

СЛЕПОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

О.В. Горячкин,

Поволжская государственная академия телекоммуникаций и информатики

Аннотация

В статье рассматривается проблема компенсации эффектов деградации пространственной разрешающей способности РЛС с синтезированной апертурой (РСА), возникающих вследствие эффектов распространения радиоволн в атмосфере Земли и погрешностей знания геометрии относительного движения РСА и отражающей поверхности. Предлагаются алгоритмы слепого восстановления изображений РСА, в том числе, основанные на методе минимальной энтропии, для случаев как параметрической (автофокусировка), так и непараметрической неопределенности. Приводятся результаты экспериментальной проверки предложенных алгоритмов при восстановлении авиационной РСА L-диапазона.

Введение

Радиолокация поверхности Земли с летательных аппаратов за последние 30 лет прошла путь от единичных научных экспериментов до устойчиво развивающейся отрасли дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [1].

От применения этих систем научное сообщество ожидает в ближайшем будущем существенного прогресса в решении таких глобальных проблем как предсказание землетрясений и извержений вулканов, понимания процессов глобального изменения климата и в науке о Земле в целом.

Помимо научного назначения эти системы сегодня являются уникальным инструментом при решении таких практических задач как контроль чрезвычайных ситуаций, экологический мониторинг, картография, сельское хозяйство, мореплавание во льдах и прочее. Следует также отметить, что эти системы являются одним из эффективных инструментов контроля за выполнением договоров по разоружению.

Расширение областей применения РСА стимулирует постоянный рост требований к их пространственному разрешению, а также освоению новых частотных диапазонов.

При этом становится все более значимым эффект деградации пространственного разрешения радиолокационных изображений (расфокусировка), который возникает в этих системах вследствие погрешности траекторных измерений, влияния среды распространения, движения цели.

Задача автоматической фокусировки изображений радиолокаторов с синтезированной апертурой впервые стала актуальной в связи с повышением пространственного разрешения авиационных РСА до уровня единиц метров в конце 80-х и первой половине 90-х годов. Проблема была вызвана тем, что навигационные системы самолета не могли с необходимой точностью обеспечить измерение траектории перемещения фазового центра антенны РСА, что является необходимым условием получения высокого пространственного разрешения [2].

Качественно, процесс формирования радиолокационных изображений в РСА показан на рис. 1. Этот процесс сводится к отображению двумерного

комплексного коэффициента рассеяния поверхности Земли с помощью линейного интегрального оператора \mathbf{H} в двумерный комплексный сигнал в приемнике РСА (голограмму), искаженную тепловым шумом, затем, в устройстве обработки осуществляется обратное изображение \mathbf{H}^{-1} в комплексное изображение

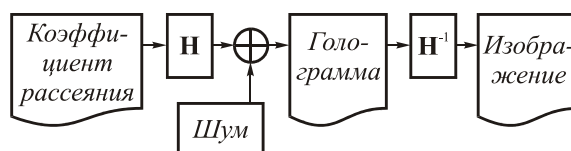


Рис. 1. Формирование изображения в РСА

В целом задача формирования радиолокационных изображений относится к классу обратных задач. Неопределенность относительно одного или нескольких параметров псевдообратного или регуляризирующего оператора \mathbf{H}^{-1} и составляет существо проблемы параметрической фокусировки радиолокационных изображений [3].

В такой постановке проблема в большинстве случаев была успешно решена разработкой алгоритмов цифровой автофокусировки изображений РСА.

В настоящее время известны две основных группы алгоритмов автофокусировки, это алгоритмы, основанные на использовании критерия качества в виде локальных статистик РСА изображений, и алгоритмы, использующие корреляционные свойства расфокусированных изображений [3, 4].

В большинстве случаев эти алгоритмы обеспечивают достижение заданного уровня разрешения, однако в случае, когда РСА устанавливается на летательных аппаратах легкого класса (малая авиация, вертолеты, беспилотные самолеты), вариации параметров фокусировки становятся сравнимы с интервалом синтеза апертуры. В этом случае получение заданного уровня разрешения требует использования более адекватных моделей траекторного сигнала и более эффективных алгоритмов автофокусировки.

В отличие от задачи параметрической фокусировки, когда неизвестны один или несколько параметров траекторного сигнала, в задаче непараметрической фокусировки приходится восстанавливать неизвестный оператор \mathbf{H}^{-1} в целом [3].

Задача непараметрической фокусировки возникает, в основном, вследствие эффектов распространения сигналов РСА в атмосфере [5] и характерна в большей степени для РСА космического базирования и авиационных РСА, уровень пространственного разрешения которых достигает единиц сантиметров и требует использования сверхширокополосных сигналов.

Традиционно подобная задача составляет предмет «слепой» обработки сигналов [6]. В данной работе мы рассмотрим алгоритмы слепого восстановления изображений РСА на основе т.н. контрастных функций [7], полученных из тех или иных предположений о свойствах радиолокационных изображений для задач как параметрической, так и непараметрической фокусировки.

1. Математическая модель радиоголограммы РСА

В [5] были получены общие выражения, описывающие отраженный сигнал космической РСА:

$$\dot{S}(t, kT) = \iint \dot{K}_A(kT, \theta, \sigma) \dot{K}_R(t - \Delta t(kT, \theta, \sigma)) \cdot \dot{\xi}(\theta, \sigma) g_R(\sigma) g_A(kT - \theta, \sigma) d\theta d\sigma,$$

где:

$$\begin{aligned} \dot{K}_R(t) &= \int_{-\Delta\omega}^{\Delta\omega} \dot{h}(j\omega) \dot{K}_{RE}(j\omega) \dot{K}_h(j\omega) \cdot \dot{K}_{AT}(j\omega) \exp(j\omega t) d\omega, \\ \dot{K}_A(kT, \theta, \sigma) &= \exp(j\omega_0 \Delta t(kT, \theta, \sigma)) \cdot \exp(j\omega_0 \delta(kT, \theta, \sigma)). \end{aligned} \quad (1)$$

В этом выражении: $\dot{\xi}(\theta, \sigma)$ – коэффициент отражения подстилающей поверхности; $\dot{h}(j\omega)$ комплексная огибающая зондирующего сигнала; $\dot{K}_{RE}(j\omega)$ – описывает рефракцию зондирующего сигнала в регулярной атмосфере; $\dot{K}_h(j\omega)$ – передаточная характеристика аппаратного тракта; $\Delta t(kT, \theta, \sigma)$ – регулярная часть временного запаздывания сигнала в атмосфере; $\delta(kT, \theta, \sigma)$ – флуктуационная компонента временного запаздывания сигнала в турбулентной атмосфере; t, kT – координаты (задержка, номер зондирующего сигнала); θ, σ – координаты элемента подстилающей поверхности (азимут, дальность); g_A и g_R вещественные функции описывающие модуляцию сигнала диаграммой направленности антенны РСА.

Данная модель описывает все основные эффекты, приводящие к искажениям РЛИ вследствие эффектов распространения радиоволн в атмосфере Земли и погрешностей знания траектории относительного движения.

В частности, искажения, возникающие вследствие распространения через атмосферу Земли широкополосных сигналов, описываются передаточной функцией $\dot{K}_{RE}(j\omega)$ и влияют на разрешающую спо-

собность РСА по дальности. При этом учитываются как искажения, вызванные частотной зависимостью коэффициента преломления ионосферы, так и поляризационная дисперсия, возникающая вследствие эффекта Фарадея. Вопросы, связанные с масштабом влияния данного эффекта и параметрические модели передаточной функции достаточно полно рассмотрены в [9].

К задаче непараметрической фокусировки приводят флуктуации времени распространения сигнала в атмосфере $\delta(kT, \theta, \sigma)$, вызванные относительным движением РСА и атмосферных неоднородностей и влияющие на разрешающую способность РСА в сечении азимута. Оценка влияния данного эффекта на разрешающую способность РСА приведена в [8].

Классический случай параметрической фокусировки возникает вследствие погрешности знания траектории относительного движения РСА и отражающей поверхности. При этом имеет место параметрическая неопределенность относительно регулярной части временного запаздывания сигнала в атмосфере $\Delta t(kT, \theta, \sigma)$. На азимутальное разрешение РСА оказывает влияние коэффициент, определяющий квадратичный фазовый набег в выражении (2).

$$\Delta t(kT, \theta, \sigma) = \frac{2}{c} \times \left[F_p \left(\frac{c\sigma}{2} \right) + \frac{1}{c} \cdot F_p' \left(\frac{c\sigma}{2} \right) \cdot \frac{1}{\sigma} \cdot \left((\mathbf{R}_c''(\theta), \mathbf{R}_c(\theta) - \mathbf{R}(\theta, \sigma)) + (\mathbf{R}'_c(\theta), \mathbf{R}'_c(\theta)) \right) \cdot (kT - \theta)^2 \right]. \quad (2)$$

В этом выражении F_p – функция, описывающая влияние среды распространения; $\mathbf{R}_c(\theta)$ – вектор положения летательного аппарата; $\mathbf{R}(\theta, \sigma)$ – вектор, описывающий геометрию отражающей поверхности в некоторой геоцентрической системе координат.

Поскольку часто траектория перемещения фазового центра антенны РСА не является прямолинейной, то данный коэффициент, называемый также коэффициентом фокусировки, является функцией траекторного времени. Поэтому запишем коэффициент фокусировки через «эквивалентную» скорость прямолинейного движения (3):

$$V(\theta, \sigma) = F_p' \left(\frac{c\sigma}{2} \right) \cdot ((\mathbf{R}_c''(\theta), \mathbf{R}_c(\theta) - \mathbf{R}(\theta, \sigma)) + (\mathbf{R}'_c(\theta), \mathbf{R}'_c(\theta))). \quad (3)$$

Эквивалентная скорость, как мы видим из этого выражения, связана с модулем вектора скорости и проекцией ускорения на наклонную дальность, а также с коэффициентом, отражающим влияние регулярной атмосферы.

Циклическое смещение азимутального спектра радиолокационного изображения (РЛИ), (называе-

мого в зарубежной литературе доплеровским центроидом [2]), обычно связано с линейным фазовым набегом траекторной фазы (2). Однако в (2) имеет место только квадратичный фазовый набег. Это свидетельствует о том, что значение доплеровского центроида зависит только от ориентации диаграммы направленности антенны РСА. Оценка доплеровского центроида является необходимой при коррекции линейных искажений масштаба РЛИ [2], но собственно на его качество (пространственное разрешение) не влияет. Данная задача представляется на данный момент достаточно полно исследованной и в данной работе не рассматривается.

В дискретном представлении модель радиоголограммы РСА можно представить в виде:

$$\dot{y}_{k,m} = \sum_i \sum_j \dot{h}_{i,j,k,m} \cdot \dot{x}_{i,j} + \dot{n}_{k,m}, \quad (4)$$

где: $\dot{y}_{k,m}$ – отсчеты радиоголограммы, $\dot{h}_{i,j,k,m}$ – нестационарное ядро интегрального оператора (1), $\dot{x}_{i,j}$ – восстанавливаемые комплексные отсчеты изображения, $\dot{n}_{k,m}$ – комплексный гауссовский белый шум. В операторной форме:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{n}. \quad (5)$$

При решении задачи непараметрической фокусировки мы полагаем неизвестными коэффициенты $\dot{h}_{i,j,k,m}$, в случае параметрической неопределенности, каждый из отсчетов $\dot{h}_{i,j,k,m}$ является известной функцией одного или нескольких неизвестных параметров.

2. Алгоритмы слепого восстановления изображений РСА

Как уже отмечалось выше, проблема фокусировки радиолокационных изображений относится к классу задач слепой обработки сигналов. На сегодняшний день известно большое число подходов к решению подобных задач.

Как правило, слепое оценивание канала опирается на использование известной структуры линейного оператора \mathbf{H} или известные свойства входного сигнала \mathbf{x} в (5). Например, когда имеется известное вероятностное описание или имеет место свойство конечного алфавита, нестационарность или негауссовость входного сигнала.

Впервые такого рода алгоритм прямого слепого восстановления входного сигнала применительно к цифровым системам передачи с амплитудной модуляцией был предложен Сато в 1975 г. [10]. Алгоритм Сато был впоследствии обобщен Годардом в 1980 г. [11] для случая комбинированной амплитудно-фазовой модуляции и широко известен сегодня как «алгоритм постоянных модулей». В общем виде алгоритмы данного типа относятся к классу так называемых стохастических градиентных алгоритмов слепого выравнивания, которые строятся по принципу адаптивного обратного фильтра. Сигнал ошиб-

ки, в данном случае, формируется безинерционным нелинейным преобразованием выходного сигнала, зависящим от вида используемой сигнально-кодовой конструкции.

Следующим этапом в развитии методов слепой обработки сигналов стало использование статистик высокого порядка для слепой идентификации каналов, входные сигналы которых описываются моделью стационарных случайных процессов. Известно, что ковариационные функции стационарного процесса на выходе линейной системы не содержат информации о фазе передаточной функции системы, это обусловило интерес к статистикам более высокого порядка и, соответственно, к негауссовским моделям сигналов [12].

Использование статистик 2-го порядка для слепой идентификации канала возможно в рамках модели векторного канала [13]. Кроме того, использование статистик 2-го порядка для слепой идентификации скалярного канала возможно для нестационарной модели входного или выходного сигналов и, в частном случае, периодически-коррелированного (или циклостационарного) сигнала [14].

Большинство упомянутых подходов явно используют теплицеву структуру оператора \mathbf{H} . В то же время (1) и (4) имеют нестационарную структуру. Явные ограничения на стационарность отсутствуют в стохастических градиентных алгоритмах слепой коррекции. Поэтому при разработке алгоритмов фокусировки радиолокационных изображений мы будем придерживаться этого подхода.

В задачах слепого разделения источников и слепого обращения свертки идея стохастических градиентных алгоритмов слепой коррекции была впоследствии обобщена в методе контрастных функций [7, 15].

В соответствии с этим подходом, если отсчеты входного сигнала независимы и имеют негауссово распределение, то найдется такая вещественная функция $q(\dot{x})$ (контрастная функция), стохастическая минимизация которой обеспечивает в среднем однозначное решение задачи слепой идентификации системы (5). При этом данная функция должна удовлетворять следующим условиям:

- 1) $\mathbf{M}\{q(\dot{x})\}$ должна быть аффинным инвариантом;
- 2) $\mathbf{M}\{q(\dot{x})\} \geq 0$;
- 3) $\mathbf{M}\{q(\tilde{x}_{k,m})\} \leq \sum_i \sum_j |\dot{g}_{i,j,k,m}|^2 \cdot \mathbf{M}\{q(\dot{x}_{i,j})\}$,

где $\dot{g}_{i,j,k,m} = \sum_l \sum_n \dot{h}_{l,n,i,j} \dot{h}_{k,m,k,m}^*$.

В более общем виде алгоритм слепого восстановления можно записать в виде:

$$\tilde{\mathbf{x}} = \arg \left(\max_{\mathbf{H}^{-1}} \left(Q(\mathbf{H}^{-1} \mathbf{y}) \right) \right) \mathbf{y}, \quad (6)$$

где: $Q = \mathbf{M}\{q(\tilde{x}_{i,j})\}$ – нелинейный функционал, $\tilde{\mathbf{x}}$ – восстановленное изображение.

Выбор контрастной функции неоднозначен и диктуется особенностями задачи. Фактически контрастная функция является критерием качества решения задачи восстановления сигнала или изображения. Частными случаями реализации данного подхода являются алгоритм максимального правдоподобия (МП), алгоритм минимума энтропии (МЭ), метод кумулянтных функций, алгоритмы Базганга.

Метод максимального правдоподобия

Пусть комплексные отсчеты восстанавливаемого изображения независимы и имеют негауссово распределение. Тогда их совместная плотность вероятности имеет вид:

$$p_x(\mathbf{x}) = \prod_i \prod_j p_{i,j}(\dot{x}_{i,j}), \quad (7)$$

где $p_{i,j}(\cdot)$ – плотность вероятности комплексного (i, j) отсчета радиоизображения.

Без потери общности будем полагать, что оператор \mathbf{H} обратим. Тогда в отсутствие шумов функционал правдоподобия отсчетов радиоголограммы можно записать в виде:

$$L(\mathbf{y} | \mathbf{H}^{-1}) = \sum_i \sum_j \log(p_{i,j}(\tilde{x}_{i,j}(\mathbf{y}))) + \log(J(\mathbf{y}, \mathbf{H}^{-1})), \quad (8)$$

где: $\tilde{x}_{i,j}(\mathbf{y})$ – координатные функции, $J(\mathbf{y}, \mathbf{H}^{-1})$ – якобиан отображения \mathbf{H}^{-1} . Отсутствие аддитивного шума в рассматриваемой модели радиоголограммы с одной стороны является существенным упрощением алгоритма, с другой стороны не является критичным моментом для РСА, у которых при формировании изображения уровень аддитивных шумов часто не более -20...-30 Дб.

Поскольку \mathbf{H}^{-1} – линейный оператор, и восстанавливаемое изображение может иметь в принципе любой постоянный комплексный множитель, то мы можем положить, что $J(\mathbf{y}, \mathbf{H}^{-1}) = J(\mathbf{H}^{-1}) = 1$, тогда алгоритм максимального правдоподобия можно записать в виде:

$$\tilde{\mathbf{x}} = \arg \left(\max_{\mathbf{H}^{-1}} \left(\sum_i \sum_j \log(p_{i,j}(\tilde{x}_{i,j}(\mathbf{y}))) \right) \right) \cdot \mathbf{y}. \quad (9)$$

Если предположить локальную однородность фокусируемого фрагмента РЛИ, то при достаточно большом числе отсчетов внутри фрагмента асимптотически получается алгоритм восстановления в виде [18]:

$$\tilde{\mathbf{x}} = \arg \left(\min_{\mathbf{H}^{-1}} \left(\mathbf{M} \left\{ \log \left(\frac{1}{p_x(\tilde{x}_{i,j}(\mathbf{y}))} \right) \right\} \right) \right) \cdot \mathbf{y}. \quad (10)$$

Таким образом, метод максимального правдоподобия является частным случаем метода контрастных функций, а именно, когда контрастная функция

$q(\dot{x}) = \log(p_x(\dot{x}))$. Функционал качества в этом случае можно записать в виде:

$$Q = D_{KL}(\dot{x} || \tilde{x}) + H(\tilde{x}), \quad (11)$$

где: $D_{KL}(\dot{x} || \tilde{x})$ – расстояние Кульбака-Лейблера между распределением вероятности отсчетов восстанавливаемого и истинного изображений, $H(\tilde{x})$ – энтропия восстановленного изображения.

Метод минимума энтропии

В методе минимума энтропии используется несколько отличная от метода максимального правдоподобия идея выбора контрастной функции или функционала качества.

Если отсчеты истинного изображения имеют негауссово распределение, то любая их линейная комбинация дает случайную величину, распределение которой асимптотически приближается к Гауссову вследствие центральной предельной теоремы.

Тогда функционалом качества может быть расстояние Кульбака-Лейблера, между распределением вероятности отсчетов восстанавливаемого изображения и некоторой Гауссовой случайной величиной:

$$Q = H(\tilde{x}) - \log \left(\sqrt{2\pi e \mathbf{M} \{ \tilde{x}^2 \}} \right) \quad (12)$$

или для нормированных данных:

$$Q = H(\tilde{x}) \quad (13)$$

При этом контрастная функция $q(\tilde{x}) = \log(p_{\tilde{x}}(\tilde{x}))$.

Данный подход был, по-видимому, впервые использован в задачах сейсмологии Уидженсом [16]. В задаче фокусировки изображений РСА возможность использования данного метода обсуждалась в контексте обработки радиолокационных изображений первой космической РСА Seasat (США) в 1991 г.

В 1992 году, при обработке радиолокационных изображений авиационной РСА «МАРС», полученных в рамках совместных работ ЦСКБ (Самара) и ИРЭ АН УССР (Харьков) по экологическому мониторингу г. Самары, автором (независимо от упомянутых работ) в разработанном программном обеспечении был использован алгоритм автофокусировки по критерию минимума энтропии. При этом в отличие от упомянутых алгоритмов, использовалась гистограммная оценка энтропии радиолокационного изображения [17].

Различные модификации кумулянтных методов можно получить, разложив в степенной ряд контрастные функции методов МП или МЭ, при этом обычно используются комбинации кумулянтов выше 2-го порядка.

Реализация алгоритмов фокусировки

Основное отличие методов МП и МЭ в том, что для вычисления значения функционала качества в первом случае требуется знание априорного распределения вероятности отсчетов истинного изображения, а во втором – апостериорного распределения вероятности отсчетов восстанавливаемого изображения.

Если априорное распределение нам неизвестно, то использование метода минимума энтропии более предпочтительно, поскольку мы, естественно, имеем выборку отсчетов восстанавливаемого изображения и можем оценить по ним значение энтропии.

Для формирования контрастной функции в этом случае можно использовать оценку плотности вероятности комплексных отсчетов изображения в виде:

$$\hat{f}_x(x_{re}, x_{im}) = \frac{1}{NM} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} \mu(x_{re} - \text{Re}(\tilde{x}_{i,j})) \cdot \mu(x_{im} - \text{Im}(\tilde{x}_{i,j})), \quad (14)$$

где: $\mu(x)$ – положительная функция окна, такая что $\int \mu(x) dx = 1$.

Оценка энтропии может быть далее получена в виде:

$$\hat{H}(\tilde{x}) = \iint \hat{f}_x(x_{re}, x_{im}) \log(\hat{f}_x(x_{re}, x_{im})) dx_{re} dx_{im}. \quad (15)$$

При однопараметрической фокусировке РЛИ этого достаточно для реализации алгоритма.

В случае непараметрической фокусировки или наличия нескольких параметров можно использовать хорошо разработанные в приложениях адаптивной фильтрации алгоритмы нелинейной оптимизации Ньютона или градиентного спуска [19].

При этом выбранная функция окна $\mu(x)$ должна иметь производную по крайней мере 1-го порядка.

3. Экспериментальная обработка алгоритмов слепого восстановления изображений РСА

Особенности применения данных методов, иллюстрирует пример восстановления РЛИ самолетной РСА L - диапазона в составе радиолокационного комплекса «МАРС» (Украина). Данный комплекс разработан в ИРЭ АН УССР (в настоящее время Исследовательский Центр Радиофизических Методов Дистанционного Зондирования Земли им. А.И. Калмыкова). Обработка по координате наклонной дальности в этой системе осуществляется на аппаратном уровне, поэтому цифровое восстановление РЛИ осуществляется только в сечении путевой дальности.

Анализируемая голограмма г. Самара получена 12.12.91 г. Параметры радиоголограммы: 768×6092 комплексных отсчетов; начальная задержка – 61 мкс; период повторения импульсов – 100 Гц; частота дискретизации 24 МГц; длина волны – 23 см.

При обработке использовались алгоритмы МП и МЭ. Для оценки априорного распределения комплексного изображения использовалась экспоненциальная аппроксимация распределения визуально сфокусированного изображения (рис. 2).

Показанная на рис. 2. оценка плотности вероятности комплексных отсчетов РЛИ получена в соответствии с (14) для гауссовой функции окна. В алгоритме МП в качестве априорного распределения

использовалось экспоненциальное распределение с единичной дисперсией:

$$p_x(x_{re}, x_{im}) = \frac{1}{4} \exp(-(|x_{re}| + |x_{im}|)). \quad (16)$$

На рис.7 показан фрагмент РЛИ (г. Самара, район ипподрома), сформированный при различных значениях параметра эквивалентной скорости (3) РСА.

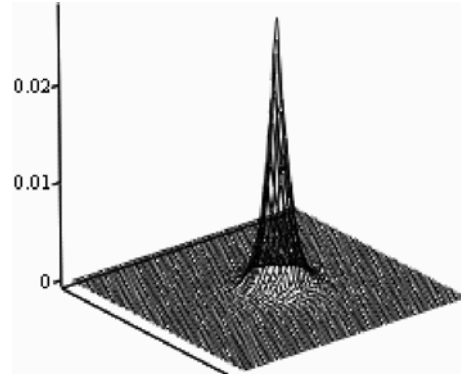


Рис. 2. Оценка плотности вероятности комплексных отсчетов РЛИ

На рис.5 и 6 показаны зависимости функционала качества для алгоритмов МЭ и МП, соответственно, оцененные на участке Б (нижняя часть фрагмента РЛИ на рис.7).

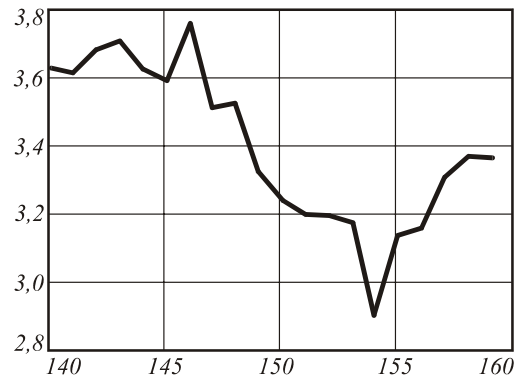


Рис. 3. Зависимость Q (по вертикали) от эквивалентной скорости V [м/с] (по горизонтали) на участке А в алгоритме МЭ

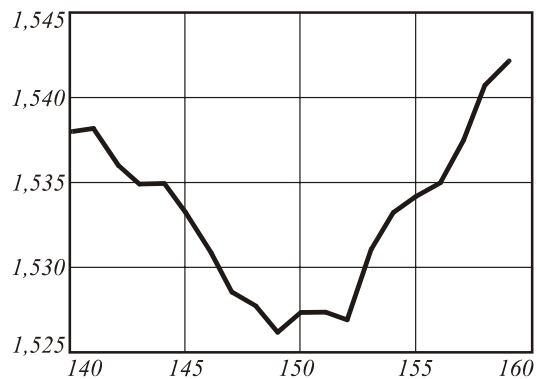


Рис. 4. Зависимость Q (по вертикали) от эквивалентной скорости V [м/с] (по горизонтали) на участке А в алгоритме МП

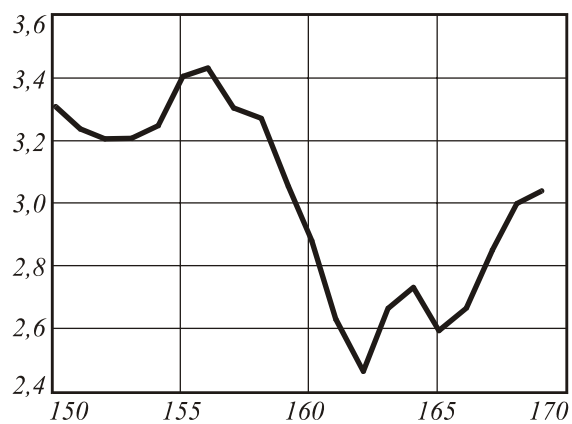


Рис. 5. Зависимость Q (по вертикали) от эквивалентной скорости V [м/с] (по горизонтали) на участке Б в алгоритме МЭ

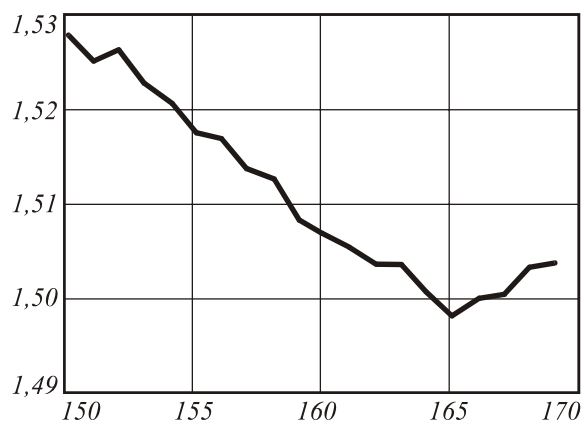


Рис. 6. Зависимость Q (по вертикали) от эквивалентной скорости V [м/с] (по горизонтали) на участке Б в алгоритме МП

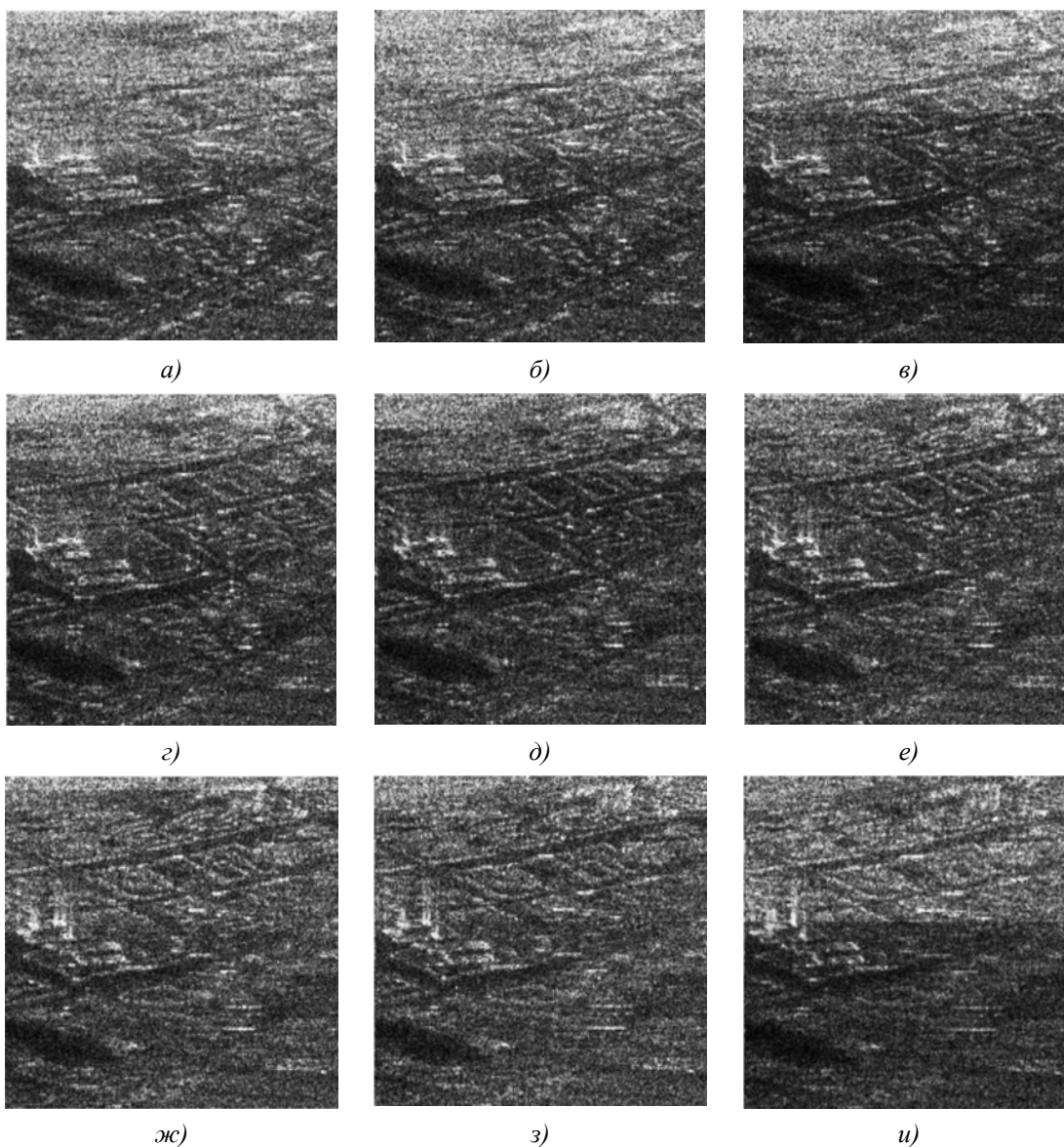


Рис. 7. Фрагмент РЛИ г. Самары для различных значений эквивалентной скорости самолета:

- а) $V = 170$ м/с, б) $V = 166$ м/с, в) $V = 162$ м/с, г) $V = 158$ м/с, д) $V = 158$ м/с,
 е) $V = 154$ м/с, ж) $V = 150$ м/с, з) $V = 148$ м/с, и) $V = 144$ м/с

На рис.3 и 4 показаны зависимости функционала качества для алгоритмов МЭ и МП, соответственно, оцененные на участке А (верхняя часть фрагмента РЛИ на рис.7).

Визуально оптимальное значение параметра фокусировки на участке А – 154 м/с (рис. 7ж)). Из рис.3 и 4 видно, что алгоритм МЭ обеспечивает более высокую точность оценки по сравнению с алгоритмом МП.

Оптимальное значение параметра фокусировки на участке Б – 166 м/с (рис.7б), яркие точки внизу фрагмента). Из рис.5 и 6 видно, что в данном случае функционал качества алгоритма МЭ дает два локальных минимума при значениях параметра фокусировки 165 м/с и 163 м/с, в то время как алгоритм МП обеспечивает оптимальную оценку. Данные различия объясняет характерная особенность участка А, который представляет собой насыщенную городскую застройку (микрорайон панельных девятиэтажек), в то же время участок Б – «зеленая» зона и частный сектор.

Заключение

Таким образом, в работе в рамках общего метода контрастных функций проведен синтез алгоритмов максимального правдоподобия и минимума энтропии для параметрической и непараметрической фокусировки изображений радиолокатора с синтезированной апертурой.

Проведенная экспериментальная отработка позволяет сформулировать качественный вывод: алгоритм МЭ обеспечивает более высокую точность фокусировки относительно алгоритма МП, но более чувствителен к сюжету РЛИ и может давать несколько локальных минимумов функционала качества.

Данные алгоритмы могут быть использованы для высокоточной фокусировки и коррекции искажений РЛИ возникающих вследствие погрешности траекторных измерений и атмосферных эффектов.

Литература

1. Горячкин О.В., Дусаев Ш.З., Железнов Ю.Е., Филимонов А.Р. Современное состояние и перспективы развития космических радиолокационных комплексов дистанционного зондирования Земли // ЦСКБ, Самара, 1999. С. 49-56.
2. Oliver C.J. Synthetic-aperture radar imaging // J.Phys. D:Appl. Phys. 22. 1989. P. 871-890.
3. Горячкин О.В. Автоматическая фокусировка изображений в радиолокаторе с синтезированной апертурой // ТУЗС «Анализ сигналов и систем связи». СПб., 1996. №161. С. 128-134.
4. Prati C. Autofocusing synthetic aperture radar images // SEP-57, 1988. P. 441-456.

5. Goriachkin O.V., Kloovsky D.D. The some problems of realization spaceborne SAR's in P, UHF, VHF bands // IEEE proceedings of 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Gamburg, Germany, 3p.
6. Горячкин О.В., Добрынин С.С. Слепая идентификация систем связи: обзор методов // Инфокоммуникационные технологии, 2003, №1.
7. Comon P. Independent component analysis, a new concept? // Signal Processing, 1994, vol.3, no.36, pp.287-314.
8. Горячкин О.В. Влияние атмосферы Земли на деградацию характеристик изображений космических радиолокационных станций с синтезированной апертурой // Компьютерная оптика. – 2002. Вып. 24. С. 177-183.
9. Кретов Н.В., Рьжкина Т.Е., Федорова Л.В. Влияние земной атмосферы на пространственное разрешение радиолокаторов с синтезированной апертурой космического базирования // Радиотехника и электроника. 1992. №1. С. 90-95.
10. Sato Y. A method of self-recovering equalization for multilevel amplitude-modulation systems. - IEEE Trans. on Communications 1975. Vol. 23. P. 679-682.
11. Godard D.N. Self-recovering equalization and carrier tracking in two dimensional data communication systems. - IEEE Trans. on Communications 1980. Vol. 28. N. 11. P.1867-1875.
12. Никиас Х.Л., Рагувер М.Р. Биспектральное оценивание применительно к цифровой обработке сигналов. - ТИИЭР, 1987. Т.75. №7. С. 5-30.
13. Tong L., Perreau S. Blind Channel Estimation: From Subspace to Maximum Likelihood Methods - IEEE Proceedings, 1998. Vol. 86. N. 10. P. 1951-1968.
14. Goriachkin O.V., Kloovsky D.D. Blind Channel Identification with Non-Stationary Input Processes // Proceedings of World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI'2001), July 22-25, 2001, Orlando, Florida, USA, Vol. XVIII. P. 386-388.
15. Donoho D. On minimum entropy deconvolution // Applied time series analysis II, D.F. Findley Editor, Academic Press, New York, 1987.
16. Wiggins R.A. Minimum entropy deconvolution, Geophysical, 16, 1978.
17. Горячкин О.В., Кловский Д.Д. Автофокусированный синтез радиолокационных изображений. // В сб.: Тезисы докладов II научно-технической конференции. Самара, 1995. С.14.
18. Goriachkin O.V., Kloovsky D.D. Techniques of blind SAR processing: Theory and practical applications // in Proc. of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'2002) and 24th Canadian Symposium on Remote Sensing, Toronto, Canada, June, 2002. 3 p.
19. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов // Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1989. 440 с.