наблюдения быстро движущейся в радиальном направлении цели и эквивалентной ей точки на РЛИ

угловой шириной сектора обзора в азимутальной плоскости $\Delta\varphi_{squint}^{proc}$ и основным направлением обзора φ_{squint}^{proc} . Тогда формально функция $A_{\vec{R}}(\eta, t)$ также зависит от этих параметров, т. е. $A_{\vec{R}}(\eta, t) = A_{\vec{R}}(\varphi_{squint}^{proc}, \Delta\varphi_{squint}^{proc}, \eta, t)$.

Отметим, что изменение параметров φ_{squint}^{proc} и $\Delta\varphi_{squint}^{proc}$ приводит к смещению временного интервала $[\eta_{R,C}^{start}, \eta_{R,C}^{stop}]$ (времени ненулевого отклика от точечной цели, расположенной в точке с радиусом-вектором \vec{R} в синтезированном опорном сигнале) вдоль временной шкалы медленного времени и изменению его длины. Следовательно, путем изменения параметров φ_{squint}^{proc} и $\Delta\varphi_{squint}^{proc}$ возможно осуществлять «настройку» временного интервала $[\eta_{R,C}^{start}, \eta_{R,C}^{stop}]$, добиваясь его полного совпадения с любым желаемым (наперед заданным) интервалом. Именно это позволяет модифицировать алгоритм обратного проецирования и настроить его на детектирование быстро движущихся целей, добившись полного совпадения временных интервалов $[\eta_{R,S}^{start}, \eta_{R,S}^{stop}]$ и $[\eta_{R,C}^{start}, \eta_{R,C}^{stop}]$.

Ниже приведена одна из возможных схем расчета значений параметров φ_{squint}^{proc} и $\Delta\varphi_{squint}^{proc}$ алгоритма обратного проецирования для обработки сырых данных и получения РЛИ быстро движущихся целей в предположении прямолинейного равномерного движения самолета и цели. Для получения РЛИ следует выполнить следующие шаги:

1. Задать параметр радарной системы φ_{squint}^{radar} и определить угол между векторами скоростей движения самолета и цели $\Delta\alpha_{head}$.

2. Определить величину отношения радиальной составляющей скорости цели к курсовой

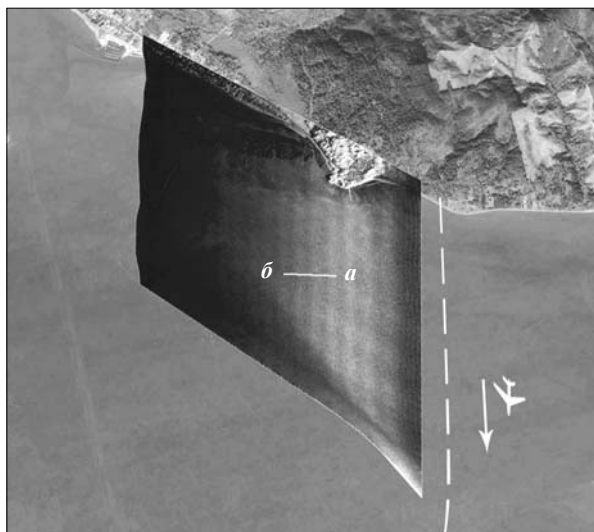


Рис. 4. РЛИ, наложенное на графическую модель поверхности Земли (дельта реки Колумбия)

скорости самолета:

$$V_{ratio}^{radial} = \frac{|\vec{v}^{target}|}{|\vec{v}^{radar}|} \times \cos(\Delta\alpha_{head} - \varphi_{squint}^{radar} + \pi/2). \quad (12)$$

3. Рассчитать значение угла φ_{squint}^{estim} по формуле

$$\varphi_{squint}^{estim} = \arcsin(\sin \varphi_{squint}^{radar} - V_{ratio}^{radial}). \quad (13)$$

4. Обработать накопленные «сырые» данные с помощью алгоритма обратного проецирования со следующими параметрами: $\varphi_{squint}^{proc} = \varphi_{squint}^{estim}$, $\Delta\varphi_{squint}^{proc} = \Delta\varphi_{squint}^{radar}$.

Отметим, что предложенная схема не является оптимальной, так как добиться полного совпадения временных интервалов $[\eta_{R,S}^{start}, \eta_{R,S}^{stop}]$ и $[\eta_{R,C}^{start}, \eta_{R,C}^{stop}]$ без изменения (пересчета и подстройки) параметра $\Delta\varphi_{squint}^{proc}$ невозможно. Также следует отметить, что формула (13) для расчета φ_{squint}^{estim} получена из выражения (10) и, следовательно, при ряде ограничений. Отметим, что при расчете угловых параметров алгоритма обратного проецирования тангенциальная составляющая скорости не учитывается. Фактически наличие ненулевой тангенциальной составляющей приводит к «размазыванию» сигнатуры цели на РЛИ в тангенциальном направлении.

5. Применение модифицированного АОП для получения РЛИ быстро движущихся целей. Для демонстрации преимуществ исполь-

зования модифицированного АОП при обработке накопленных «сырых» данных от быстро движущейся цели воспользуемся данными, полученными во время экспериментальных исследований, проведенных 20–25 июля 2016 г. в дельте реки Колумбия, США (штат Орегон). В качестве надводной цели использовался высокоскоростной катер, выполняющий движение под различными (заранее заданными) курсовыми углами и с различными скоростями. Корпус катера изготовлен из стеклопластика, что делает эффективную поверхность рассеяния (ЭПР) катера относительно небольшой. Для измерения положения и скорости лодки с частотой до 10 Гц на катере установлен GPS-приемник (*Garmin GLO*).

Сбор данных производился с помощью двух малогабаритных двухлучевых продольных интерферометрических РСА сантиметрового диапазона с двумя антенными системами (переднебокового и заднебокового обзора), установленными на самолете *Cessna-172*.

Подробные технические характеристики РСА и методики эксперимента приведены в работах [18, 19]. Следует отметить, что угол между перпендикуляром к траектории полета самолета и осью главного лепестка диаграммы направленности антенн (*squint angle*) составляет: для заднебокового обзора – $(\varphi_{squint}^{radar}, \theta_{squint}^{radar}) = (-30^\circ, 120^\circ)$, для переднебокового обзора – $(\varphi_{squint}^{radar}, \theta_{squint}^{radar}) = (30^\circ, 120^\circ)$.

Для обработки смоделированных данных было использовано программное обеспечение по обработке данных интерферометрического РСА, разработанное компанией *Artemis Inc.*, со стандартными предустановками. По результатам обработки данных можно выделить три типа изображений РСА:

1. Сигнатура судна видна как на мощностных, так и на интерферометрических фазовых изображениях (по крайней мере, для одной из радиолокационных систем – переднего или заднего обзора).

2. Сигнатура судна видна только на интерферометрическом фазовом изображении.

3. Сигнатура судна не видна ни на одном изображении.

Нашей целью является реализовать предлагаемую идею для третьего случая и показать

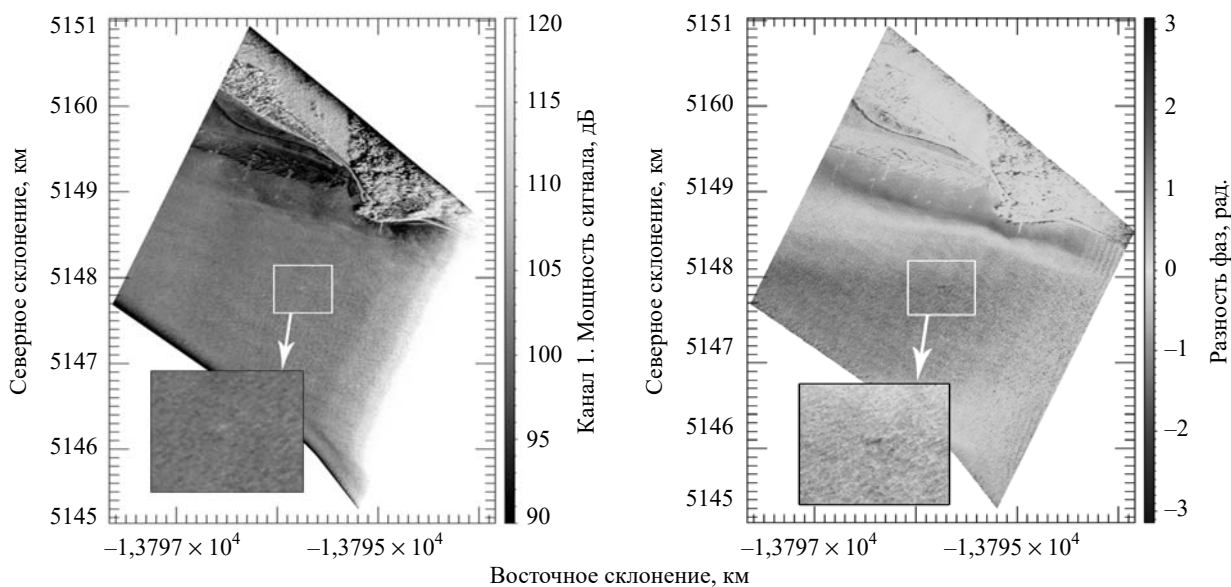


Рис. 5. РЛИ мощностного и интерферометрического каналов (в децибелах) РСА переднебокового обзора ($\varphi_{squint}^{proc} = -30^\circ$, $\Delta\varphi_{squint}^{proc} = 7^\circ$)

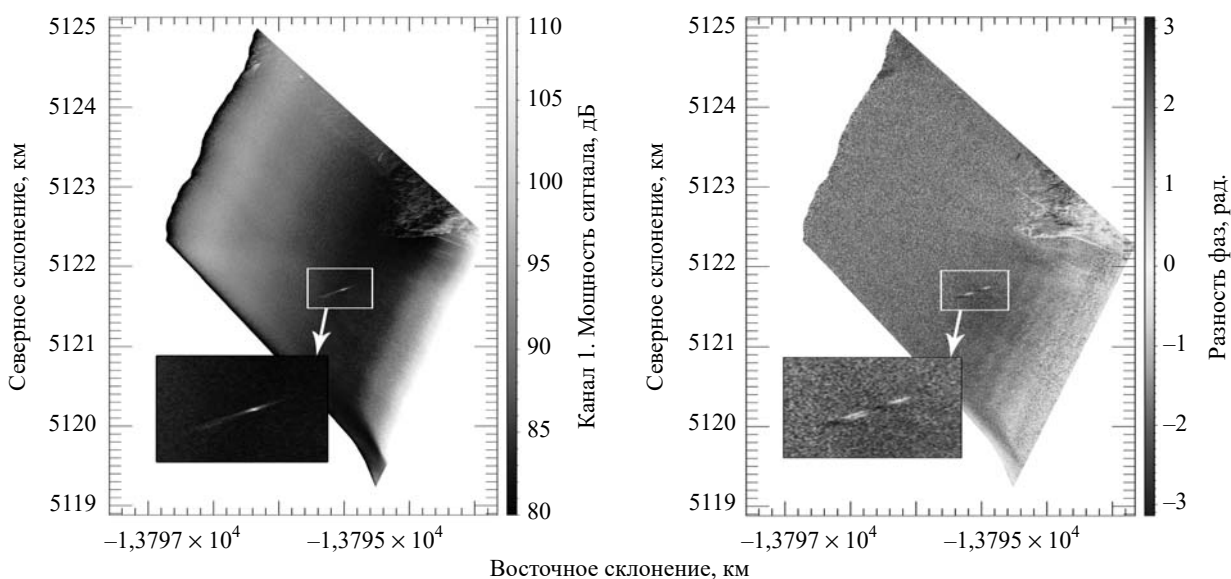


Рис. 6. РЛИ мощностного и интерферометрического каналов (в децибелах) РСА переднебокового обзора ($\varphi_{squint}^{proc} = -39,18^\circ$, $\Delta\varphi_{squint}^{proc} = 7^\circ$)

возможность обнаружения движущейся цели для каждого из РЛИ мощностного и интерферометрического каналов.

На рис. 4 приведен результат обработки накопленных данных с помощью алгоритма обратного проецирования с использованием реальных значений угловых параметров антенной системы $\varphi_{squint}^{proc} = \varphi_{squint}^{radar} = -30^\circ$ и $\Delta\varphi_{squint}^{proc} = \Delta\varphi_{squint}^{radar} = 7^\circ$. РСА-изображение, полученное для системы с заднебоковым обзором,

наложено на графическую модель поверхности Земли. На изображении также приведен трек самолета (белая пунктирная линия) и трек катера (отрезок ba), движущегося со средней скоростью $|\vec{v}^{target}| = 8,13$ м/с. При этом скорость движения самолета $|\vec{v}^{radar}| = 51,34$ м/с, а угол между векторами скоростей движения самолета и катера $\Delta\alpha_{head} = -86,32^\circ$.

Верхняя часть изображения содержит сигнатуры стационарных отражателей, расположен-

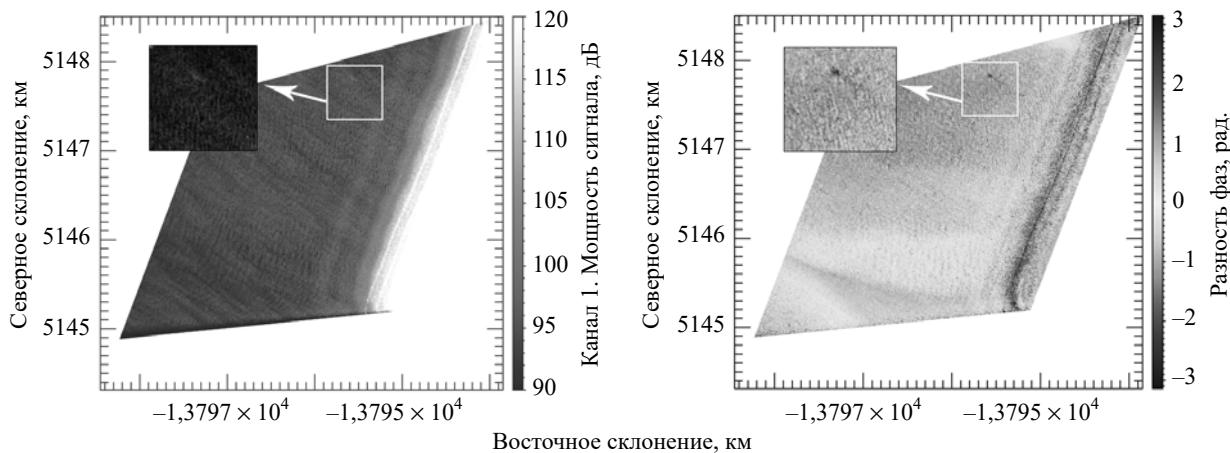


Рис. 7. РЛИ мощностного и интерферометрического каналов (в децибелах) РСА переднебокового обзора ($\varphi_{sloant}^{proc} = 30^\circ$, $\Delta\varphi_{sloant}^{proc} = 7^\circ$)

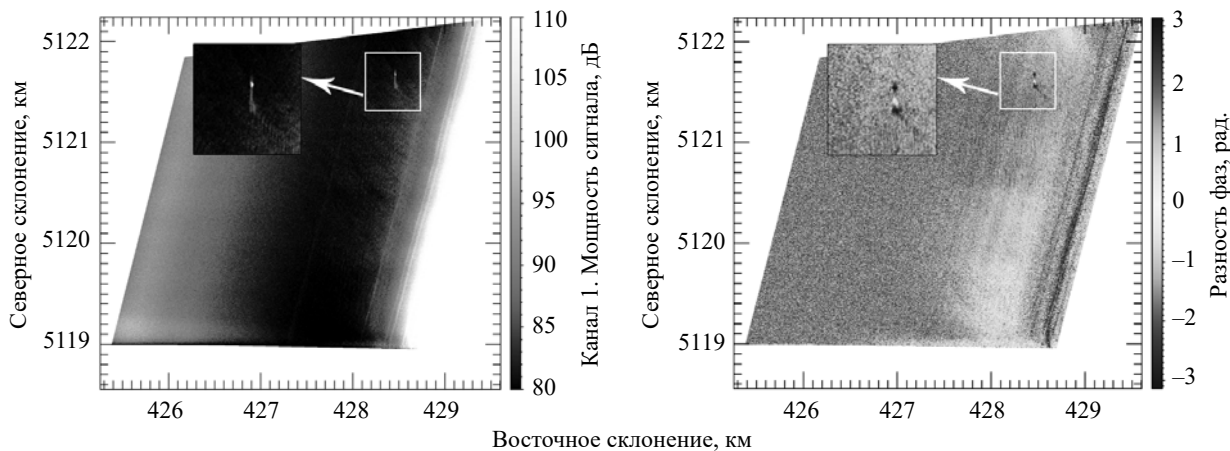


Рис. 8. РЛИ мощностного и интерферометрического каналов (в децибелах) РСА переднебокового обзора ($\varphi_{sloant}^{proc} = 20,98^\circ$, $\Delta\varphi_{sloant}^{proc} = 7^\circ$)

ных на холмистой поверхности. Достаточно четко видны образы деревьев и построек, освещенных со стороны трека самолета. В тоже время сигнатура движущегося катера на РЛИ отсутствует.

На рис. 5 приведены РЛИ одного из мощностных каналов (в децибелах), а также интерферометрического канала для рассматриваемого случая ($\varphi_{sloant}^{proc} = -30^\circ$, $\Delta\varphi_{sloant}^{proc} = 7^\circ$).

Для получения РСА-изображений быстро движущихся целей с помощью модифицированного АОП был проведен пересчет значений угловых параметров согласно вышеизложенной методике. В результате были получены следующие значения: $\varphi_{sloant}^{proc} = -39,18^\circ$, $\Delta\varphi_{sloant}^{proc} = 7^\circ$.

На рис. 6 приведены РЛИ одного из мощностных каналов и интерферометрического ка-

нала, полученные после обработки с расчетными значениями тех же данных, что и для изображений рис. 5. Как следует из рис. 6, в этом случае сигнатура катера видна отчетливо, в то же время сигнатуры стационарных целей отсутствуют или искажены.

Аналогично рис. 5, 6, полученным для заднебокового обзора, были построены РЛИ для переднебокового обзора для тех же треков катера и самолета. На рис. 7 приведены РЛИ мощностного и интерферометрического каналов при обработке с реальными значениями угловых параметров $\varphi_{sloant}^{proc} = 30^\circ$, $\Delta\varphi_{sloant}^{proc} = 7^\circ$.

На рис. 8 приведены РЛИ мощностного и интерферометрического каналов при обработке с расчетными значениями угловых параметров $\varphi_{sloant}^{proc} = 20,98^\circ$, $\Delta\varphi_{sloant}^{proc} = 7^\circ$.

Анализ РЛИ, приведенных на рис. 5–8, позволяет сделать вывод, что обработка «сырых» данных с использованием АОБ с расчетными значениями углового параметра $\varphi_{squint}^{proc} = \varphi_{squint}^{estim}$ и реальным значением углового параметра $\Delta\varphi_{squint}^{proc} = \Delta\varphi_{squint}^{radar}$ является предпочтительной при получении сигнатур быстро движущихся целей. Отметим, что в ходе работы была проведена обработка всех полученных в результате полевых измерений данных, как с реальным значением $\varphi_{squint}^{proc} = \varphi_{squint}^{radar}$, так и расчетными значениями $\varphi_{squint}^{proc} = \varphi_{squint}^{estim}$.

Как было отмечено выше, при обработке данных с помощью АОП с реальным значением $\varphi_{squint}^{proc} = \varphi_{squint}^{radar}$ сигнатура быстро движущейся цели на РСА-изображении наблюдалась не во всех случаях.

Использование расчетного значения $\varphi_{squint}^{proc} = \varphi_{squint}^{estim}$ при обработке позволило получить сигнатуру быстро движущейся цели на обоих РЛИ как мощностного, так и интерферометрического каналов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Неронский Л.Б., Михайлов В.Ф., Брагин И.В. *Микроволновая аппаратура дистанционного зондирования поверхности Земли и атмосферы. Радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны*. Учебное пособие. СПб.: СПбГУАП, 1999. 220 с.
2. Верба В.С. *Радиолокационные системы землеобзора космического базирования*. Под ред. В.С. Вербы. Москва: Радиотехника, 2010. 680 с.
3. Ranney R.K. Synthetic aperture imaging radar and moving targets. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* 1971. Vol. 7, Iss. 3. P. 499–505. DOI: 10.1109/TAES.1971.310292.
4. Cumming I.G., Wong F.W. *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*. Boston: ArtechHaus, 2005. 625 p.
5. Stringham C., Long D.G. Improved processing of the CASIE SAR data. *Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS)*, (Vancouver, Canada, 24–29 July 2011). IEEE, 2011. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6049325> (Last accessed: 28.10.2019).
6. Raney R.K., Runge H., Bamler R., Cumming I.G., Wong F.H. Precision SAR processing using chirp scaling. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1994. Vol. 32, Iss. 4. P. 786–799. DOI: 10.1109/36.298008.
7. Farina A. STAP for SAR. Military Application of Space-Time Adaptive Processing. Report: ADA415645. 2002. 23 p. URL: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/p014042.pdf> (Last accessed: 28.10.2019).
8. D'Addio E., Di Bisceglie M., Bottalico S. Detection of moving objects with airborne SAR. *Signal Process.* 1994. Vol. 36, Iss. 2. P. 149–162. DOI: 10.1016/0165-1684(94)90204-6.
9. Безвесильный А.А., Безвесильный А.А., Кочетов Б.А. Обнаружение движущихся целей с помощью многовзглядового одноантенного радиолокатора с синтезированной апертурой. *Радиофизика и электрон.* 2013. Т. 4(18), № 3. С. 37–46.
10. Hélène Oriot. Moving Target Detection on SAR Images. URL: <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Educational%20Notes/STO-EN-SET-191-2014/EN-SET-191-2014-07.pdf> (Last accessed: 28.10.2019).
11. Duersch M.I. *Backprojection for Synthetic Aperture Radar*. 2013. PhD. Brigham Young University. URL: https://www.mers.byu.edu/docs/thesis/phddiss_duersch.pdf (Last accessed: 28.10.2019).
12. Pettersson M.I. Detection of moving targets in wideband SAR. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* 2004. Vol. 40, Iss. 3. P. 780–796. DOI: 10.1109/TAES.2004.1337454.
13. Yegulalp A.F. Fast backprojection algorithm for synthetic aperture radar. *Proc. 1999 IEEE Radar Conf. Radar into the Next Millennium* (Waltham, MA, USA, 22–22 April 1999). IEEE, 1999. DOI: 10.1109/NRC.1999.767270.
14. Ulander L.M.H., Hellsten H., Stenstrom G. Synthetic-aperture radar processing using fast factorized back-projection. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* 2003. Vol. 39, Iss. 3. P. 760–776. DOI: 10.1109/TAES.2003.1238734.

15. Minardi M.J., Gorham L.A., Zelnio E.G. Ground moving target detection and tracking based on generalized SAR processing and change detection (Invited Paper). *Proc. SPIE 5808. Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XII* (Orlando, Florida, USA, 28 March – 1 April 2005). SPIE. DOI: <http://doi.org/10.1117/12.609893>.
16. Park J.-W., Kim J.H., Won J.-S. Fast and Efficient Correction of Ground Moving Targets in a Synthetic Aperture Radar, Single-Look Complex Image. *Remote Sens.* 2017. Vol. 9, Iss. 9. 926. DOI: 10.3390/rs9090926.
17. Stringham C., Long D.G. GPU Processing for UAS-Based LFM-CW Stripmap PCA. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2014. Vol. 80, Iss. 12. P. 1107–1115. DOI: 10.14358/PERS.80.12.1107.
18. Farquharson G., Widjaja D., Jessup A. A miniaturized dual-beam along-track interferometric SAR for nearshore ocean remote sensing. *IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp.* (IGARSS 2012): proc. (Munich, Germany, 22–27 July 2012). IEEE, 2012.
19. Balaban M., Farquharson G., Goncharenko Y., Gorobets V., Kovorotnyy A., Kivva F., Jessup A. Small Boat Detection with Along-Track Interferometric SAR. *2017 IEEE Radar Conf. (RadarConf.)* (Seattle, WA, USA, 8–12 May 2017). DOI: 10.1109/RADAR.2017.7944356.

Стаття надійшла 02.09.2019

REFERENCE

1. Neronkiy, L.B., Mihailov, V.F., Bragin, I.V., 1999. *Microwave equipment for earth and atmosphere remote sensing. Synthesized antenna aperture radar*. Saint-Petersburg: Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI) Publ. (in Russian).
2. Verba, V.S. ed., Neronkiy, L.B., Osipov, I.G., Turuk, V.E., 2010. *Space-borne Earth Surveillance Radar Systems*. Moscow: Radiotekhnika Publ. (in Russian).
3. Ranney, R.K., 1971. Synthetic aperture imaging radar and moving targets. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 7(3), pp. 499–505. DOI: 10.1109/TAES.1971.310292.
4. Cumming, I.G., Wong, F.W., 2005. *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*. Boston: ArtechHaus.
5. Stringham, C., Long, D.G., 2011. Improved processing of the CASIE SAR data. In: *Geoscience and Remote Sensing Symp.* (IGARSS). Vancouver, Canada, 24–29 July 2011. IEEE. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6049325> [Accessed 28 Oct. 2019].
6. Raney, R.K., Runge, H., Bamler, R., Cumming, I.G., Wong, F.H., 1994. Precision SAR processing using chirp scaling. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 32(4), pp. 786–799. DOI: 10.1109/36.298008.
7. Farina, A., 2002. STAP for SAR. In: *Military Application of Space-Time Adaptive Processing*. Report: ADA415645. [pdf] 23 p. Available from: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/p014042.pdf> [Accessed 28 Oct. 2019].
8. D’Addio E., Di Bisceglie, M., Bottalico, S., 1994. Detection of moving objects with airborne SAR. *Signal Process.*, 36(2), pp. 149–162. DOI: 10.1016/0165-1684(94)90204-6.
9. Bezvesilniy, O.O., Kochetov, B.A., 2013. Detection of moving targets by multi-look single-antenna synthetic aperture radar. *Radiophys. Electron.*, 4(18)(3), pp. 37–46 (in Russian).
10. Hélène, Oriot, 2014. *Moving Target Detection on SAR Images*. [pdf] Available from: <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Educational%20Notes/STO-EN-SET-191-2014/EN-SET-191-2014-07.pdf> [Accessed 28 Oct. 2019].
11. Duersch, M.I., 2013. Backprojection for Synthetic Aperture Radar. [pdf] PhD. *Brigham Young University*. Available from: https://www.mers.byu.edu/docs/thesis/phddiss_duersch.pdf [Accessed 28 Oct. 2019].
12. Pettersson, M.I., 2004. Detection of moving targets in wideband SAR. *IEEE Trans. on Aerospace and Electron. Syst.*, 40(3), pp. 780–796. DOI: 10.1109/TAES.2004.1337454.
13. Yegulalp, A.F., 1999. Fast backprojection algorithm for synthetic aperture radar. In: *Proc. 1999 IEEE Radar Conf. Radar into the Next Millennium*. Waltham, MA, USA, 22–22 April 1999. IEEE, 1999. DOI: 10.1109/NRC.1999.767270.
14. Ulander, L.M., Hellsten, H., Stenstrom, G., 2003. Synthetic-aperture radar processing using fast factorized back-projection. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 39(3), P. 760–776. DOI: 10.1109/TAES.2003.1238734.
15. Minardi, M.J., Gorham, L.A., Zelnio, E.G., 2005. Ground moving target detection and tracking based on generalized SAR processing and change detection (Invited Paper). In: *Proc. SPIE 5808, Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XII*. Orlando, Florida, USA, 28 March – 1 April 2005. SPIE. DOI: <http://doi.org/10.1117/12.609893>.
16. Park, J.-W., Kim, J.H., Won, J.-S., 2017. Fast and Efficient Correction of Ground Moving Targets in a Synthetic Aperture Radar, Single-Look Complex Image. *Remote Sens.*, 9(9), 926. DOI: 10.3390/rs9090926.
17. Stringham, C., Long, D.G., 2014. GPU Processing for UAS-Based LFM-CW Stripmap PCA. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 80(12), pp. 1107–1115. DOI: 10.14358/PERS.80.12.1107.
18. Farquharson, G., Widjaja, D. and Jessup, A., 2002. A miniaturized dual-beam along-track interferometric SAR for nearshore ocean remote sensing. In: *Int. Geosci. Remote Sens. Symp.* (IGARSS 2012): proc. Munich, Germany, 22–27 July 2012. IEEE.
19. Balaban, M., Farquharson, G., Goncharenko, Y., Gorobets, V., Kovorotnyy, A., Kivva, F., Jessup, A., 2017. Small Boat Detection with Along-Track Interferometric SAR. In: *2017 IEEE Radar Conf. (RadarConf.)*. Seattle, WA, USA, 8–12 May 2017. IEEE. DOI: 10.1109/RADAR.2017.7944356.

Received 02.09.2019

M.V. Balaban¹, Y.V. Goncharenko², V.M. Gorobets¹, O.L. Kovorotniy¹, F.V. Kivva¹, G. Farquharson³

¹O.Ya. Usikov IRE of NASU

12, Acad. Proskura St., Kharkov, 61085, Ukraine

²Microwave Systems Laboratory, Colorado State University, Fort Collins, CO 80523, USA

³Air-Sea Interaction and Remote Sensing Department, Applied Physics Laboratory, University of Washington, Seattle, WA 98105, USA

BACK PROJECTION ALGORITHM MODIFICATION FOR HIGHER PROBABILITY OF MOVING TARGET DETECTION IN SAR DATA PROCESSING

Subject and Purpose. The paper is concerned with Synthetic Aperture Radar (SAR) imaging and data processing and seeks to modify the conventional time-domain back projection algorithm (BPA) used for creating a SAR image. The modification consists in the radar squint-angle control at the stage of data processing.

Methods and Methodology. Mathematical modeling methods are used. The modeling results are verified by reference to the experimental data.

Results. A modification proposed for the back projection algorithm (BPA) enables fast-moving targets to be detected on a stationary image created by synthetic-aperture squint-angle side-looking radar. The back projection algorithm with the squint angle control was experimentally verified by a speedboat example to show that the SAR image has signatures of fast-moving targets which are not observed on the image formed by the classic back projection algorithm.

Conclusion. The proposed modification of the back projection algorithm improves the detection probability of fast-moving targets on a SAR image and does it without any complication of the classic back projection algorithm or additional computing time.

Key words: synthetic aperture radar, radar image, back projection algorithm, moving target.

М.В. Балабан¹, Ю.В. Гончаренко², В.М. Горобець¹, Ф.В. Ківва¹, О.Л. Коворотний¹, Г. Фаркухарсон³

¹Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України

12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна

²Microwave Systems Laboratory, Colorado State University, Fort Collins, CO 80523, USA

³Air-Sea Interaction and Remote Sensing Department, Applied Physics Laboratory, University of Washington, Seattle, WA 98105, USA

МОДИФІКАЦІЯ АЛГОРИТМУ ЗВОТНОГО ПРОЄЦІЮВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЙМОВІРНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ РУХОМИХ ЦІЛЕЙ ПРИ ОБРОБЛЕННІ ДАНИХ РСА

Предмет і мета роботи. Статтю присвячено отриманню та обробленню радіолокаційних зображень (РЛЗ) радіолокаторів із синтезованою апертурою (РСА). Метою роботи є модифікація відомого алгоритму зворотного проєціювання (АЗП) у часовій області, який використовується для створення РЛЗ РСА, шляхом корекції кута огляду радара на етапі обробки.

Методи і методологія роботи. Для досягнення поставленої мети використовувалися методи математичного моделювання. Результати моделювання порівнювалися з даними експериментальних досліджень.

Результати роботи. Запропоновано модифікацію алгоритму зворотного проєціювання, який дозволяє детектувати швидкорухомі цілі на стаціонарному РЛЗ РСА скошеного бічного огляду. На прикладі експериментальних даних, отриманих для швидкохідного катера, показано, що використання АЗП з корекцією сквінт-кута (*squintangle*) дозволяє отримати РЛЗ із сигналами швидкорухомих цілей у випадках, коли вони не видимі на РЛЗ при обробленні даних класичним АЗП.

Висновок. Запропонована модифікація алгоритму дозволяє підвищити ймовірність детектування швидкорухомих цілей на РЛЗ без ускладнення класичного АЗП і додаткових витрат часу на обчислення.

Ключові слова: радіолокатор із синтезованою апертурою, радіолокаційне зображення, алгоритм зворотного проєціювання, рухома ціль.