

А. А. Безвесильный, Б. А. Кочетов

Радиоастрономический институт НАН Украины

4, ул. Краснознаменная, Харьков, 61002, Украина

E-mail: kochetov@rian.kharkov.ua

ОБНАРУЖЕНИЕ ДВИЖУЩИХСЯ ЦЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ МНОГОВЗГЛЯДОВОГО ОДНОАНТЕННОГО РАДИОЛОКАТОРА С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

Радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА), установленные на самолетах или спутниках, позволяют получать изображения сцены с высоким пространственным разрешением. Обработка данных в таких радиолокаторах представляет собой оптимальную фильтрацию сигналов от неподвижных точечных отражателей. Сигналы, принятые от движущихся целей, обрабатываются несогласованным фильтром. Это означает, что образы движущихся целей на изображении оказываются расфокусированными и смещенными из своих истинных положений, поэтому получить информацию о движущемся объекте из обычного РСА-изображения оказывается затруднительно. Тем не менее, проблема обнаружения движущихся целей с помощью РСА является важной для многих практических приложений. Один из методов решения задачи с помощью обычного РСА с одной антенной основан на многовзглядовой обработке, под которой понимается построение нескольких изображений-взглядов одного и того же участка местности по данным, собранным на разных интервалах времени. Идея подхода заключается в том, что неподвижные цели на изображениях-взглядах сохраняют свои положения, а движущиеся цели смещаются, что позволяет отличить движущиеся цели от неподвижных. Кроме того, по смещению целей можно оценить параметры их движения. В этой работе на основе общих уравнений, описывающих процесс формирования многовзглядовых изображений во временной области, получены формулы, описывающие смещение образов движущейся цели в предположении, что цель движется с постоянным вектором скорости. Установлено, что в рамках такого подхода можно определить дальность до цели, модуль и радиальную компоненту вектора относительной скорости цели. Для нахождения истинного положения и вектора собственной скорости цели необходимо использовать дополнительную информацию, например, траекторию цели. В противном случае сохраняется неопределенность между скоростью и положением цели. Полученные теоретические результаты проиллюстрированы компьютерным моделированием. Ил. 6. Табл. 1. Библиогр.: 18 назв.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой, обнаружение движущихся целей, многовзглядовая обработка.

Основное преимущество радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) по сравнению с другими типами радаров состоит в том, что РСА позволяют получать изображения поверхности с высоким пространственным разрешением по дальности и азимуту [1–3]. По этой причине РСА получили широкое развитие и применение в системах дистанционного зондирования различного назначения: самолетного и спутникового базирования [1–6]. Все алгоритмы, разработанные для построения изображений поверхности сцены, по сути, реализуют оптимальную фильтрацию откликов от неподвижных точечных отражателей. Отклики, принятые от движущихся объектов, обрабатываются несогласованным фильтром. Это приводит к тому, что на синтезированном изображении образы движущихся объектов оказываются смазанными, расфокусированными и смещенными от своих истинных положений на сцене [7]. Таким образом, получить информацию о движущемся объекте из обычного РСА-изображения оказывается затруднительно.

Тем не менее проблема обнаружения и отображения движущихся целей на местности с помощью РСА является важной для многих приложений дистанционного зондирования, и интерес к ней не ослабевает до настоящего времени [8–17]. На сегодняшний день эту общую проблему понимают в широком смысле и разделяют на четыре отдельные задачи:

1) подавление сигнала от неподвижной сцены (для обнаружения слабых сигналов от движущихся целей);

2) обнаружение движущихся целей на полученных изображениях;

3) определение параметров движения целей и их истинных положений на местности;

4) синтез изображений движущихся объектов с высоким разрешением в истинных положениях.

Для решения первой задачи обычно применяются двухантенные РСА-системы, позволяющие эффективно подавлять сигнал от местности, используя технику антенны со смещенным фазовым центром (*displaced phase center antenna (DPCA)*) [8, 9] или метод интерферометрии вдоль линии полета (*along-track interferometry (ATI)*) [8, 9]. На сегодняшний день для РСА-систем с одной антенной не существует эффективных методов подавления сигнала от местности (задача 1), поэтому такие системы в основном применяются для обнаружения достаточно ярких движущихся целей, которые хорошо видны на фоне местности. Применительно к РСА с одной антенной задача определения параметров движения целей исследовалась многими авторами, которые использовали разные методы обработки, рассматривая отдельные частные случаи. Например, в ряде работ получены формулы, позволяющие оценить скорость движущегося объекта на РСА-изображении при условии, что цель движется медленно [10–12] или, напротив, быстро [17].

Один из методов решения задачи обнаружения движущихся целей с помощью РСА с одной антенной основан на многовзглядовой обработке [11, 12], под которой понимается построение нескольких изображений одного и того же

участка местности по данным, собранным в разные моменты времени. Идея такого подхода заключается в том, что неподвижные цели на изображениях-взглядах сохраняют свои положения, а движущиеся цели смещаются, что позволяет отличить движущиеся цели от неподвижных (задача 2). Кроме того, по смещению целей на изображениях можно оценить некоторые параметры их движения (задача 3).

Для реализации синтеза изображения движущейся цели с высоким разрешением (задача 4) требуется предварительное определение параметров движения этой цели. Эта задача относится к технике построения инверсной синтезированной апертуры [2].

В этой работе рассматриваются задачи 2 и 3 на основе общих уравнений, описывающих процесс формирования многовзглядовых изображений. В такой постановке получены общие формулы для оценки параметров движения цели. Установлено, что все параметры движения цели не могут быть однозначно определены по синтезированным изображениям, так как сохраняется неопределенность между скоростью и истинным положением цели в луче антенны. Для их однозначного определения необходимо введение некоторых дополнительных условий. Также в работе описывается математическая модель построения РСА-изображений на основе согласованного фильтра во временной области, с помощью которой проверяются и иллюстрируются полученные теоретические результаты.

1. Постановка задачи. Задача решается в правой декартовой системе координат (x, y, z) (рис. 1).

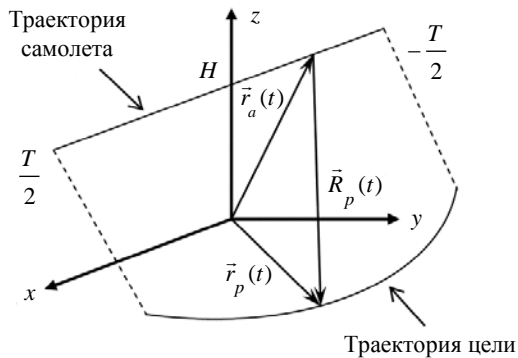


Рис. 1. Геометрия задачи

Полагается, что неподвижная радиолокационная сцена является двухмерной и лежит в плоскости $z = 0$. Самолет движется с постоянной скоростью $\vec{V}_a = (V_a, 0, 0)$ на высоте H параллельно оси x . В момент времени $t = 0$ самолет находится в точке $(0, 0, H)$. Траектория фазового центра антенны (ФЦА) задается радиус-вектором

$$\vec{r}_a(t) = \vec{r}_a + \vec{V}_a t = (V_a t, 0, H). \quad (1)$$

Для простоты интервал времени длительностью T , в течение которого ведется наблюдение сцены, выбирается симметричным относительно момента времени $t = 0$.

Положение цели на плоскости сцены в каждый момент времени задается радиус-вектором $\vec{r}_p(t) = (x_p(t), y_p(t), 0)$. В дальнейшем ограничимся случаем, когда цель за время наблюдения движется равномерно и прямолинейно со скоростью \vec{v} :

$$\vec{r}_p(t) = \vec{r}_p + \vec{v}t = (x_p + v_x t, y_p + v_y t, 0). \quad (2)$$

Вектор $\vec{r}_p = (x_p, y_p, 0)$ задает положение цели в момент времени $t = 0$. Вектор наклонной дальности $\vec{R}_p(t)$ (рис. 1) направлен из ФЦА в точку расположения движущейся цели. Используя формулы (1) и (2), получаем

$$\vec{R}_p(t) = \vec{r}_p(t) - \vec{r}_a(t) = \vec{R}_p - \vec{V}t, \quad (3)$$

где $\vec{R}_p = \vec{r}_p - \vec{r}_a = (x_p, y_p, -H)$ – вектор наклонной дальности в момент времени $t = 0$; $\vec{V} = \vec{V}_a - \vec{v} = (V_a - v_x, -v_y, 0)$ – вектор относительной скорости цели.

2. Математическая модель РСА. Рассмотрим математическую модель процесса формирования РСА-изображения поверхности сцены во временной области. Радиолокационный импульс, отраженный от цели в момент времени t и принятый радиолокатором, можно записать в виде

$$s_p(t, R) = a_p \Pi(R - R_p(t)) \exp\left(-i \frac{4\pi}{\lambda} R_p(t)\right). \quad (4)$$

Здесь a_p – амплитуда принятого сигнала; $\Pi(\cdot)$ – огибающая импульса, сжатого по дальности; λ – длина волны; i – мнимая единица; R – наклонная дальность в принятом сигнале; $R_p(t)$ – наклонная дальность до цели, которая согласно (3) равна

$$R_p(t) = |\vec{R}_p(t)| = \sqrt{R_p^2 - 2(\vec{R}_p \cdot \vec{V})t + V^2 t^2}. \quad (5)$$

Рассматриваемая цель может быть движущейся ($\vec{v} \neq 0$) или неподвижной ($\vec{v} = 0$). В описанной модели не учтено возможное изменение фазы, связанное с перемещением платформы РСА за время распространения сигнала до цели и обратно. Такое допущение в полной мере справедливо для РСА самолетного базирования.

Цифровое синтезирование апертуры антенны состоит в том, что принятые отклики когерентно сравниваются с опорной функцией, которая является откликом от неподвижного точечного отражателя, расположенного в текущей точ-

ке (x, y) на поверхности сцены, в которую направляется синтезированный луч. Такая обработка, по сути, является согласованной фильтрацией и для данных, собранных на интервале синтеза длительностью T_s с центром в момент времени t_i , описывается формулой

$$I(x, y) = \frac{1}{T_s} \int_{t_i - T_s/2}^{t_i + T_s/2} s_p(t, R(t, x, y)) \times W(t - t_i) \exp\left(i \frac{4\pi}{\lambda} R(t, x, y)\right) dt. \quad (6)$$

Время синтеза T_s определяется требуемым азимутальным разрешением. Наклонная дальность $R(t, x, y)$ – это расстояние в момент времени t от ФЦА до текущей неподвижной точки на сцене с координатами (x, y) . Эта дальность определяется исходя из геометрии задачи, показанной на рис. 1, и может быть получена из выражения (5), если учесть, что цель неподвижна ($\vec{v} = 0$) и расположена в точке (x, y) :

$$R(t, x, y) = \sqrt{x^2 + y^2 + H^2 - 2xV_a t + V_a^2 t^2}. \quad (7)$$

Закон изменения дальности (7) используется в формуле (6), во-первых, для коррекции миграции сигнала по дальности, которая состоит в том, что значения принятых импульсов $s_p(t, R)$ (4) берутся на дальности $R(t, x, y)$. Во-вторых, закон (7) применяется для коррекции фазы принятых импульсов с целью когерентного накопления. Именно выполнение этих двух условий обеспечивает формирование синтезированной апертуры. Весовое окно $W(\cdot)$ применяется для уменьшения уровня боковых лепестков диаграммы направленности синтезированной апертуры. Подставив принятый сигнал (4) в фильтр (6), получаем модель согласованного фильтра в следующем более удобном виде:

$$I(x, y) = \frac{1}{T_s} \int_{t_i - T_s/2}^{t_i + T_s/2} a_p \Pi(R(t, x, y) - R_p(t)) \times W(t - t_i) \exp\left(i \frac{4\pi}{\lambda} [R(t, x, y) - R_p(t)]\right) dt. \quad (8)$$

3. Отображение движущихся целей на синтезированном изображении. Рассмотрим случай, когда время наблюдения сцены невелико и оправдано предположение о том, что цель движется с постоянным по модулю и направлению вектором скорости. В этом случае зависимость от времени наклонной дальности от ФЦА до движущейся цели описывается выражением (5), в которое явно входят только следующие величины:

R_p – наклонная дальность до цели в момент времени $t = 0$, V – модуль вектора относительной скорости цели и $(\vec{R}_p \cdot \vec{V})$ – величина, пропорциональная радиальной компоненте вектора относительной скорости. Именно в этих величинах содержится информация о движении цели. Как будет показано далее, только эти три величины могут быть определены с помощью РСА с одной антенной без привлечения дополнительной информации о характере движения цели. Через дальность (5) можно найти зависимость мгновенной доплеровской частоты отраженного сигнала от времени

$$f_p(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \left(- \frac{4\pi}{\lambda} R_p(t) \right) = \frac{2}{\lambda} \frac{(\vec{R}_p \cdot \vec{V}) - V^2 t}{\sqrt{R_p^2 - 2(\vec{R}_p \cdot \vec{V})t + V^2 t^2}}. \quad (9)$$

При рассмотрении принятого сигнала в приближении линейной частотной модуляции (ЛЧМ) по доплеровской частоте вводится коэффициент ЛЧМ или фокусирующий коэффициент

$$\gamma_p(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2}{dt^2} \left(- \frac{4\pi}{\lambda} R_p(t) \right) = - \frac{2}{\lambda} \left[\frac{V^2}{\sqrt{R_p^2 - 2(\vec{R}_p \cdot \vec{V})t + V^2 t^2}} - \frac{(V^2 t - (\vec{R}_p \cdot \vec{V}))^2}{(R_p^2 - 2(\vec{R}_p \cdot \vec{V})t + V^2 t^2)^{3/2}} \right]. \quad (10)$$

ЛЧМ-приближение состоит в том, что дальность до цели (5) аппроксимируется разложением в ряд Тейлора в окрестности центра интервала синтеза $t = t_i$:

$$R_p(t) \approx R_p(t_i) - \frac{\lambda}{2} f_p(t_i)(t - t_i) - \frac{\lambda}{2} \gamma_p(t_i) \frac{(t - t_i)^2}{2}. \quad (11)$$

Аналогичное разложение для дальности $R(t, x, y)$ в согласованном фильтре (8) имеет вид

$$R(t, x, y) \approx R(t_i, x, y) - \frac{\lambda}{2} f(t_i, x, y)(t - t_i) - \frac{\lambda}{2} \gamma(t_i, x, y) \frac{(t - t_i)^2}{2}. \quad (12)$$

Выражения для $f(t, x, y)$ и $\gamma(t, x, y)$ можно получить из (9) и (10), если в них заменить $\vec{R}_p = (x_p, y_p, -H)$ на $\vec{R} = (x, y, -H)$ и $\vec{V} = (V_a - v_x, -v_y, 0)$ на $\vec{V}_a = (V_a, 0, 0)$.

Разложения (11) и (12) позволяют понять процесс формирования синтезированного изображения с помощью согласованного фильтра (8). Видно, что в ЛЧМ-приближении фильтр является согласованным с принятым сигналом, когда в момент времени t_i , соответствующий центру интервала синтезирования, выполнено согласование:

- 1) по дальности до цели $R_p(t_i) = R(t_i, x, y)$;
- 2) центральной доплеровской частоте $f_p(t_i) = f(t_i, x, y)$;
- 3) фокусирующему коэффициенту $\gamma_p(t_i) = \gamma(t_i, x, y)$.

Условия 1 и 2 являются сильными, так как их нарушение приводит к потере сигнала по дальности или по частоте фильтра, тогда как условие 3 является более слабым – его нарушение означает лишь расфокусировку изображения цели. Очевидно, что для неподвижной цели ($\vec{v} = 0$), расположенной в точке (x, y) , согласование выполнено по определению. Другими словами, фильтр РСА (8) является оптимальным для откликов от неподвижных целей и обрабатывает все входные сигналы, как сигналы от неподвижных целей. Если в этот фильтр попадает сигнал от точечной движущейся цели, то на выходе фильтра получаем изображение некоторой эквивалентной неподвижной точки (ЭНТ).

Из условия согласования фильтра по дальности получается, что ЭНТ будет расположена в момент времени t_i на той же дальности от центра интервала синтезирования, что и движущаяся цель в этот момент времени. Из формул (5) и (7) получаем первое уравнение для ЭНТ

$$R_p^2 - 2(\vec{R}_p \cdot \vec{V}) t_i + V^2 t_i^2 = x_{eq}^2(t_i) + y_{eq}^2(t_i) + H^2 - 2x_{eq}(t_i)V_a t_i + V_a^2 t_i^2, \quad (13)$$

где $x_{eq}(t_i)$ и $y_{eq}(t_i)$ – координаты ЭНТ, которые имеет движущаяся точечная цель на РСА-изображении, синтезированном в момент времени t_i .

Из условия согласования по доплеровской частоте и выражения (9) с учетом полученного соотношения (13) получаем второе уравнение для ЭНТ

$$(\vec{R}_p \cdot \vec{V}) - V^2 t_i = x_{eq}(t_i)V_a - V_a^2 t_i. \quad (14)$$

Условие согласования по частоте для движущейся цели (14) состоит в том, что доплеровская частота движущейся цели (левая часть (14)) зависит как от положения цели, так и от ее собственной скорости, тогда как в выражение для доплеровской частоты ЭНТ (правая часть (14)) входят только ее координаты. Это приводит к тому, что

координаты ЭНТ отличаются от истинных координат движущейся цели, чтобы «скомпенсировать» собственную скорость цели. Таким образом, на синтезированном изображении движущиеся цели оказываются смещенными из их истинных положений. Смещение происходит по дуге окружности – чтобы сохранить дальность, и по азимуту – чтобы обеспечить необходимую доплеровскую частоту.

Третье условие (согласование по фокусирующему коэффициенту) не может быть достигнуто для движущихся целей при выполнении условий (13) и (14). Действительно, формула для фокусирующего коэффициента (10) с учетом (13) и (14) приводит к равенству $V = V_a$, которое выполняется только для неподвижных целей. Это означает, что для сигналов, принятых от движущихся целей, фильтр (8) всегда будет рассогласованным по фокусирующему коэффициенту и изображения движущихся целей всегда будут расфокусированы по азимуту. Кроме того, кривая миграции (11) для движущихся целей отличается от кривой миграции (12) для ЭНТ в квадратичном слагаемом, т. е. миграция будет скомпенсирована неточно. Это означает некоторое размытие изображения движущейся цели по дальности.

Для цели, движущейся по заданному закону, можно получить «уравнения движения», описывающие перемещение ЭНТ по изображениям, синтезированным в разные моменты времени t_i , т. е. при переходе от одного взгляда к другому. Решая систему уравнений (13), (14) относительно координат ЭНТ, получаем

$$x_{eq}(t_i) = \frac{(\vec{R}_p \cdot \vec{V})}{V_a} + \left[1 - \frac{V^2}{V_a^2} \right] V_a t_i; \quad (15a)$$

$$y_{eq}(t_i) = \left(R_p^2 - H^2 - \frac{(\vec{R}_p \cdot \vec{V})^2}{V_a^2} - 2 \frac{(\vec{R}_p \cdot \vec{V})}{V_a} \left[1 - \frac{V^2}{V_a^2} \right] V_a t_i + \left[1 - \frac{V^2}{V_a^2} \right] V_a^2 t_i^2 \right)^{1/2}. \quad (15b)$$

В уравнения движения ЭНТ (15) явно входят те же три параметра R_p , $(\vec{R}_p \cdot \vec{V})$ и V , которые входят в выражение (5) для наклонной дальности для движущейся цели. Это означает, что анализируя траекторию движения ЭНТ по изображениям-взглядам, полученным в разные моменты времени, можно найти только эти три параметра движения цели. Отметим также, что для равномерно и прямолинейно движущейся цели соответствующая ей ЭНТ перемещается от одного взгляда к другому равномерно вдоль азимутального направления x и неравномерно по горизонтальной дальности y .

Если цель движется быстро, а именно если ее доплеровская частота больше, чем частота для любой неподвижной точки на дальности цели, то условие согласования фильтра по доплеровской частоте (14) не может быть выполнено и ЭНТ не может быть найдена. В уравнении траектории (15) под корнем будет получаться отрицательное значение. Такая движущаяся цель не будет видна на синтезированном изображении.

Исключив время в формулах (15), получим уравнение траектории ЭНТ

$$V^2 x_{eq}^2 - 2V_a(\vec{R}_p \cdot \vec{V})x_{eq} + (V^2 - V_a^2)y_{eq}^2 - (V^2 - V_a^2)(R_p^2 - H^2) + (\vec{R}_p \cdot \vec{V})^2 = 0. \quad (16)$$

Уравнение траектории ЭНТ (16) является плоской кривой второго порядка, хотя сама движущаяся цель перемещается вдоль прямой.

4. Определение параметров целей. Как отмечалось выше, все неподвижные цели будут иметь одинаковое и правильное положение на синтезированных изображениях, полученных в разные моменты времени, но любая движущаяся цель будет иметь различное положение на этих изображениях. Используя это свойство, можно отличить движущиеся цели от неподвижной местности и найти следующие параметры движения цели: R_p , $(\vec{R}_p \cdot \vec{V})$ и V .

Построим два РСА-изображения одной и той же сцены по данным, собранным на двух разных интервалах синтезирования длительностью T_s с центрами в моменты времени t_1 и t_2 (рис. 2).

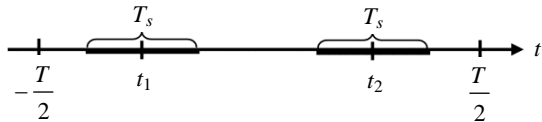


Рис. 2. Два интервала синтезирования

Допустим, что координаты $x_{eq}(t_{1,2})$ и $y_{eq}(t_{1,2})$ ЭНТ обнаруженной движущейся цели измерены, тогда правые части уравнений (13), (14) являются заданными. Записывая эти уравнения для моментов времени t_1 и t_2 , получаем систему из четырех линейных алгебраических уравнений относительно трех неизвестных R_p^2 , V^2 и $(\vec{R}_p \cdot \vec{V})$:

$$R_p^2 - 2(\vec{R}_p \cdot \vec{V})t_1 + V^2 t_1^2 = x_{eq}^2(t_1) + y_{eq}^2(t_1) + H^2 - 2x_{eq}(t_1)V_a t_1 + V_a^2 t_1^2; \quad (17a)$$

$$R_p^2 - 2(\vec{R}_p \cdot \vec{V})t_2 + V^2 t_2^2 = x_{eq}^2(t_2) + y_{eq}^2(t_2) + H^2 - 2x_{eq}(t_2)V_a t_2 + V_a^2 t_2^2; \quad (17б)$$

$$(\vec{R}_p \cdot \vec{V}) - V^2 t_1 = x_{eq}(t_1)V_a - V_a^2 t_1; \quad (17в)$$

$$(\vec{R}_p \cdot \vec{V}) - V^2 t_2 = x_{eq}(t_2)V_a - V_a^2 t_2. \quad (17г)$$

Из уравнений (17в) и (17г) легко находим:

$$V^2 = V_a^2 - V_a \frac{x_{eq}(t_2) - x_{eq}(t_1)}{t_2 - t_1}; \quad (18)$$

$$(\vec{R}_p \cdot \vec{V}) = V_a \frac{x_{eq}(t_1)t_2 - x_{eq}(t_2)t_1}{t_2 - t_1}. \quad (19)$$

Подставляя эти решения в уравнения (17а) и (17б), получим два решения:

$$R_{p1}^2 = x_{eq}^2(t_1) + y_{eq}^2(t_1) + H^2 - \frac{x_{eq}(t_2) - x_{eq}(t_1)}{t_2 - t_1} V_a t_1^2; \quad (20a)$$

$$R_{p2}^2 = x_{eq}^2(t_2) + y_{eq}^2(t_2) + H^2 - \frac{x_{eq}(t_2) - x_{eq}(t_1)}{t_2 - t_1} V_a t_2^2. \quad (20б)$$

Используя уравнения движения ЭНТ (15), можно показать, что полученные решения являются тождественно равными ($R_{p1}^2 \equiv R_{p2}^2$) для равномерно и прямолинейно движущейся цели. На практике эти решения могут отличаться из-за неточного измерения координат ЭНТ. Чтобы минимизировать среднюю квадратичную ошибку, оценки (20а) и (20б) следует усреднить:

$$R_p^2 = (R_{p1}^2 + R_{p2}^2) / 2. \quad (21)$$

Таким образом, по двум изображениям (взглядам) для цели, движущейся с постоянной скоростью, без привлечения какой-либо дополнительной информации, можно определить следующие параметры движения: наклонную дальность R_p до цели в момент времени $t = 0$ (21), модуль вектора относительной скорости цели V (18) и радиальную компоненту вектора относительной скорости цели $(\vec{R}_p \cdot \vec{V}) / R_p$ (19), (21). Для того чтобы вычислить истинные координаты движущейся цели x_p и y_p в момент времени $t = 0$ и компоненты ее вектора скорости v_x и v_y , необходимо использовать дополнительную информацию о движении цели.

Если синтезировано N изображений одной и той же сцены в разные моменты времени t_i , $i = 1, 2, \dots, N$, то из (13), (14) получаем систему из $2N$ -линейных алгебраических уравнений. Если координаты ЭНТ измерены точно, то эта система уравнений будет совместна. Из этих $2N$ -уравнений только три будут линейно независимы.

Остальные являются некоторой линейной комбинацией первых трех и никакой новой информации о цели не дают. Этот результат, как уже отмечалось, также следует из анализа уравнений движения ЭНТ (15)–(16). Однако на практике значения координат ЭНТ $x_{eq}(t_i)$ и $y_{eq}(t_i)$ измеряются с некоторой погрешностью. Это приводит к тому, что система из $2N$ -уравнений перестает быть совместной и ее решение следует находить, например, методом наименьших квадратов. Избыточность системы позволяет повысить точность оценки параметров движения.

5. Случай равномерного движения по известной прямолинейной траектории. Если из анализа изображения сцены удастся установить, что цель движется по определенной прямолинейной траектории, например, на изображении видна дорога, по которой предположительно движется автомобиль или на водной поверхности виден кильватерный след корабля, то можно использовать уравнение этой предполагаемой прямолинейной траектории. Пусть уравнение траектории имеет вид $y = kx + b$ с известными коэффициентами k и b . Тогда для координат ЭНТ и компонент собственной скорости цели очевидны следующие соотношения

$$y_p = kx_p + b; \quad (22a)$$

$$v_y = kv_x. \quad (22б)$$

С учетом найденных величин R_p , $(\vec{R}_p \cdot \vec{V})$ и V соотношения (18), (19) и (21) можно записать в следующем виде:

$$x_p^2 + y_p^2 = R_p^2 - H^2; \quad (23a)$$

$$(V_a - v_x)^2 + v_y^2 = V^2; \quad (23б)$$

$$x_p(V_a - v_x) - y_p v_y = (\vec{R}_p \cdot \vec{V}). \quad (23в)$$

В уравнениях (23) правые части являются известными величинами, поэтому уравнения (22), (23) могут быть использованы для нахождения координат x_p , y_p и компонент скорости v_x , v_y движущейся цели. Решая уравнение (22б) и (23б), находим компоненты скорости:

$$v_{x1,2} = V_a \frac{1}{1+k^2} \left(1 \pm \sqrt{1 - (1+k^2) \left(1 - \frac{V^2}{V_a^2} \right)} \right); \quad (24a)$$

$$v_{y1,2} = V_a \frac{k}{1+k^2} \left(1 \pm \sqrt{1 - (1+k^2) \left(1 - \frac{V^2}{V_a^2} \right)} \right). \quad (24б)$$

Решая уравнения (23а) и (23в) и полагая компоненты скорости уже найденными, получаем сле-

дующие выражения для координат цели в момент времени $t = 0$:

$$x_{p1,2} = \frac{V_a - v_x}{V} \frac{(\vec{R}_p \cdot \vec{V})}{V} \pm \frac{v_y}{V} \sqrt{R_p^2 - H^2 - \frac{(\vec{R}_p \cdot \vec{V})^2}{V^2}}; \quad (25a)$$

$$y_{p1,2} = -\frac{v_y}{V} \frac{(\vec{R}_p \cdot \vec{V})}{V} \pm \frac{V_a - v_x}{V} \sqrt{R_p^2 - H^2 - \frac{(\vec{R}_p \cdot \vec{V})^2}{V^2}}. \quad (25б)$$

Каждому из решений для компонент скорости (24) соответствует два возможных положения цели (25). Таким образом, существует четыре возможных решения системы уравнений (23), если ее дополнить уравнением (22), которое задает направление движения цели. Из этих четырех решений (24), (25) нужно выбрать одно, которое соответствует реальной движущейся цели. Такое решение должно наилучшим образом удовлетворять следующим двум условиям. Во-первых, в зависимости от того, осуществляется радиолокационный обзор по левому или правому борту самолета, выбираются решения, у которых $y_p > 0$ или $y_p < 0$ (см. рис. 1). Во-вторых, поскольку до сих пор при решении задачи не использовалось уравнение (22а), нужно проверить, что найденные цели действительно попадают на эту линейную траекторию. По найденным координатам следует вычислить значения

$$b_n = y_{pn} - kx_{pn}. \quad (26)$$

То решение, у которого значение b_n оказывается наиболее близким к заданному b в (22а) и есть искомое решение. В некоторых случаях нужно отбрасывать ложные решения, в которых компоненты скорости цели оказываются больше скорости самолета.

Отметим, что если на сцене присутствует несколько дорог, по которым возможно движение обнаруженной цели, тогда следует построить решения (24), (25) для всех возможных направлений k_1, k_2, \dots и выбрать из них то решение, которое дает значение b_n (26), наиболее близкое к одному из коэффициентов b_1, b_2, \dots . Таким путем можно выбрать искомое решение и дорогу, по которой движется цель.

6. Предельный случай для медленных целей. В этом разделе рассматривается предельный случай медленно движущихся целей, который описан в литературе [10–12]. Медленное движение цели означает, что имеет место неравенство $v \ll V_a$. В линейном приближении, пренебрегая квадратичными величинами v_x^2 и v_y^2 , из

уравнения (18) и (23б) получаем известную оценку для азимутальной компоненты скорости [10–12]

$$v_x = \frac{1}{2} \frac{x_{eq}(t_2) - x_{eq}(t_1)}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta x_{eq}}{2\Delta t}. \quad (27)$$

Эта формула означает, что для медленно движущихся целей скорость перемещения ЭНТ по изображению в азимутальном направлении, $v_{xeq} = \Delta x_{eq} / \Delta t$, в 2 раза больше азимутальной компоненты собственной скорости цели v_x [10].

В рамках теории, предложенной в данной статье, можно найти точную оценку. Не делая никаких дополнительных предположений, из (18) и (23б) получаем

$$v_{xeq} = 2v_x - \frac{v_x^2 + v_y^2}{V_a}. \quad (28)$$

Из этой формулы, в частности, следует, что азимутальная скорость ЭНТ может быть отличной от нуля, даже когда азимутальная компонента собственной скорости цели равна нулю, $v_x = 0$, за счет ненулевой компоненты v_y .

7. Математическое моделирование процесса обнаружения движущихся целей и оценки их параметров. Для иллюстрации и подтверждения проведенного выше теоретического исследования в этом разделе проводится компьютерное моделирование процесса синтеза изображений сцены с неподвижными и движущимися точечными целями на основе фильтра (8). Для простоты в рассматриваемой модели полагаем, что амплитуда отраженного сигнала от всех целей равна единице, $a_p = 1$. В качестве весового окна синтезированной апертуры используется окно Хэмминга

$$W(t) = 1 + \frac{23}{27} \cos\left(2\pi \frac{t - t_i}{T_s}\right), \quad -\frac{T_s}{2} \leq t - t_i \leq \frac{T_s}{2}. \quad (29)$$

При использовании весового окна Хэмминга для сжатия ЛЧМ-импульса по дальности огибающая сжатого импульса $\Pi(\cdot)$ будет иметь вид

$$\Pi(\xi) = \left(\frac{\sin(\pi\xi)}{\pi\xi} \right) \frac{1 - (4/27)\xi^2}{1 - \xi^2}, \quad \xi = 1,3 \frac{R}{\rho_R}. \quad (30)$$

где ρ_R – разрешение по дальности. При таком выборе весовых окон получаются одинаковые боковые лепестки по азимуту и дальности на синтезированном изображении неподвижных целей.

Во всех расчетах используются следующие параметры: длина волны $\lambda = 3$ см, скорость самолета $V_a = 50$ м/с, высота полета $H = 2000$ м. Выберем одинаковое разрешение по азимуту и дальности $\rho_x = \rho_R = 3$ м. Время синтеза T_s за-

висит от требуемого разрешения по азимуту ρ_x и может быть оценено по формуле $T_s = 0,65\lambda R_c / V_a \rho_x$, где R_c – наклонная дальность до центра сцены. В рассматриваемых далее примерах $T_s = 0,39$ с, а время наблюдения $T = 10T_s$. На рис. 3 показаны синтезированные изображения двух точечных целей, которые были синтезированы в два разных момента времени $t_{1,2} = \mp(T - T_s)/2$; одна цель является неподвижной, а вторая цель движется с постоянной по модулю и направлению скоростью.

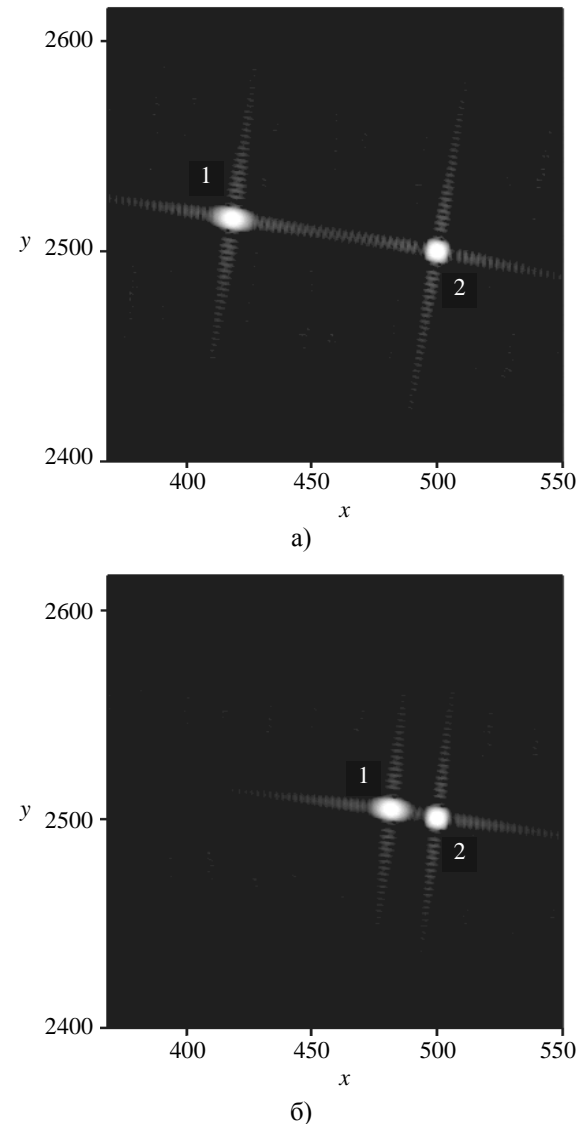


Рис. 3. Синтезированные изображения движущейся 1 и неподвижной 2 точечных целей, полученные в моменты времени t_1 (а) и t_2 (б)

В момент времени $t = 0$ обе цели имели равные координаты $x_p = 500$ м, $y_p = 2500$ м. Декартовы компоненты вектора скорости движу-

щейся цели равны $v_x = 10$ м/с, $v_y = -1$ м/с. Из рис. 3 видно, что неподвижная цель сфокусирована и отображена в ее истинном положении. Движущаяся цель расфокусирована и смещена от истинного положения. Причины этого явления подробно рассмотрены в разд. 3, а также исследованы в работе [7].

По синтезированным изображениям, показанным на рис. 3, можно измерить координаты ЭНТ $x_{eq}(t_1) = 418$ м, $y_{eq}(t_1) = 2515$ м в момент времени $t_1 = -1,755$ с и $x_{eq}(t_2) = 482$ м, $y_{eq}(t_2) = 2504$ м в момент времени $t_2 = 1,755$ с. Используя измеренные координаты по формулам (18), (19) и (21), рассчитываем наклонную дальность до движущейся цели в момент времени $t = 0$, модуль вектора относительной скорости и радиальную компоненту вектора относительной скорости: $R_p = 3240$ м, $V = 40,0$ м/с и $(\vec{R}_p \cdot \vec{V}) / R_p = 6,9$ м/с. Такой же результат дают прямые вычисления, что подтверждает правильность полученных теоретических формул. В рассматриваемом примере нам известен угол наклона траектории $k = v_y / v_x = -0,1$ и коэффициент прямой $b = 2550$ м.

Теперь, используя формулы (24), (25), вычисляем координаты цели в момент времени $t = 0$ и компоненты вектора собственной скорости цели. В результате получаем четыре решения, приведенные в таблице.

Определение параметров движущейся цели

	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$
v_x	89,0 м/с		10,0 м/с	
v_y	-8,9 м/с		-1,0 м/с	
x_p	-1101 м	5 м	500 м	624 м
y_p	-2299 м	2550 м	2500 м	-2472 м
b_n	-2409 м	2550 м	2550 м	-2409 м

Решения 1 и 2 отбрасываются, так как $v_x > V_a$. Решение 4 не удовлетворяет условию (26). Таким образом, параметры движения цели определяются решением 3.

Детектирование одной движущейся точечной цели не вызывает трудностей и неоднозначностей в определении положений ее ЭНТ на изображениях, чего нельзя сказать про случай, когда одновременно имеется две и более движущихся цели. На рис. 4 представлены изображения одной неподвижной и двух движущихся точечных целей в разные моменты времени $t_1 = -1,755$ с и $t_2 = 1,755$ с. Неподвижная и первая

движущаяся цель имеют такие же параметры, как и в предыдущем примере. Параметры движения второй цели имеют следующие значения: $x_p = 500$ м, $y_p = 2510$ м, $v_x = -10$ м/с и $v_y = 1$ м/с.

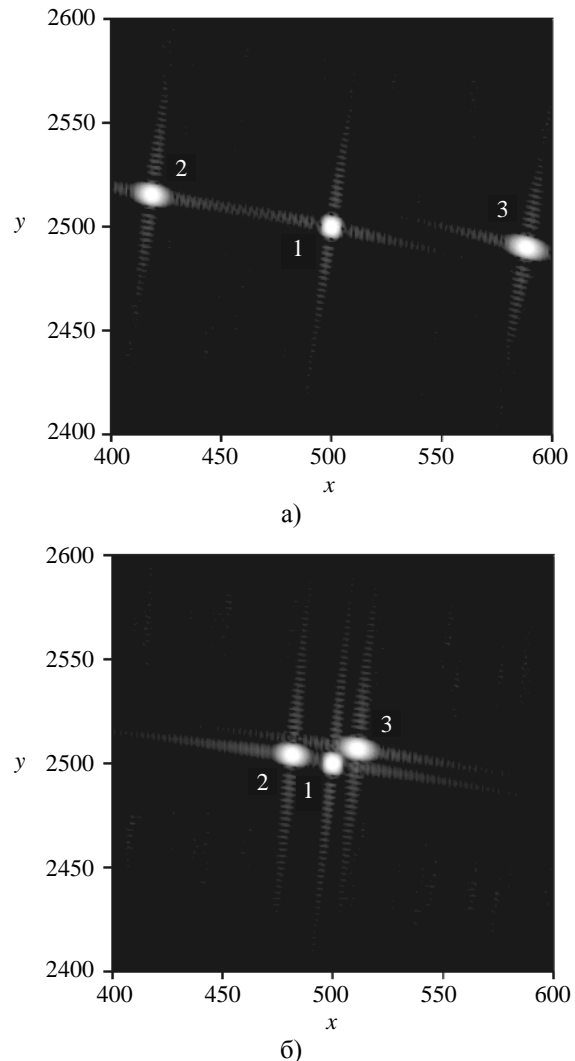


Рис. 4. Изображения одной статической 1 и двух движущихся точечных целей 2 и 3, синтезированные в моменты времени t_1 (а) и t_2 (б)

Чтобы отличить ЭНТ одной цели от ЭНТ других целей, необходимо синтезировать последовательность изображений (взглядов) сцены через равные промежутки времени. На рис. 5 и 6 соответственно показаны 2-взглядовое и 6-взглядовое изображения тех же целей, что и на рис. 4.

Многовзглядовые изображения получают некоррелированным усреднением последовательности одновзглядовых изображений. На 2-взглядовом изображении показаны неподвижная цель и ЭНТ двух движущихся целей в крайние моменты времени. На 6-взглядовом изображении видны две цепочки ЭНТ от двух целей и одна неподвижная цель. На рис. 6 положения ЭНТ в цепочке

расположены на траекториях ЭНТ, которые описываются формулами (15), (16).

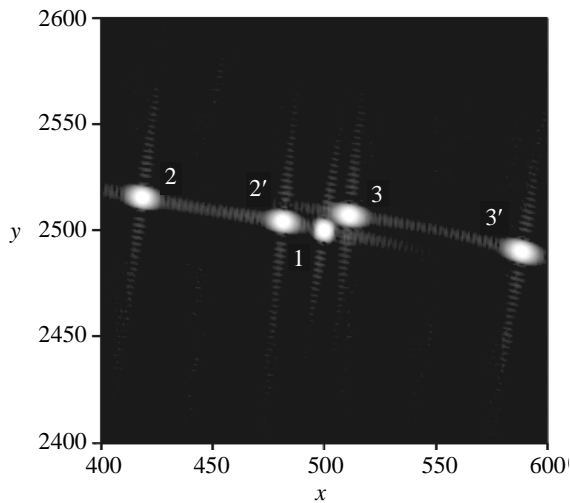


Рис. 5. Неподвижная 1 и две движущихся точечных цели 2 и 2', 3 и 3' на 2-взглядовом изображении (взгляды синтезированы в моменты времени t_1 и t_2)

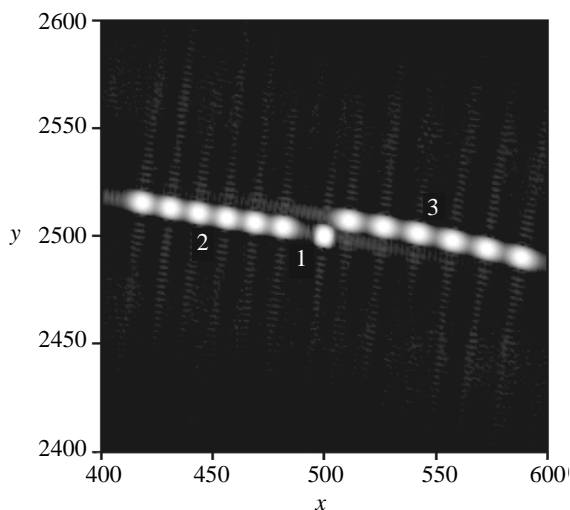


Рис. 6. Неподвижная 1 и две движущихся точечных цели 2 и 3 на 6-взглядовом изображении (взгляды синтезированы через равные промежутки времени в интервале от t_1 до t_2)

Выводы. Таким образом, решена задача о детектировании движущихся целей с помощью одноантенного РСА. Исследования проведены во временной области в предположении, что за время наблюдения цель движется с постоянным вектором скорости. Детектирование движущихся целей основано на сравнении изображений одного и того же участка сцены, которые были синтезированы в разные моменты времени. Движущиеся цели обнаруживаются по их смещению относительно местности, которая остается неподвижной на этих изображениях. Для применения такого метода на практике требуется точная компенсация ошибок движения платформы РСА, что обычно достигается за счет применения методов

автофокусировки, например [18]. Показано, что в рамках РСА с одной антенной без дополнительных предположений о характере движения цели могут быть оценены следующие величины, характеризующие движущуюся цель: наклонная и наземная дальности до цели в некоторый момент времени, модуль вектора относительной скорости и радиальная компонента вектора относительной скорости цели. Через эти параметры могут быть рассчитаны доплеровский центроид и коэффициент ЛЧМ, т. е. для обнаруженной движущейся цели может быть построен в ЛЧМ-приближении оптимальный фильтр, позволяющий синтезировать сфокусированное изображение цели. Однако этот фильтр не решает задачи о синтезировании изображения движущегося объекта в истинном положении на сцене. Для оценки других параметров движения, таких как декартовы координаты истинного положения движущейся цели в некоторый момент времени и компоненты вектора собственной скорости цели, помимо данных, получаемых в процессе синтеза, необходимо использовать дополнительную информацию о движущейся цели, например, траекторию ее движения. Полученные теоретические результаты подтверждены компьютерным моделированием.

Авторы выражают свою искреннюю признательность профессору, члену-корреспонденту НАН Украины Д. М. Вавриву за поддержку этой работы, участие в постановке исследуемой проблемы и обсуждении полученных результатов.

Библиографический список

1. *Cumming G.* Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data Algorithms and Implementation / G. Cumming, F. H. Wong. – Norwood, MA: Artech House, 2005. – 625 с.
2. *Кондратенков Г. С.* Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли / Г. С. Кондратенков, А. Ю. Фролов. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
3. *Радиолокационные системы землеобзора космического базирования* / В. С. Верба, Л. Б. Неронский, И. Г. Осипов, В. Э. Турук. – М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.
4. *Cost-effective airborne SAR* / D. M. Vavriv, V. V. Vinogradov, V. A. Volkov et al. // Радиофизика и радиоастрономия. – 2006. – 11, № 3. – С. 276–297.
5. *Многовзглядовый радиолокатор с синтезированной апертурой* / А. А. Безвесильный, Д. М. Ваврив, В. В. Виноградов и др. // Изв. вузов. Радиоэлектрон. – 2011. – 54, № 10. – С. 11–18.
6. *Bezvesilnyi O. O.* Synthetic Aperture Radar Systems for Small Aircrafts: Data Processing Approaches / O. O. Bezvesilnyi, D. M. Vavriv // Recent Advances in Aircraft Technology; ed. by R. K. Agarwal). – Rijeka: InTech, 2012. – Chap. 20. – P. 465–498.
7. *Raney R. K.* Synthetic aperture imaging radar and moving targets / R. K. Raney // IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems. – 1971. – 7, N 3. – P. 499–505.
8. *An airborne synthetic aperture radar (SAR) experiment to support RADARSAT-2 ground moving target indication (GMTI)* / C. E. Livingstone, I. C. Sikaneta, C. H. Gierull et al. // Canadian J. of Remote Sensing. – 2002. – 28, N 6. – P. 794–813.
9. *Shen Chiu.* A Comparison of displaced phase center antenna and along-track interferometry techniques for RADARSAT-2

- ground moving target indication / Shen Chiu, C. E. Livingstone // Canadian J. of Remote Sensing. – 2005. – 31, N 1. – P. 37–51.
10. Ouchi K. On the multilook images of moving targets by synthetic aperture radars / K. Ouchi // IEEE Trans. Antennas and Propagation. – 1985. – 33, N 8. – P. 823–827.
 11. Kirscht M. Detection and focused imaging of moving objects evaluating a sequence of single-look SAR images / M. Kirscht // Proc. 3rd Intern. Airborne Remote Sensing Conf. and Exhibition. – Copenhagen, 1997. – Vol. I. – P. 393–400.
 12. Kirscht M. Detection and imaging of arbitrarily moving targets with single-sensor SAR / M. Kirscht // IEE Proc. Radar Sonar & Navigation. – 2003. – 150, N 1. – P. 7–11.
 13. Moreira J. R. A new MTI-SAR approach using the reflectivity displacement method / J. R. Moreira, W. Keydel // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. – 1995. – 33, N 5. – P. 1238–1244.
 14. Dias J. Multiple moving target detection and trajectory estimation using a single SAR sensor / J. Dias, P. Marques // IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems. – 2003. – 39, N 2. – P. 604–624.
 15. Marques P. Velocity estimation of fast moving targets using a single SAR sensor / P. Marques, J. Dias // IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems. – 2005. – 41, N 1. – P. 75–89.
 16. A velocity estimation algorithm of moving targets using single antenna SAR / Gang Li, Xiang-Gen Xia, Jia Xu, Ying-Ning Peng // IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems. – 2009. – 45, N 3. – P. 1052–1062.
 17. A novel motion parameter estimation algorithm of fast moving targets via single-antenna airborne SAR system / R. Xu, D. Zhang, D. Hu et al. // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing Lett. – 2012. – 9, N 5. – P. 920–924.
 18. Безвесильный А. А. Локально-квадратичная автофокусировка по смещению изображений для радиолокаторов с синтезированной апертурой / А. А. Безвесильный, Е. Н. Горюхой, Д. М. Ваврив // Радиофизика и радиоастрономия. – 2012. – 17, № 2. – С. 182–193.

Рукопись поступила 29.12.2012 г.

О. О. Bezvesilnyi, B. A. Kochetov

DETECTION OF MOVING TARGETS BY MULTI-LOOK SINGLE-ANTENNA SYNTHETIC APERTURE RADAR

Synthetic aperture radars (SAR) installed on aircrafts or satellites are able to obtain images of a scene with high spatial resolution. SAR data processing is a kind of optimal filtering of signals from static point scatterers. Signals received from moving targets are processed with the mismatched filter. It means that moving targets appear to be defocused and displaced from their true positions in radar images; therefore it is difficult to obtain information about moving targets from an ordinary SAR image. Nevertheless, the problem of detection of moving targets by SAR is important for many practical applications. One of the methods applied to solve the problem by using a common single-antenna SAR is based on multi-look processing, which consists in forming several image looks of the same scene patch from the data collected on different time intervals. The idea is that the static targets in the SAR image looks preserve their positions while the moving

targets appear to be shifted, which allows distinguishing the moving targets from the static ones. Moreover, some motion parameters can be estimated via the target displacements. In this paper, formulas that describe the displacement of a moving target in SAR images are derived on the basis of the common equations of the multi-look SAR processing in time domain under the assumption that the target velocity vector is constant. It is found that in the framework of such approach one can determine the range to the target, the module and the radial component of the relative velocity vector of the target. In order to find true position of the target and its own velocity vector some additional information is required, for example, the target trajectory. Otherwise, the ambiguity between the target position and velocity is preserved. The obtained theoretical results are illustrated with computer simulations.

Key words: synthetic aperture radar, detection of moving targets, multi-look processing.

О. О. Безвесильный, Б. А. Кочетов

ВИЯВЛЕННЯ РУХОМИХ ЦІЛЕЙ ЗА ДОПОМОГОЮ БАГАТОПОГЛЯДОВОГО ОДНОАНТЕННОГО РАДІОЛОКАТОРА З СИНТЕЗОВАНОЮ АПЕРТУРОЮ

Радіолокатори з синтезованою апертурою (РСА), встановлені на літаках чи супутниках, дозволяють отримувати зображення сцени з високим просторовим розрізненням. Обробка даних у таких радіолокаторах являє собою оптимальну фільтрацію сигналів від нерухомих точкових розсіювачів. Сигнали, прийняті від рухомих цілей, обробляються незгодженим фільтром. Це означає, що образи рухомих цілей на зображенні виявляються розфокусованими і зміщеними зі своїх справжніх положень, тому отримати інформацію про рухомий об'єкт зі звичайних РСА-зображень виявляється складно. Тим не менш, проблема знаходження рухомих цілей за допомогою РСА є важливою для багатьох практичних застосувань. Один з методів вирішення задачі за допомогою звичайного РСА з однією антеною ґрунтується на багатопоглядовій обробці, під якою розуміється побудова кількох зображень-поглядів однієї і тієї ж ділянки місцевості за даними, зібраними на різних інтервалах часу. Ідея підходу полягає у тому, що нерухомі цілі на зображеннях-поглядах зберігають свої положення, а рухомі цілі зміщуються, що дозволяє відрізнити рухомі цілі від нерухомих. Крім того, по зміщенню цілі можна оцінити параметри її руху. В цій роботі на основі загальних рівнянь, що описують процес формування багатопоглядових зображень у часовій області, отримано формули, що описують зміщення образів рухомих цілей у припущенні, що цілі рухаються з постійним вектором швидкості. Встановлено, що в рамках такого підходу можна визначити відстань до цілі, модуль і радіальну компоненту вектора відносної швидкості цілі. Для знаходження справжнього положення і вектора власної швидкості цілі необхідно використовувати додаткову інформацію, наприклад, траєкторію цілі. У протилежному випадку зберігається невизначеність між швидкістю і положенням цілі. Отримані теоретичні результати проілюстровано комп'ютерним моделюванням.

Ключові слова: радіолокатор з синтезованою апертурою, знаходження рухомих цілей, багатопоглядова обробка.