

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ НА ОДНОАНТЕННОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

А.С.Лифанов

В статье рассмотрен оригинальный метод селекции движущихся целей с использованием серии субапертурных изображений фрагмента голограммы. Также рассмотрены вопросы повышения качества РЛИ, вопросы автофокусировки, определения параметров движения найденных объектов. Приведены пути дальнейшего развития и совершенствования предложенного алгоритма.

Введение

Радиолокационные станции с синтезированной апертурой антенны

Успешное решение ряда важных задач, в том числе обзора земной поверхности, обнаружения малоразмерных объектов (целей), получения высокодетальных изображений местности, оперативного картографирования больших участков местности, особенно в труднодоступных районах Земли, зависит от наличия достоверной информации, получаемой, в том числе, в результате обзора земной поверхности с помощью различных технических средств, установленных на летательных аппаратах (ЛА).

Среди таких средств особое место занимают радиолокационные станции (РЛС) землеобзора вследствие ряда присущих им принципиальных преимуществ:

- радиолокационные станции землеобзора, установленные на ЛА, позволяют получать радиолокационное изображение (РЛИ) земной поверхности и расположенных на ней объектов (целей) независимо от времени суток, уровня освещенности, в любых метеорологических условиях и на больших дальностях наблюдения;
- новые принципы построения РЛС обзора Земли позволили резко повысить их разрешающую способность по дальности и азимуту, и приблизить информационные возможности радиолокационных средств землеобзора к оптическим. Благодаря указанным преимуществам такие РЛС находят все более широкое применение при решении вышеуказанных задач.

Наибольшее практическое применение в настоящее время находят РЛС с синтезированной апертурой антенны (РСА). Под апертурой будем понимать опорную функцию, а под субапертурой – часть опорной функции.

Принцип действия основан на использовании перемещения бортовой антенны РЛС для последовательного формирования антенной решетки больших размеров на траектории полета. Бортовая антенна, как правило, при этом имеет небольшие размеры и достаточно широкую диаграмму направленности.

В каждой точке траектории полета носителя РСА формирует вполне определенную амплитудную и фазовую информацию о просматриваемых участках местности и объектов на ней, соответствующую мгновенным значениям их текущих координат относительно ЛА. Обычно эта информация (радиоголограмма) выделяется из совокупности принимаемых импульсных радиосигналов с помощью специальных фазовых детекторов (ФД), а затем фиксируется в устройстве памяти. В дальнейшем эта информация подвергается обработке и анализу.

С помощью РСА бокового обзора получают РЛИ очень высокого качества. Используя такое изображение местности, появляется возможность решать широкий круг задач непосредственно на борту летательного аппарата. Для этого требуется обрабатывать сигналы РСА и формировать РЛИ во время полета. Именно в этой связи возникает необходимость разработки и внедрения цифровых способов обработки сигналов и цифровых методов управления РСА. При введении цифровой обработки и цифрового управления (РЛС с цифровым синтезированием апертуры антенны — ЦРСА) к достоинствам РСА добавляются оперативность обработки и гибкость в ее управлении.

Синтез изображения по входной радиоголограмме

Форматы данных

Формат данных голограммы определяется множеством факторов. К наиболее важным из них следует отнести:

- Частота зондирования. Частота зондирования должна быть такой, чтобы (см. [1]) за период импульса носитель прошел путь не более $D_a/2$, где D_a –реальный раскрыв антенны;
- Разрядность сигнала. Естественно, что чем выше разрядность сигнала, тем больше данных о местности (с объектами) можно получить;
- Скорость записи сигнала в оперативную память (ОЗУ);
- Скорость записи сигнала в постоянную память (ПЗУ).

Наибольшие различия проявляются при существенном изменении дальности радиолокации. Например, локация со спутника идет на высоте около $7 \cdot 10^6$ м, в то время как

высота полета самолета - всего около 10^4 м. Далее будут рассмотрены два формата: для РСА спутникового базирования и РСА, установленной на борту самолета.

	РСА спутникового базирования	РСА на борту самолета
Высота	$\sim 7 \cdot 10^6$ м	10^4 м
Скорость	$8 \cdot 10^3$ м/с	100 м/с
Формат голограммы	Блоки по 1024 отсчета – чередующиеся синусные, косинусные, минус синусные и минус косинусные составляющие сигнала.	Чередующиеся синусные и косинусные составляющие сигнала.
Разрядность	Int8 (8 бит)	Int8 (8 бит)

Таблица 1. Форматы данных

Общий алгоритм синтеза изображения по входной голограмме

Комплексный сигнал $J(\eta)$ на выходе линейной части системы обработки РСА может быть описан интегральным преобразованием типа свертки:

$$J(\eta) = \int_{-T/2}^{T/2} \dot{\xi}(\eta - t) \dot{h}(t) dt, \quad (1)$$

где $\dot{\xi}(t)$ - принимаемое колебание, $\dot{h}(t)$ - опорная функция.

Такое соотношение используется, как известно, для описания процесса обработки сигналов в линейных инвариантных к сдвигу системах.

Одним из важных свойств соотношения (1) является то, что преобразование Фурье функции $J(\eta)$ равно произведению преобразований Фурье принимаемого колебания $\dot{\xi}(t)$ и опорной функции $\dot{h}(t)$:

$$F\{J(\eta)\} = F\{\dot{\xi}(t)\} \times F\{\dot{h}(t)\}. \quad (2)$$

Здесь $F\{\cdot\}$ — символ прямого преобразования Фурье. В соответствии с этим свойством свертке двух функций $\dot{\xi}(t)$ и $\dot{h}(t)$ во временной области соответствует произведение преобразований Фурье этих функций в частотной:

$$\dot{\xi}(t) \otimes \dot{h}(t) \stackrel{\cdot}{\leftarrow} F\{\dot{\xi}(t)\} \times F\{\dot{h}(t)\},$$

где \otimes – символ временной свертки, $\stackrel{\cdot}{\leftarrow}$ – символ соответствия.

Использование (2) позволяет перенести обработку принимаемого сигнала $\dot{\xi}(t)$ из временной области в частотную посредством вычисления спектра $F\{J(\eta)\}$ функции $J(\eta)$.

Применение к (2) обратного преобразования Фурье дает следующее выражение для сигнала $J(\eta)$ на выходе системы обработки:

$$J(\eta) = F^{-1}\{F\{\dot{\xi}(t)\} \times F\{\dot{h}(t)\}\}.$$

Здесь \mathbf{F}^{-1} – символ обратного преобразования Фурье. Развернутая запись этого соотношения имеет вид:

$$J(\eta) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(j\omega\eta) \left[\int_{-T/2}^{T/2} \dot{\xi}(t) \exp(-j\omega t) dt \right] \left[\int_{-T/2}^{T/2} \dot{h}(t) \exp(-j\omega t) dt \right] d\omega, \quad (3)$$

где ω – круговая частота.

Структурная схема системы обработки, в которой реализуется процедура (3), представлена на рис. 1. Процесс обработки заключается в следующем.

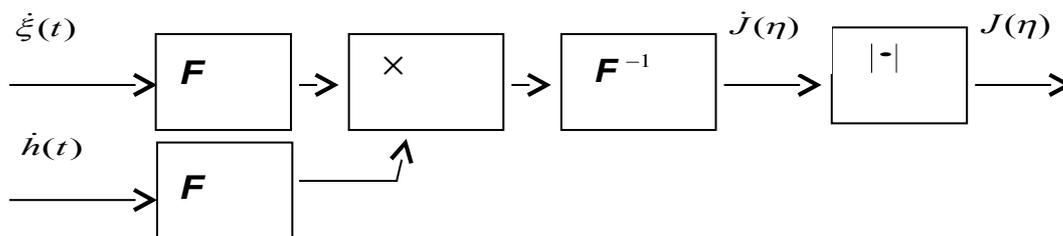


Рисунок 1. Структурная схема системы обработки при использовании способа быстрой свертки

Принятый сигнал $\dot{\xi}(t)$ и опорная функция $\dot{h}(t)$ подвергаются прямому преобразованию Фурье. Вычисленные в результате такого преобразования спектры сигнала и опорной функции перемножаются друг с другом, и результат перемножения подвергается обратному преобразованию Фурье. Модуль полученного путем таких преобразований сигнала является сигналом РЛИ.

Прямому и обратному преобразованиям Фурье непрерывного сигнала $\dot{s}(t)$

$$\dot{F}(\omega) = \mathbf{F} \{ \dot{s}(t) \} = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{s}(t) \exp(-j\omega t) dt,$$

$$\dot{s}(t) = \mathbf{F}^{-1} \{ \dot{F}(\omega) \} = (1 / 2\pi) \int_{-\infty}^{\infty} \dot{F}(\omega) \exp(j\omega t) dt$$

в области цифровых сигналов соответствуют прямое и обратное дискретное преобразования Фурье (ДПФ):

$$\dot{F}\{n\} = \Phi\{\dot{s}(k)\} = \sum_{k=0}^{N_0-1} \dot{s}(k) \exp(-j2\pi kn / N_0),$$

$$\dot{s}\{k\} = \Phi^{-1}\{\dot{F}(n)\} = 1/N_0 \sum_{n=0}^{N_0-1} \dot{F}(n) \exp(j2\pi kn / N_0).$$

Здесь $\dot{s}(t)$ и $\dot{s}(k)$ – непрерывные цифровые сигналы. $\dot{F}(\omega)$ и $\dot{F}\{n\}$ – комплексный спектр непрерывного сигнала и ДПФ цифрового сигнала, N_0 – число отсчетов цифрового сигнала, $\Phi\{\cdot\}$ и $\Phi^{-1}\{\cdot\}$ – символы прямого и обратного ДПФ.

Логично предположить, что, заменив в (3) непрерывные сигналы на цифровые, а интегральные преобразования на ДПФ, можно получить цифровой сигнал РЛИ. Однако такая процедура допустима лишь в тех случаях, когда цифровые сигналы представляются бесконечным числом отсчетов. При переходе же к цифровым сигналам, представленным конечным числом отсчетов, возникают осложнения. Дело в том, что при цифровой обработке сигналов РСА в соответствии с (3) должна быть реализована так называемая линейная свертка. При этом, строго говоря, число отсчетов как сигнала, так и опорной функции должно быть бесконечным. Реально же обрабатывается вполне конкретное конечное число отсчетов сигнала и опорной функции. Произведение ДПФ двух функций с конечным числом отсчетов соответствует так называемой *кольцевой свертке*.

Одно из свойств кольцевой свертки состоит в том, что при N_0 отсчетах входного сигнала и опорной функции среди N_0 отсчетов выходного сигнала лишь один соответствует линейной свертке, т. е. лишь один отсчет является «правильным», а все остальные — «неправильные». Для того чтобы получить $N_\sigma \geq 1$ отсчетов сигнала линейной свертки с помощью кольцевой свертки, число отсчетов входного сигнала необходимо расширить до величины $N_0 + N_\sigma - 1$, увеличив при этом число отсчетов опорной функции до той же величины путем добавления нулевых по значению отсчетов.

В РСА обычно используются следующие формулы расчета опорной функции (ОПФ):

$$h(t) = s(t) \cdot \exp(j\omega t),$$

где $\omega = -\frac{-t^2}{\frac{\lambda}{2\pi} \left(\frac{F_{pp}}{V}\right)^2 \cdot (r_0 + k \cdot dr_0)}$ — квадратичная фаза опорной функции, t — номер отсчета в

строке сигнала (по азимуту), λ — длина волны, F_{pp} — частота зондирования, V — скорость носителя, r_0 — высота полета носителя, k — номер строки по дальности в голограмме, dr_0 — дискретизация отсчетов по дальности.

Характерные дефекты изображения

Дефекты изображения следует разделить на устранимые и неустранимые. К устранимым дефектам можно отнести:

1. Размытое изображение. Возникает из-за несогласованности скорости носителя V со скоростью, использованной в расчете опорной функции. Возникает также при смене курса носителя, попадании в воздушные ямы, а также при других причинах, вызывающих изменение вектора скорости. Далее будут рассмотрены методы компенсации;
2. Низкий контраст изображения. Возникает при:

- 1) несогласованности заложенных в опорную функцию данных (λ – длина волны, F_{pp} – частота зондирования, V – скорость носителя, r_0 – высота полета носителя, k – номер строки по дальности в голограмме, dr_0 – дискретизация отсчетов по дальности) с реальными условиями. В большинстве случаев устраняется подбором оптимального значения фазы ОПФ;
- 2) слишком большого угла диаграммы направленности и большой дальности. Устраняется путем искусственного поднятия контраста, например, методом подчеркивания границ (см. [2]).
3. «Кресты» на ярких объектах. Так как идеальный обработанный сигнал имеет вид $\frac{\sin(x)}{x}$, при большой яркости цели боковые лепестки (локальные максимумы функции) оказываются на некотором расстоянии существенно ярче темного фона поверхности. Также этот дефект возникает из-за урезания ОПФ от бесконечного ряда отсчетов. Устраняется использованием различного вида окон (см. далее раздел «Подавление боковых лепестков»);
4. Низкое разрешение изображения. В определенных пределах (см. главу «Границы применимости, точность методов») устраняется увеличением числа отсчетов в опорной функции и подбором параметров ОПФ.

Основными неустраняемыми дефектами являются ограниченная (хотя и высокая) разрешающая способность и появление «фантомных» объектов на изображении. Иногда на РЛИ один и тот же яркий и четкий объект может встречаться в нескольких местах. Как правило, все «фантомы» лежат на вертикали и горизонтали, имеющих точкой пересечения реальный объект. Но, к сожалению, далеко не всегда удается даже визуально выделить центральный объект и точно отделить «фантомы» от реальных целей.

Методы повышения качества изображения

Подстройка скорости по максимальной яркости изображения

Необходимость в подстройке по скорости возникает в связи с нереальностью для каждого отсчета указать в ОПФ точную скорость носителя. В результате большее рассогласование по скорости вызывает большую потерю контрастности (или максимальной яркости, если речь идет об одном и том же участке голограммы/РЛИ). Очевидным представляется следующий алгоритм подстройки скорости:

1. Берется диапазон скоростей от V_{\min} до V_{\max} , шаг dV , начальная скорость $V = V_{\min}$;
2. Проводится синтез кадра, исходя из предположения, что скорость носителя = V ;

3. По всему изображению ищется глобальный максимум яркости M_i и запоминается скорость, ему соответствующая: V_i ;
4. Если $V + dV \leq V_{\max}$, то $V = V + dV$ и перейти к пп. 2;
5. Среди всех M_i выбирается наибольший, и скорость, ему соответствующая, считается оптимальной для синтеза;
6. По всей дальности изображения скорости интерполируются методом наименьших квадратов (МНК) и, в результате работы алгоритма, получается формула для линейного изменения скорости по дальности.

Подстройка скорости по максимальной мощности точечного сигнала

В ряде случаев фокусировка по максимальной яркости не даёт желаемых результатов, то есть изображение становится светлее, но не фокусируется. В этом случае полезен метод подстройки скорости по максимальной мощности сигнала. Суть его в следующем:

- Пусть известно количество отсчётов в главном лепестке сигнала точечного

объекта $N_{main} = \frac{R_0 \lambda F_{pp}^2}{N_{opf} \cdot V^2}$, где N_{opf} – число отсчётов опорной функции;

- Тогда мощность точечного объекта определяется отношением мощности (суммы амплитуд всех отсчетов) главного лепестка к сумме мощностей отсчетов первых боковых, то есть если положение X , то:

$$\beta = \frac{\sum_{i=x-\frac{N_{main}}{2}}^{x+\frac{N_{main}}{2}-1} A_i}{\sum_{i=x-\frac{3N_{main}}{2}}^{\frac{2}{2}} A_i + \sum_{i=x+\frac{N_{main}}{2}}^{\frac{2}{2}} A_i} . \text{ Сигнал считается мощным, если } \beta \geq 3 .$$

Таким образом, алгоритм подстройки скорости приобретает вид:

1. Берется диапазон скоростей от V_{\min} до V_{\max} , шаг dV , начальная скорость $V = V_{\min}$;
2. Проводится синтез кадра, исходя из предположения, что скорость носителя = V ;
3. По всему изображению ищется глобальный максимум β_i и, если он больше определенного уровня, запоминается скорость V_i , ему соответствующая;
4. Если $V + dV \leq V_{\max}$, то $V = V + dV$ и перейти к пп. 2;

5. Среди всех β_i выбирается наибольший, а скорость, ему соответствующая, считается оптимальной для синтеза;
6. По всей дальности изображения скорости интерполируются методом наименьших квадратов (МНК).

Mapdrift

Метод основан на свойстве расфокусированных изображений: при синтезе разными субапертурами пик сигнала точечного объекта оказывается сдвинут на вполне определенное количество отсчетов $\Delta\omega$. По этому сдвигу из свойств тригонометрии легко получается

оптимальное значение скорости носителя: $V = V + \frac{\Delta\omega}{2 \cdot N_{opf}}$.

Сравнение методов

Все рассмотренные методы имеют свои достоинства и недостатки. Так, например, самый очевидный метод повышения яркости имеет среднюю (среди рассмотренных методов) вычислительную сложность и время выполнения. Этот метод может поднять яркость изображения, но, к сожалению, не всегда даёт сфокусированное изображение. В то же время самый быстрый неитерационный алгоритм Mapdrift даёт совмещение сигнала от точечной цели, но если рядом окажутся несколько точечных объектов, он может «свести» разные объекты в один и результат будет предсказуемым, но неверным. И, наконец, самый медленный из алгоритмов для максимальной мощности точечного сигнала должен сузить точечный сигнал как можно ближе к виду $\frac{\sin x}{x}$, но, в силу возможного отсутствия достаточно ярких точечных объектов может «настроиться» на шум и результат также может оказаться неприменимым.

Частично все дефекты могут быть компенсированы вводом неких допусков и условий, усреднением по МНК. В результате рассмотренные методы дают вполне приемлемые результаты.

Помимо методов фокусировки существуют методы визуального улучшения изображений (например, «Подчеркивание границ», [2]) и методы подавления боковых лепестков (например, с использованием различных окон, [3]).

Селекция движущихся целей

РЛС с синтезированной апертурой антенны (РСА) – мощное средство для получения радиолокационных изображений (РЛИ) земли с высоким разрешением, используя коротковолновый передатчик. Но, в то время как неподвижные объекты отображаются чётко

и имеют высокое разрешение, движущиеся объекты отображаются на РЛИ с ошибками. Эти ошибки можно разделить на два класса в зависимости от направления движения:

1. Объект, движущийся в азимутальном направлении, дефокусируется в азимутальном направлении;
2. Объект, движущийся в направлении удаления (приближения) к носителю (приемопередающей антенне), сдвигается в азимутальном направлении на РСА.

Для устранения (максимальной компенсации) этих ошибок необходимо найти движущийся объект и определить его скорости.

В отличие от множества традиционных алгоритмов, определявших и использовавших для компенсации ошибок только азимутальную компоненту скорости, алгоритм, приведенный ниже, использует обе компоненты скорости.

В данной работе будет рассмотрен метод для нахождения произвольно движущегося объекта и определения компонент его скорости. Метод базируется на оценке временной корреляции в последовательности субапертурных РЛИ. Эти изображения получаются из различных перекрывающихся полос частот с постоянной шириной полосы обзора Доплеровского спектра. Изображения показывают землю под различными углами обзора и, вследствие этого, в различные промежутки времени. Таким образом, объект появляется в различных местах на последовательности изображений, и представляется возможным определение скорости объекта. Следующие части работы описывают процесс построения последовательности субапертурных РЛИ и последующие шаги нахождения объекта и определения его скорости. В завершении будут представлены результаты работы программы, использующей данный алгоритм.

Поиск и определение скорости движущихся объектов

Построение последовательности РЛИ

Предлагаемый метод базируется на оценке смещения точечного движущегося объекта на серии субапертурных РЛИ. Генерация последовательности субапертурных РЛИ состоит в следующем. Сначала производится компрессия Доплеровского спектра по азимуту, заключающаяся в Быстром Преобразовании Фурье (БПФ) исходных данных по азимуту. Потом Доплеровский спектр подразделяется на различные перекрывающиеся диапазоны и субапертурные РЛИ, формируемые в этих диапазонах. Изображения показывают землю под различными (по горизонтали) углами визирования θ_i , которые зависят от центра частот f_{li} , определяемого как

$$\theta_i = -\arcsin \frac{f_{li} \lambda}{2 v_{Ax}}, \quad (4)$$

где v_{Ax} – скорость носителя, который движется в положительном азимутальном направлении, взятом за X , и λ – несущая частота. Различные углы обзора также подразумевают, что изображения показывают землю в различные промежутки времени. Ширина диапазона должна быть выбрана тщательно. Если она будет слишком мала, будет резко снижено азимутальное разрешение, и, в то же время, если ширина будет слишком увеличена, быстродвижущийся объект будет сильно расфокусирован и потеряет свойства точечного объекта.

Для неподвижных целей различные углы θ_i переписываются с различным временем

$$t_i \approx t_0 + \frac{\theta_i R_{T_0}}{v_{Ax}} \approx t_0 - \frac{f_{li} \lambda R_{T_0}}{2v_{Ax}^2} \text{ для } \theta_i \ll 1, \quad (5)$$

где R_{T_0} – дистанция между антенной и целью, а t_0 – начальное время.

Чтобы устранить геометрические искажения и получить неподвижную землю на последовательности изображений, выполняется проектирование на землю и устранение миграции (смещения) по дальности. Таким способом мы получаем последовательность изображений, где будет заметно смещение движущейся цели.

На рисунке 2 показана блок-схема алгоритма:

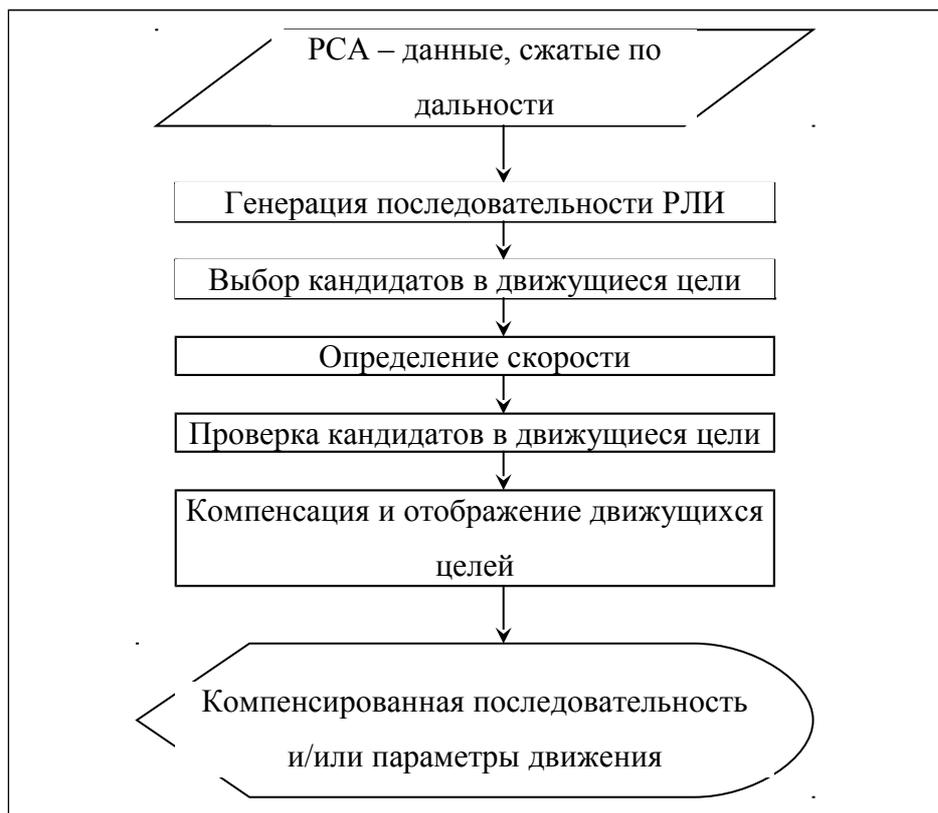


Рисунок 2. Схема алгоритма

Выбор кандидатов в движущиеся цели

Так как заранее невозможно предсказать скорость и размер движущихся целей, сначала производится выбор кандидатов в движущиеся цели (КДЦ), исходя из следующих предположений:

1. Цель должна быть яркой. Предполагается, что движущаяся цель имеет довольно высокую отражающую способность. Это обусловлено несколькими причинами: во-первых, большинство движущихся объектов хорошо отражают сигнал в силу свойств материала, из которого они изготовлены (как правило, это металлы), в то время как поверхность земли (леса, дороги, водная поверхность и т.д.) в основном, поглощают сигнал антенны. Во-вторых, тусклая цель может на части субапертурных изображений быть несколько ярче фона, на некоторых наоборот, тусклее поверхности, а на остальных может слиться с фоном. Всё это происходит в силу свойств синтезированного по сигналу результата. В таких условиях поиск цели может стать как минимум слишком нестандартным, если вообще осуществимым.
2. Цель должна быть не мелкой. Эффективный размер объекта должен быть как минимум больше точки, определяемой разрешением системы по азимуту и по дальности. На практике же приемлемым представляется способ выбора целей более 4-5 элементов разрешения. Это оправдано тем, что почти все мелкие объекты вызваны или стационарными инженерными объектами (столбами, линиями электропередач, светофорами, строительным мусором, металлоломом и пр.), или флуктуациями сигнала.
3. Цель должна быть не крупной. Так, например, цель с эффективной площадью рассеивания (ЭПР) очень большого размера, скорее всего, будет большим инженерным сооружением (например, мостом) или же следствием очень слабой контрастности изображения и отсутствия на нём ярких объектов.

Еще одна задача, которую приходится решать при выделении возможных движущихся объектов, - это подбор порогового ограничения по яркости. Естественным представляется выделение целей на битовом изображении, то есть возникает проблема перевода изображения из 8-битной градации серого в битовое черно-белое представление, для чего и необходимо нахождение порога. Обычные алгоритмы для подбора значения, как например, алгоритмы, представленные в [2], неприменимы вследствие невозможности оценки соотношения площади целей к площади фона. В результате возникает итерационный алгоритм подбора порога:

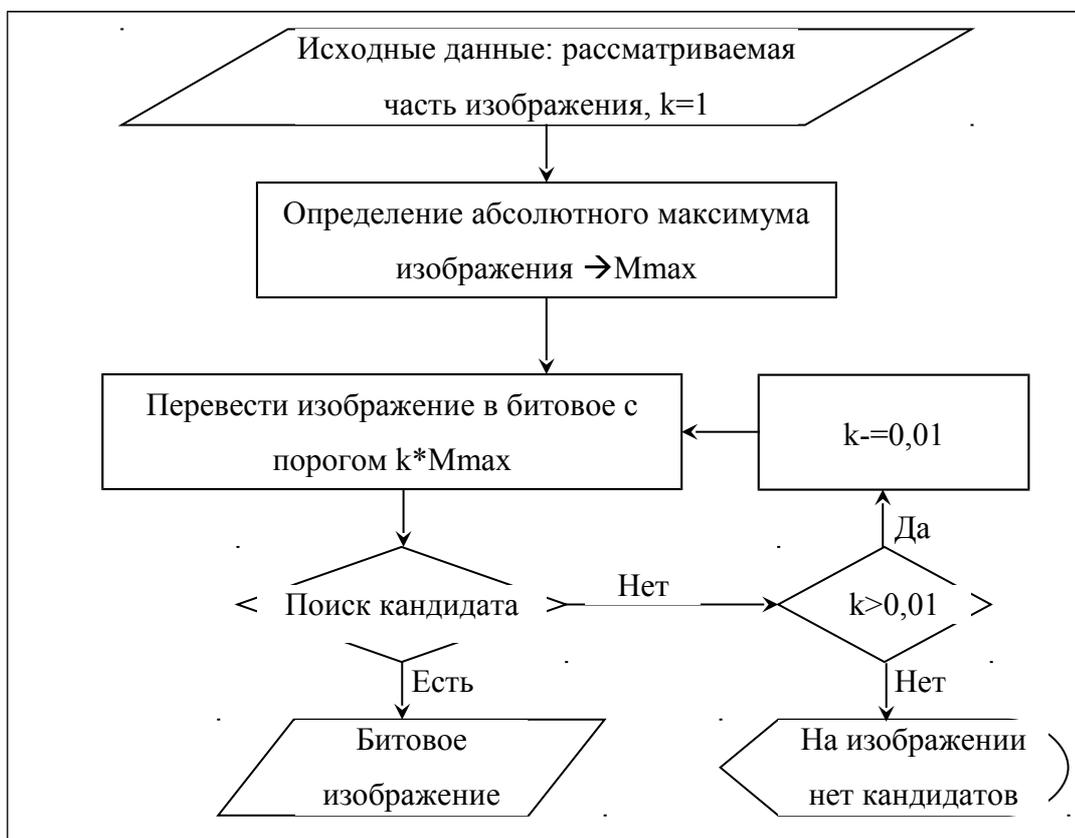


Рисунок 3. Алгоритм перевода изображения градаций серого в битовое

В данном алгоритме используется часть изображения, а не всё изображение полностью в силу ряда причин. Во-первых, яркости целей могут быть различны на всём изображении, и подстройка порога может привести к потере некоторых целей. Во-вторых, заранее не известно, в каких направлениях движутся цели и, в силу того, что яркость одного и того же объекта может меняться на разных субапертурных изображениях, может возникнуть неопределенность в разделении целей и определении их характеристик. Таким образом, делается предположение, что исходное изображение можно разделить на такие части, что можно будет утверждать наличие в них не более одного объекта КДЦ.

Далее везде, если специально не оговорено, будет рассматриваться только часть изображения с одним объектом.

После перевода изображения в битовый вид необходимо выделить КДЦ. Для этого используется простой рекурсивный алгоритм обхода для поиска 8-связанной области:

1. Ищется первая светлая точка;
2. Координаты точки запоминаются;
3. Точка помечается как тёмная;
4. Если есть таковая, то берется следующая яркая соседняя точка по кругу и переход к шагу 2;
5. Берется следующая по кругу яркая точка для предыдущей точки и переход к шагу 2;

6. На выходе алгоритма – список координат точек объекта.

Определение скорости

Алгоритм определения скорости удобно разделить на две части, для каждой компоненты скорости.

Определение азимутальной компоненты скорости

Азимутальная компонента скорости предположительно движущейся цели получается путем определения вектора смещения. Вектор смещения определяется нахождением смещения координат геометрического центра цели на каждом из последовательных субапертурных изображений и нахождения среднего значения этих смещений.

Можно показать [1], что азимутальная компонента скорости цели может быть определена по азимутальной компоненте вектора смещения Δx как

$$\bar{v}_{Tx} = v_{Ax} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{2\Delta x \delta x v_{Ax}}{\Delta f_i \lambda R_{T_0}} \right)^{-\frac{1}{2}} \right], \quad (6)$$

где δx – расстояние в пикселях в азимутальном направлении и Δf_i – разница между центрами последовательных субапертур (количество отсчетов). Выражение (6) можно упростить и привести к виду:

$$\bar{v}_{Tx} \approx \frac{\Delta x \delta x}{2\Delta t} = -\frac{\Delta x \delta x v_{Ax}^2}{\Delta f_i \lambda R_{T_0}}, \quad (7)$$

где $\Delta t = t_i - t_{i-1}$, которое будет верно только для небольших скоростей цели $|v_{Tx}| \ll v_{Ax}$.

Определение компоненты скорости по дальности.

Смещение компоненты вектора по дальности Δy – не точное измерение для компоненты скорости по дальности v_{Ty} , с этого момента для радиально движущейся цели изменение местоположения на изображениях в направлении дальности будет ошибочно. Вследствие этого возникает задача компенсации миграции цели в направлении дальности. Таким образом, оценивание дальностной компоненты скорости может быть получено следующим путем.

Если взять цель с дальностной компонентой скорости v_{Ty} , отображение этой цели в Доплеровском спектре будет сдвинуто на

$$f_{Dr} = -\frac{2v_{Ty} \sin \gamma}{\lambda}, \quad (8)$$

где γ обозначает угол атаки. Этот Доплеровский сдвиг является причиной появления цели на серии РЛИ сдвинутой на

$$\Delta t_T \approx -\frac{f_{D_T} \lambda R_{T_0}}{2v_{Ax}^2} = \frac{v_{Ty} \sin \gamma R_{T_0}}{v_{Ax}^2}. \quad (9)$$

Другими словами, дальностная компонента скорости может быть оценена по оценке этого временного сдвига. Здесь этот временной сдвиг определяется по оценке амплитуды сигнала цели от изображения к изображению. Амплитуда сигнала является продуктом реального раскрыва антенны и диаграммы направленности антенны. По ширине амплитуды сигнала на каждом РЛИ за время t_i берется временной геометрический центр $\Delta \bar{t}_T$. Применение (9) позволяет определить дальностную компоненту скорости.

Проверка КДЦ

КДЦ отслеживается от изображения к изображению в соответствии с их векторами смещения. Далее скорость усредняется по количеству замеров скорости между субапертурными изображениями. Если оценочная скорость не нулевая, она запоминается вместе с номером КДЦ и этот КДЦ считается проверенным и считается движущейся целью. Так, неподвижные КДЦ не будут запомнены.

Чтобы получить реальную азимутальную скорость, скорости оцениваются в соответствии с (6) между соседними изображениями.

Компенсация и отображение движущихся целей

Компенсация ошибок отображения выполняется по сдвигу каждой выбранной цели в последовательности, используя предыдущую оценку фигуры. Исходное положение цели может быть достигнуто, когда цель находится в центре луча антенны. Это вычисляется по найденному азимутальному положению и оцененной дальностной компоненте скорости. После этого требуется коррекция азимутального положения по формуле:

$$\Delta x = \frac{\bar{v}_{Ty} \sin \gamma}{v_{Ax}} \cdot T_{T_0}. \quad (10)$$

По усреднению соседних изображений последовательности РЛИ вокруг субапертурного изображения с центром Доплеровской частоты (ярчайшим изображением цели по всей серии) берется компенсированное полноапертурное изображение с сфокусированным изображением на оценочной позиции.

Фокусирование на саму цель приходится делать в силу того, что из-за ненулевой скорости цели для неё не подходит ОПФ всего изображения, так как смещён центр Доплеровского спектра. Эта проблема имеет очевидное решение. Так как скорость цели уже определена, цель можно окружить небольшой областью размера цели по дальности и соответствующим размером (с учётом ОПФ, компрессии) по азимуту. Далее формируется ОПФ для цели исходя из сигнала точечного объекта, движущегося с найденной скоростью.

Выполняются все те же операции, что и для синтеза основного изображения: БПФ от области голограммы с целью, БПФ от ОПФ, перемножение, взятие обратного БПФ, компрессия. И, наконец, следует отобразить сфокусированную цель на полученную ранее для нее позицию.

Размер цели ищется по сфокусированным на цели изображениям следующим путём:

1. Определяется разрешающая способность по азимуту $\rho_x = \frac{v \cdot \text{com}}{2 \cdot F_{pp}}$ и по дальности $\rho_y = dr_0$, где v – скорость носителя, com – степень сжатия по азимуту, F_{pp} – частота зондирования в азимутальном направлении, dr_0 – шаг зондирования по дальности;
2. Определённые размеры цели в количестве элементов разрешения S_p переводятся в линейные размеры $S = S_p \cdot \rho_x \cdot \rho_y$ для каждого субапертурного изображения и значение усредняется по всем субапертурным изображениям.

Результат применения алгоритма

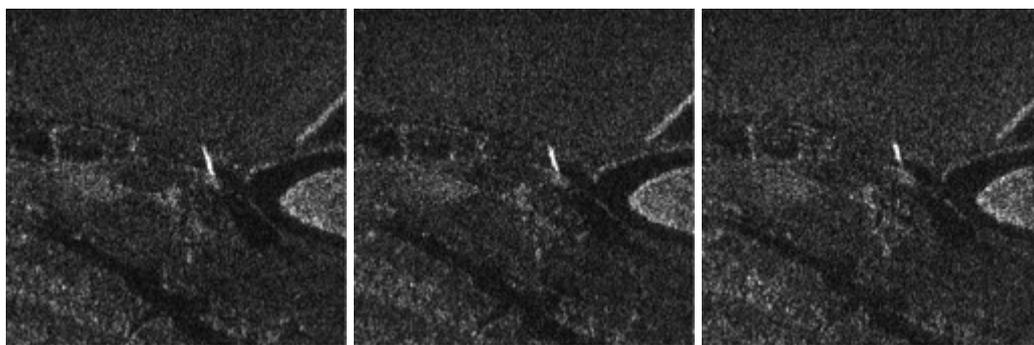


Рисунок 4. Серия субапертурных изображений

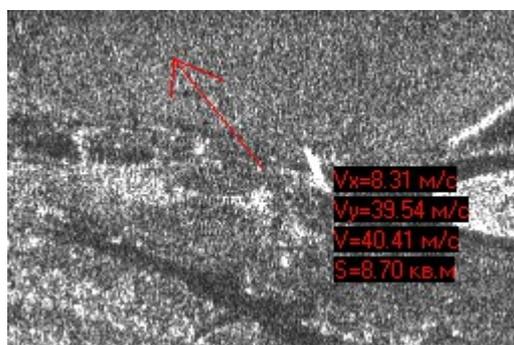


Рисунок 5. Результат применения алгоритма СДЦ к реальной голограмме

На рис. 4 представлена серия из субапертурных изображений, полученная для поиска объекта. На рис. 5 представлен результат применения алгоритма: показан вектор

направления движения, параметры движения и характеристики объекта. Характерно несовпадение вектора с изображением цели, вызванное смещением нестационарной цели.

К сильным сторонам метода следует отнести возможность селекции не только быстро движущихся объектов, что является достаточно хорошо изученной проблемой, но и нахождение объектов, движущихся медленно на скоростях от 5 м/с и выше.

Границы применимости методов.

Точность полученных результатов

В силу свойств алгоритмов, входящих в метод, необходимо выделить ряд ограничений, налагаемых на исходные данные:

1. Максимальный размер рассматриваемого кадра определяется производительностью аппаратуры, на которой производится обработка;
2. Если на входной голограмме присутствуют цели, отстоящие на малое расстояние, на данном этапе разработки алгоритма их будет невозможно достоверно разделить и определить их характеристики;
3. Обработка может проводиться только для ярких целей средних размеров (см. пп. «Выбор кандидатов в движущиеся цели»);
4. Объекты могут быть выделены и признаны движущимися в том случае, когда за время синтеза субапертуры смещение будет не меньше элемента разрешения.

Ограничения, налагаемые в п.2, можно частично снять, если включить в рассмотрение помимо субапертурных изображений изображение, полученное с использованием всей апертуры. Движущаяся цель на нём будет выглядеть вытянутой в направлении своего движения («трасса»), а изображения этой цели на субапертурных РЛИ будут принадлежать полноапертурному изображению цели. После такого дополнения цели можно разделить для случая, если их «трассы» не пересекаются.

Дальнейшее снятие ограничений возможно при использовании анализа траекторий движения целей.

Несмотря на эти ограничения, метод показал неплохую точность расчетов, высокую эффективность и хорошую устойчивость на целях, удовлетворяющих п.3.

Точность оценки координат объектов по РЛИ связана с разрешающей способностью РСА. Потенциальная точность определения местоположения одиночной точечной цели по азимуту (вдоль линии пути) при большом отношении сигнал/шум характеризуется

среднеквадратической ошибкой (СКО) σ_x , причем $\sigma_x \approx \frac{\rho_x}{2}$, где ρ_x – разрешающая

способность по азимуту [1] и аналогично $\sigma_y \approx \frac{\rho_y}{2}$, где ρ_y – разрешающая способность по дальности. Так как определение скорости и размеров линейно связано с разрешающей способностью по азимуту, то аналогично определяется точность определения скорости и размера цели.

Область применения.

Дальнейшее совершенствование

Предложенный в статье оригинальный метод определения движущихся объектов на одноантенной радиолокационной системе с синтезированной апертурой, состоящий из синтеза и обработки субапертурных изображений предназначен для всепогодного выделения движущихся объектов на РЛИ в реальном масштабе времени и определения их характеристик движения и местоположения. Область применения определяется возможностью размещения и функционирования аппаратуры РСА и аппаратуры для динамического анализа полученных результатов.

Дальнейшее совершенствование метода планируется в следующих направлениях:

1. Оптимизация (повышение скорости выполнения алгоритмов) для больших размеров динамической области обработки;
2. Повышение точности алгоритмов;
3. Распространение алгоритма на малые и медленно движущиеся цели, а также объекты с низким контрастом;
4. Создание и использование Базы Знаний (БЗ) по возможным целям и динамическое определение наряду с параметрами объекта также возможного типа объекта;
5. Определение дальнейшей траектории движения объекта.

Список использованной литературы

1. Антипов В.Н., Горяинов В.Т., Кулин А.Н. и др. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры. - М.: Радио и связь, 1988. – 304с.
2. У. Претт. Цифровая обработка изображений. Том 2. - М.: Мир, 1982. – 794с.
3. Martin Kirscht. Detection and focused imaging of moving objects evaluating a sequence of single-look SAR images. //3rd International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Copenhagen, Denmark, 1997. - Vol. I, pp. 393-400.

Сведения об авторе

Лифанов Алексей Сергеевич, студент шестого курса факультета прикладной математики и физики Московского авиационного института (государственного технического университета).

E-mail: porutch@mailru.com.