

Непараметрический алгоритм автофокусировки, оптимальный по критерию максимума дисперсии РЛИ

С.Э. Зайцев¹, О.А. Карпов², В.В. Костров³

¹АО «ВПК «НПО машиностроения», 143966, г. Реутов, МО, ул. Гагарина, д.33, e-mail: zaisergei@mail.ru

²ЗАО «АЭРОКОН», 140180, г. Жуковский, МО, ул. Жуковского, 1, e-mail: karp.smtp@mail.ru

³МИ ВлГУ, 602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23, e-mail: vyk@mit.ru

В докладе дается математическое обоснование оценивания функции фазовых ошибок, оптимального по критерию максимума дисперсии радиолокационного изображения (РЛИ). При реализации критерия не требуется параметризации функции фазовых ошибок, но приходится решать трансцендентное уравнение для определения оценки. Предложена итерационная процедура решения трансцендентного уравнения. Рассмотрена эффективная с вычислительной точки зрения обобщенная структурная схема автофокусировки. Отмечается, что предложенный алгоритм дал положительные результаты при обработке радиоголограмм радиолокаторов с синтезированием апертуры (РСА) «Пика-М» и «Стриж».

In report is given mathematical motivation to phase error function estimation, optimum on criterion to maximum dispersions of the radar image. At realization criterion is not required parameterization to phase error function, but happens to solve the transcendental equation for determination of the estimate. The iterative procedure of the transcendental equation decision is offered. It is considered generalized structured autofocusing scheme, witch is efficient with computing point of view. It is noted that offered algorithm gave the positive results when processing radio hologram from synthetic aperture radars "Pica-M" and "Strizh".

Введение

Чтобы получить высококачественное радиолокационное изображение (РЛИ) с предельным разрешением, необходима точная информация относительного движения между радиолокатором с синтезированием апертуры (РСА) и целью, идеальная неискажающая аппаратура и трасса распространения волн. В действительности принимаемый сигнал претерпевает амплитудные и фазовые искажения, из которых наиболее сильное влияние на резкость РЛИ оказывает фазовый компонент [1]. Поэтому получение РЛИ высокого качества, так или иначе, связано с решением задачи снижения влияния фазовых искажений траекторного сигнала. К основным источникам таких искажений можно отнести:

- изменения (нестабильности) траектории носителя РСА, которые не точно оцениваются системой микронавигации;
- аппаратные искажения, возникающие при формировании, преобразовании и приеме сигналов, особенно в широкой полосе частот;
- нестабильности среды распространения радиоволн, которые приводят к вариациям времени прихода (фазы) сигнала;
- изменения высоты сцены, которая подлежит текущей съемке.

Искажения носят случайный характер, поэтому устранить их методами, например, автоматической калибровки нельзя. Наиболее эффективным средством повышения качества РЛИ в настоящее время является автофокусировка, которая представляет собой алгоритмический метод снижения фазовых ошибок [1–3]. Общая технология автоматической фокусировки заключается в оценке фазовых погрешностей, компенсации фазовых ошибок в голограмме и синтезе РЛИ на основе исправленных данных [1]. К настоящему времени разработано большое количество алгоритмов автофокусировки, среди которых наиболее известными являются метод на основе

вычисления градиента фазы, алгоритм по критерию минимума энтропии, алгоритм автофокусировки по сдвигу изображения, фазоразностный алгоритм автофокусировки [1–7]. Показательным является сравнение по требованиям первых двух методов автофокусировки. Фазово-градиентный алгоритм автофокусировки, относящийся к числу непараметрических методов, требует выделения на изображении точечных отражателей, анализа сечения двумерного траекторного сигнала и получения исправленных данных. При этом предъявляются слабые требования к построению корректирующего фильтра. Алгоритм по критерию минимума энтропии наоборот предъявляет жесткие требования к набору коэффициентов, определяющих функцию фазовых ошибок. Однако относительно анализируемой сцены выдвигаются слабые предположения, при которых яркие отражатели могут отсутствовать, а фон может иметь негауссовское распределение. Этот простой пример показывает, что при дешифрировании РЛИ желательно иметь набор средств автофокусировки, работающих по различным алгоритмам, поскольку для одной конкретной сцены наиболее эффективным может оказаться алгоритм, который в других ситуациях не давал требуемого качества. Предлагаемый алгоритм дополняет арсенал имеющихся средств автофокусировки.

Целью работы является обоснование и разработка непараметрического алгоритма, использующего в качестве критерия качества максимум дисперсии радиолокационного изображения.

Математические соотношения. Сфокусированное действительное РЛИ $|g(m,n)|$ имеет максимальное среднеквадратическое отклонение $СКО = \sqrt{D}$ и, следовательно, максимальную дисперсию

$$D = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \left(|g(m,n)|^2 - MO^2 \right), \quad (1)$$

где $MO = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} |g(m,n)|$ – его математическое ожидание,

$$g(m,n) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} F(k,n) \exp[j\varphi(k)] \exp\left(j \frac{2\pi}{M} km\right) \quad (2)$$

– комплексное РЛИ, полученное из радиоголограммы $F(k,n)$ способом гармонического анализа (ГА) – прямым преобразованием Фурье сигнала, перемноженного с опорной функцией $\exp[j\varphi(k)]$, фазовая функция $\varphi(k)$ у которой неизвестна.

Здесь M – число пикселей (длина строки) РЛИ по азимутальной координате, равное числу зондирующих импульсов на интервале синтезирования, N – число пикселей фокусируемого фрагмента РЛИ по наклонной дальности (количество строк), равное числу отсчетов принятого сигнала в каждом периоде зондирования.

Пока будем предполагать, что ширина анализируемого фрагмента РЛИ не превышает глубины фокусировки, т.е. во всех N стоках по дальности РЛИ качественно фокусируется одной и той же опорной функцией $\exp[j\varphi(k)]$.

Для удобства математических преобразований вместо (1) будем максимизировать функционал по функции $\varphi(k)$.

$$D^2 = \varepsilon \left[|g(m,n)|^2 \right] = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \left(|g(m,n)|^2 - MO^2 \right)^2 = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=-N/2}^{N/2} \left(|g(m,n)|^4 - 2MO^2 |g(m,n)|^2 \right) + MO^4 \quad (3)$$

Условие максимума

$$\frac{\partial \varepsilon' \left[|g(m,n)|^2 \right]}{\partial \varphi(k)} = 0.$$

Дифференцируя (3) по $\varphi(k)$ как по параметру, получим

$$\frac{\partial \varepsilon' \left[|g(m,n)|^2 \right]}{\partial \varphi(k)} = 2 \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \left(|g(m,n)|^2 - MO^2 \right) \frac{\partial |g(m,n)|^2}{\partial \varphi(k)}, \quad (4)$$

где

$$\frac{\partial |g(m,n)|^2}{\partial \varphi(k)} = 2 \operatorname{Re} \left[g^*(m,n) \frac{\partial g(m,n)}{\partial \varphi(k)} \right], \quad (5)$$

$$\frac{\partial g(m,n)}{\partial \varphi(k)} = j \frac{1}{M} F(k,n) \exp[j\varphi(k)] \exp\left(j \frac{2\pi}{M} km\right). \quad (6)$$

Подставив (5) и (6) в (4) будем иметь

$$\frac{\partial \varepsilon' \left[|g(m,n)|^2 \right]}{\partial \varphi(k)} = 4 \operatorname{Re} \left\{ \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \left(|g(m,n)|^2 - MO^2 \right) g^*(m,n) \frac{\partial g(m,n)}{\partial \varphi(k)} \right\},$$

или

$$\frac{\partial \varepsilon' \left[|g(m,n)|^2 \right]}{\partial \varphi(k)} = \frac{2}{M} \operatorname{Im} \left\{ \exp[j\varphi(k)] A^*(k) \right\},$$

где

$$A(k) = \sum_{n=1}^{N-1} F^*(k,n) \sum_{m=1}^{M-1} \left(|g(m,n)|^2 - MO^2 \right) g(m,n) \exp\left(-j \frac{2\pi}{M} km\right).$$

Таким образом, оценка $\hat{\varphi}(k)$ фазовой функции $\varphi(k)$, доставляющая максимум дисперсии РЛИ, определяется трансцендентным уравнением

$$\hat{\varphi}(k) = \arg[\hat{A}(k)]. \quad (7)$$

Здесь

$$\hat{A}(k) = \sum_{n=1}^{N-1} F^*(k,n) \sum_{m=1}^{M-1} \left(|\hat{g}(m,n)|^2 - MO^2 \right) \hat{g}(m,n) \exp\left(-j \frac{2\pi}{M} km\right), \quad (8)$$

$$\hat{g}(m,n) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} F(k,n) \exp[j\hat{\varphi}(k)] \exp\left(j \frac{2\pi}{M} km\right) \quad (9)$$

– комплексное РЛИ, полученное с опорной функцией $\exp[j\hat{\varphi}(k)]$,

$$MO = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} |g(m,n)|$$

– математическое ожидание его модуля.

Физический смысл

Чтобы уяснить физический смысл полученных выражений, введем в рассмотрение некоторую эталонную радиоголограмму, полученную из заранее известного эталонного комплексного РЛИ $g_{\ominus}(m,n)$ рассматриваемого фрагмента поверхности путем обратного преобразования Фурье.

$$F_{\ominus}(k,n) = \sum_{m=1}^{M-1} g_{\ominus}(m,n) \exp\left(-j \frac{2\pi}{M} km\right), \quad (10)$$

Сравнивая (10) с (2), можно увидеть, что $F_{\mathcal{D}}(k, n) = F(k, n) \exp[j\hat{\phi}(k)]$, т. е. отличается от реальной голограммы на величину экспоненциального множителя с искомой функцией $\hat{\phi}(k)$ в его аргументе.

По аналогии с (10) можем записать, что функция (8) представляет собой результат поэлементного перемножения комплексно сопряженной исходной радиоголограммы $F^*(k, n)$ с оценкой эталонной голограммы с последующим суммированием (усреднением) результата по N строкам дальности.

$$\hat{A}(k) = \sum_{n=1}^{N-1} F^*(k, n) \hat{F}_{\mathcal{D}}(k, n), \quad (11)$$

$$\hat{F}_{\mathcal{D}}(k, n) = \sum_{m=1}^{M-1} \hat{g}_{\mathcal{D}}(m, n) \exp\left(-j \frac{2\pi}{M} km\right), \quad (12)$$

Роль оценки эталонного РЛИ в (12) вместо гипотетического заранее известного эталонного РЛИ выполняет функция вида

$$\hat{g}_{\mathcal{D}}(m, n) = G(m, n) \hat{g}(m, n) = \left(|\hat{g}(m, n)|^2 - MO^2 \right) \hat{g}(m, n),$$

представляющая собой реальное (по факту – расфокусированное) комплексное РЛИ, умноженное на весовую маску $G(m, n) = |\hat{g}(m, n)|^2 - MO^2$, которая, во-первых, увеличивает вес более ярких элементов, превышающих уровень MO , во-вторых, за счет возведения в квадрат «обужает» отметки ярких объектов. Кроме того, элементы реального РЛИ с амплитудой меньше MO берутся со знаком «-», т.е. их гармоники при перемножении в (11) берутся в противофазе с гармониками исходной голограммы и при усреднении обнуляются.

Решение трансцендентного уравнения

Найти решение трансцендентного уравнения (7) можно с помощью итерационной процедуры

$$\hat{\phi}_i(k) = \arg[\hat{A}_{i-1}(k)], \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} \hat{A}_{i-1}(k) &= \sum_{n=1}^{N-1} F^*(k, n) \sum_{m=1}^{M-1} \left(|\hat{g}_{i-1}(m, n)|^2 - MO^2 \right) \hat{g}_{i-1}(m, n) \exp\left(-j \frac{2\pi}{M} km\right), \\ \hat{g}_{i-1}(m, n) &= \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} F(k, n) \exp[j\hat{\phi}_{i-1}(k)] \exp\left(j \frac{2\pi}{M} km\right) \end{aligned}$$

значения искомых функций на предыдущей итерации.

Как показывает практика, процедура (13) будет сходящейся, если начальное значение оценки $\hat{\phi}_0(k)$ в (8), (9) достаточно близко к истинной функции $\hat{\phi}(k)$. Например, в качестве таковой может использоваться фаза опорной функции $\tilde{\varphi}(k)$, рассчитанная по навигационным данным и (или) полученная другими (например, параметрическими) алгоритмами автофокусировки.

В этом случае итерационный алгоритм (13) примет вид

$$\hat{\phi}_i(k) = \tilde{\varphi}(k) + \Delta\varphi_i(k), \quad (14)$$

где

$$\Delta\varphi_i(k) = \arg[\tilde{A}_{i-1}(k)], \quad i = 0, 1, 2, \dots, \quad \Delta\varphi_0(k) = 0, \quad (15)$$

– поправка к начальной фазовой функции $\tilde{\varphi}(k)$,

$$\tilde{A}_{i-1}(k) = \sum_{n=1}^{N-1} \tilde{F}^*(k, n) \sum_{m=1}^{M-1} \left(|\tilde{g}_{i-1}(m, n)|^2 - MO^2 \right) \tilde{g}_{i-1}(m, n) \exp\left(-j \frac{2\pi}{M} km\right), \quad (16)$$

$$\tilde{g}_{i-1}(m, n) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \tilde{F}(k, n) \exp[j\Delta\varphi_{i-1}(k)] \exp\left(j \frac{2\pi}{M} km\right), \quad (17)$$

$$MO = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} |g_{i-1}(m, n)|,$$

$$\tilde{F}(k, n) = F(k, n) \exp[j\tilde{\varphi}(k)] \quad (18)$$

– голограмма, демодулированная начальной фазовой функцией $\tilde{\varphi}(k)$.

Поскольку итерационный алгоритм (14) – (18) сходится, то приращения вычисляемой функции $\Delta\varphi_i(k)$ от итерации к итерации должны уменьшаться. Поэтому критерием остановки итераций в этом алгоритме может служить уменьшение приращения фазовой поправки между итерациями

$$\delta\varphi = \max|\Delta\varphi_i(k) - \Delta\varphi_{i-1}(k)| \leq \mu \quad (19)$$

меньше некоторого уровня μ , не влияющего заметно на качество РЛИ (например, $\mu = 0,01$ рад, или $0,57^\circ$).

Отметим, что скорость сходимости алгоритма зависит от выбранного сюжета на РЛИ. Иногда оценка $\Delta\varphi_i(k)$ начинает осциллировать около истинного значения, постепенно приближаясь к нему и условие (19), при этом, не выполняется (как бы «проскакивает» минимум), в этом случае разумно ограничить число итераций некоторым большим числом, например, $I_{\max} = 200$. Как показывает практика, при таком числе итераций, даже при невыполнении (19), алгоритм (14) – (18) дает хороший результат.

Ограничение числа итераций важно также, в том случае, если алгоритм расходится.

Обобщение 1

Полученный алгоритм (14) – (18) можно обобщить на случай, когда ширина фокусируемого фрагмента РЛИ по наклонной дальности N значительно превышает глубину фокусировки. При этом качество фокусировки повышается за счет увеличения в (16) числа усреднений по строкам дальности.

Для этого вместо одномерной начальной фазовой функции $\hat{\varphi}_0(k) = \tilde{\varphi}(k)$, одинаковой для всех строк по дальности, необходимо при формировании РЛИ использовать двумерную функцию $\hat{\varphi}_0(k, n) = \tilde{\varphi}(k, n)$, учитывающую изменение фазовой зависимости отраженного сигнала от наклонной дальности n , $n = 0, 1, \dots, N-1$.

Если $\tilde{\varphi}(k, n)$ достаточно близка к истинной функции $\hat{\varphi}(k, n)$, то искомую с помощью итерационной процедуры (14) – (18) поправку

$$\hat{\varphi}_i(k, n) - \tilde{\varphi}(k, n) \approx \Delta\varphi_i(k)$$

можно считать независимой от наклонной дальности для интервала дальностей N , значительно превышающего глубину фокусировки.

В этом случае итерационный алгоритм (14) – (18) примет вид

$$\hat{\varphi}_i(k, n) = \tilde{\varphi}(k, n) + \Delta\varphi_i(k), \quad (20)$$

где

$$\Delta\varphi_i(k) = \arg[\tilde{A}_{i-1}(k)], \quad i = 0, 1, 2, \dots, \quad \Delta\varphi_0(k) = 0, \quad (21)$$

– поправка к начальной фазовой функции $\tilde{\varphi}(k, n)$,

$$\tilde{A}_{i-1}(k) = \sum_{n=1}^{N-1} \tilde{F}^*(k, n) \sum_{m=1}^{M-1} \left(|\tilde{g}_{i-1}(m, n)|^2 - MO^2 \right) \tilde{g}_{i-1}(m, n) \exp\left(-j \frac{2\pi}{M} km\right), \quad (22)$$

$$\tilde{g}_{i-1}(m,n) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \tilde{F}(k,n) \exp[j\Delta\varphi_{i-1}(k)] \exp\left(j \frac{2\pi}{M} km\right), \quad (23)$$

$$MO = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} |\tilde{g}_{i-1}(m,n)|,$$

$$\tilde{F}(k,n) = F(k,n) \exp[j\tilde{\varphi}(k,n)] \quad (24)$$

– голограмма, демодулированная начальной фазовой функцией $\tilde{\varphi}(k,n)$.

Обобщение 2

Полученный алгоритм (20) – (24) будет работать и в более общем случае, когда РЛИ формируется не только классическим способом ГА (23), а и другими способами, реализующими согласованную обработку сигнала. Например, способом прямой (ПС) или быстрой (БС) свертки, в их одномерном или двумерном (при учете миграций по дальности) варианте, а также способом ГА, модифицированном для случая миграций.

В общем случае алгоритм формирования комплексного РЛИ $\tilde{g}(m,n)$, реализующий согласованный фильтр или коррелятор, можно записать как преобразование предварительно демодулированной голограммы $\tilde{F}(k,n) = F(k,n) \exp[j\tilde{\varphi}(k,n)]$ некоторым линейным оператором $H\{\cdot\}$ с ядром $h(k,m)$, которое представляет собой комплексно сопряженный сигнал от одиночного точечного объекта:

$$\tilde{g}(m,n) = H\{\tilde{F}(k,l)\} = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} \tilde{F}(k,l) h(k,m,l,n). \quad (25)$$

Особенностью оператора, реализующего согласованную обработку, является тот факт, что обратный ему оператор $H^{-1}\{\cdot\}$, т.е. оператор, преобразующий комплексное РЛИ в радиоголограмму,

$$\tilde{F}(k,l) = H^{-1}\{\tilde{g}(m,n)\} = H^*\{\tilde{g}(m,n)\} = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \tilde{g}(m,n) h^*(m,k,n,l) \quad (26)$$

является комплексно сопряженным оператором – т.е. оператором с комплексно сопряженным ядром.

Если теперь в ядре оператора согласованной обработки (25) можно выделить множитель $\exp[j\Delta\varphi_{i-1}(k)]$ с независимой от наклонной дальности фазовой поправкой $\Delta\varphi_{i-1}(k)$:

$$h(k,m,l,n) = \exp[j\Delta\varphi_{i-1}(k)] h_0(k,m,l,n), \quad (27)$$

то

$$\tilde{g}(m,n) = H\{\tilde{F}(k,l)\} = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} \tilde{F}(k,l) \exp[j\Delta\varphi(k)] h_0(k,m,l,n), \quad (28)$$

$$\tilde{F}(k,l) = H^{-1}\{\tilde{g}(m,n)\} = H^*\{\tilde{g}(m,n)\} = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \tilde{g}(m,n) h_0^*(m,k,n,l). \quad (29)$$

Используя (28), (29) и повторив описанные выше математические преобразования (4) – (12), получим следующий обобщенный алгоритм оценки фазовой поправки $\Delta\varphi(k)$ к начальной фазовой функции $\tilde{\varphi}(k)$:

$$\Delta\varphi_i(k) = \arg[\tilde{A}_{i-1}(k)], \quad i = 0,1,2,\dots, \quad \Delta\varphi_0(k) = 0, \quad (30)$$

где

$$\hat{A}_{i-1}(k) = \sum_{n=1}^{N-1} F^*(k, n) \hat{F}_{\mathcal{A}_{i-1}}(k, n), \quad (31)$$

– поэлементное перемножение исходной голограммы с «эталонной» и усреднение по N полоскам дальности,

$$\begin{aligned} \hat{F}_{\mathcal{A}_{i-1}}(k, l) &= H^* \left\{ \left(|\tilde{g}_{i-1}(m, n)|^2 - MO^2 \right) \tilde{g}_{i-1}(m, n) \right\} = \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \left(|\tilde{g}_{i-1}(m, n)|^2 - MO^2 \right) \tilde{g}_{i-1}(m, n) h_0^*(m, k, n, l), \end{aligned} \quad (32)$$

– «эталонная» голограмма, сформированная из РЛИ

$$\tilde{g}_{i-1}(m, n) = H \left\{ \tilde{F}(k, l) \right\} = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} \tilde{F}(k, l) \exp[j\Delta\varphi_{i-1}(k)] h_0(k, m, l, n), \quad (33)$$

полученного на предыдущей итерации и умноженного на весовую маску $\left(|\tilde{g}_{i-1}(m, n)|^2 - MO^2 \right)$, где

$$MO = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} |\tilde{g}_{i-1}(m, n)|$$

– математическое ожидание модуля сформированного РЛИ.

Критерием остановки итераций в этом алгоритме может по-прежнему служить уменьшение приращения фазовой поправки между итерациями (19) меньше некоторого уровня μ , не влияющего заметно на качество РЛИ, или достижение максимального числа итераций I_{\max} .

Структурная схема обобщенного алгоритма (30) – (33) представлена на рис. 1.

Примечание 1

В случае отсутствия миграций сигнала по дальности ядро оператора формирования РЛИ $H \left\{ \tilde{F}(k, l) \right\}$ распадается на два независимых сомножителя

$$h_0(k, m, l, n) = h_A(k, m) h_R(l, n),$$

каждый из которых описывает сжатие сигнала голограммы по соответствующей координате – азимуту $h_A(k, m)$ и дальности $h_R(l, n)$.

Кроме того, после сжатия сигнала по дальности при шаге дискретизации, примерно равном элементу разрешения, можно считать, что

$$h_R(l, n) \approx \delta(l - n),$$

где

$$\delta(l - n) = \begin{cases} 1, & l = n, \\ 0, & l \neq n, \end{cases} \quad \text{– функция Кронекера.}$$

Тогда

$$\begin{aligned} \tilde{g}(m, n) &= H \left\{ \tilde{F}(k, l) \right\} = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} \tilde{F}(k, l) \exp[j\Delta\varphi(k)] h_0(k, m, l, n) = \\ &= \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{F}(k, n) \exp[j\Delta\varphi(k)] h_A(k, m), \end{aligned} \quad (34)$$

$$\tilde{F}(k, l) = H^{-1} \left\{ \tilde{g}(m, n) \right\} = H^* \left\{ \tilde{g}(m, n) \right\} = \sum_{m=0}^{N-1} \tilde{g}(m, n) \exp[-j\Delta\varphi(k)] h_A^*(k, m), \quad (35)$$

$$n = 1, 2, \dots, N, \quad l = 1, 2, \dots, N.$$

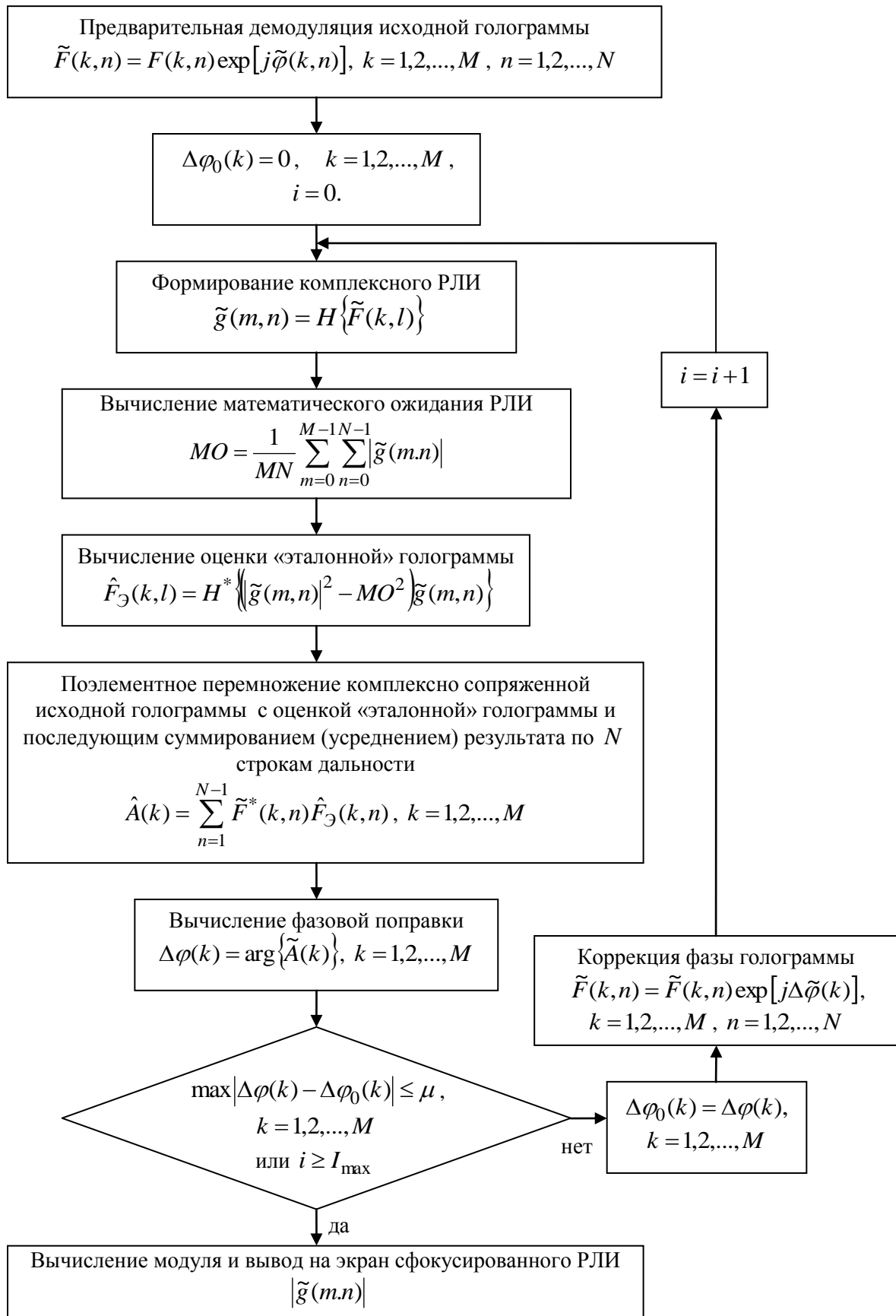


Рис. 1. Структурная схема обобщенного алгоритма.

Учитывая, что при обработке по азимуту способом ГА ядра операторов $H\{\tilde{F}(k,l)\}$ представляет собой ядро дискретного преобразования Фурье

$$h_A(k,m) = \exp\left(j\frac{2\pi}{M}km\right), \quad (36)$$

получим частный случай обобщенного алгоритма при обработке способом ГА в отсутствие миграций по дальности, описываемый формулами (20) – (24).

Примечание 2

В отсутствие миграций и обработке сигнала способом ПС ядро оператора формирования РЛИ $H\{\tilde{F}(k,l)\}$ имеет вид произведения двух сомножителей (по азимуту и дальности), каждый из которых независим и инвариантен к сдвигу по соответствующей координате (ядро оператора типа свертки):

$$h_0(k,m,l,n) = h_A(k-m,n)h_R(l-n).$$

После сжатия по дальности при шаге дискретизации, примерно равном элементу разрешения, так же как в предыдущем случае, будем считать, что

$$h_R(l-n) \approx \delta(l-n),$$

Тогда

$$\begin{aligned} \tilde{g}(m,n) = H\{\tilde{F}(k,l)\} &= \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} \tilde{F}(k,l) \exp[j\Delta\varphi(k)] h_0(k,m,l,n) = \\ &= \sum_{k=0}^{M-1} \tilde{F}(k,n) \exp[j\Delta\varphi(k)] h_A(k-m,n), \\ & \quad n = 1, 2, \dots, N, \end{aligned} \quad (37)$$

где в простейшем случае бокового обзора

$$h_A(k-m,n) = \text{rect}\left(\frac{k-m}{K}\right) \exp\left[j\frac{4\pi}{\lambda}\left(\sqrt{W^2T_0^2(k-m)^2 + R_n^2} - R_n\right)\right], \quad (38)$$

$\text{rect}(\cdot)$ – нормированное прямоугольное окно шириной, равной числу импульсов на интервале синтезирования K , λ – длина волны излучения, W – путевая скорость носителя, T_0 – период повторения зондирующих импульсов, $R_n = R_0 + n\Delta R$ – наклонная дальность до n -ой полосы дальности, R_0 – наклонная дальность до начала фокусируемого фрагмента, ΔR – шаг дискретизации голограммы по наклонной дальности. Здесь зависимость ядра $h_A(k-m,n)$ от аргумента наклонной дальности n позволяет расширить размер анализируемого участка по этому аргументу за пределы глубины фокусировки.

Оператор формирования голограммы из комплексного РЛИ при ПС также будет иметь вид оператора свертки:

$$\begin{aligned} \tilde{F}(k,l) = H^{-1}\{\tilde{g}(m,n)\} &= H^*\{\tilde{g}(m,n)\} = \sum_{m=0}^{M-1} \tilde{g}(m,l) \exp[-j\Delta\varphi(k)] h_A^*(k-m,l), \\ & \quad l = 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (39)$$

Способ БС есть реализация ПС в частотной области, поэтому

$$\tilde{g}(m,n) = H\{\tilde{F}(k,l)\} = \Phi_A^{-1}\{\Phi\{\tilde{F}(k,l)\}\Phi\{h_A(k,l)\}\}, \quad (40)$$

$$\begin{aligned} \tilde{F}(k,l) = H^{-1}\{\tilde{g}(m,n)\} &= \Phi_A^{-1}\{\Phi_A\{\tilde{g}(m,l)\}\Phi_A\{h_A^*(k,m,l)\}\}, \\ & \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad l = 1, 2, \dots, N, \end{aligned} \quad (41)$$

где $\Phi_A\{\}$ и $\Phi_A^{-1}\{\}$ – символы прямого и обратного операторов дискретного преобразования Фурье по азимутальной координате с ядром вида (36).

Примечание 3

В обобщенном алгоритме (30) – (33) (см., также, рис. 1) важно, чтобы операция (31) поэлементного перемножения комплексно сопряженной исходной голограммы с оценкой «эталонной» голограммы и последующим суммированием (усреднением) результата по N строкам дальности осуществлялась с голограммами в одинаковом функциональном состоянии. Т. е., если исходная голограмма $\tilde{F}(k, n)$ имеет миграции по дальности, то и «эталонная» $\hat{F}_\Omega(k, n)$ также должна быть сформирована с миграциями. Это, собственно, и выражает факт применения в (32) обратного оператора $H^{-1}\{\} = H^*\{\}$, который учитывает присутствие или отсутствие миграций. В частности при обработке исходной или формировании «эталонной» голограммы в условиях миграций в операторах $H\{\}$, $H^{-1}\{\}$ необходимо дополнительно предусмотреть устранение или добавление в сигнал голограммы согласованных (дружных) и несогласованных смещений сигналов отдельных элементов поверхности.

Таким образом, наличие в каждой итерации обобщенного алгоритма (30) – (33) операции формирования эталонной голограммы $\hat{F}_\Omega(k, n)$ с учетом миграций сигнала по дальности существенно увеличивает вычислительную сложность его реализации.

В связи с этим можно предложить версию обобщенного алгоритма, которая в условиях миграций более эффективна с вычислительной точки зрения. Идея заключается в том, чтобы в операции поэлементного перемножения исходной и «эталонной» голограмм (31) использовать голограммы с уже устраненными миграциями по дальности.

Для этого на начальной (нулевой) итерации алгоритма из комплексного (по факту – расфокусированного) РЛИ $\tilde{g}(m, n)$, полученного из предварительно демодулированной голограммы $\tilde{F}(k, l)$, формируется исходная голограмма с устраненными миграциями.

Ее формирование осуществляется с помощью обратного оператора $H^{-1}\{\}$ в отсутствие миграций. Для телескопического обзора поверхности и обработки способом ГА этот оператор имеет вид оператора (35), а для бокового обзора и обработке способом ПС или БС – вид операторов (37) или (41).

Сформированная таким образом исходная голограмма без миграций запоминается и во всех последующих итерациях поэлементно перемножается с «эталонными», также формируемыми из «эталонных» РЛИ операторами без учета миграций типа (35), (37) или (41) – в зависимости от вида обзора и способа обработки.

Поскольку оператор (35) есть оператор построчного (по азимутальной координате m) преобразования Фурье комплексного РЛИ, то он может быть реализован с помощью эффективного алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). Эффективный алгоритм БПФ может, также, быть использован при реализации алгоритма свертки в частотной области в операторе (41).

Структурная схема обобщенного вычислительно эффективного алгоритма представлена на рис. 2. На этом рисунке операторы формирования голограммы из РЛИ без учета миграции сигнала по дальности вида (35), (41) обозначены символами $\bar{H}\{\}$, $\bar{H}^{-1}\{\} = \bar{H}^*\{\}$ (с верхней чертой).

Примечание 4

Полученный обобщенный вычислительно эффективный алгоритм непараметрической фокусировки был опробован на реальных голограммах РЛС «Пика-М» и «Стриж», где показал работоспособность и хорошее качество фокусировки по участкам с различными типами подстилающей поверхности.

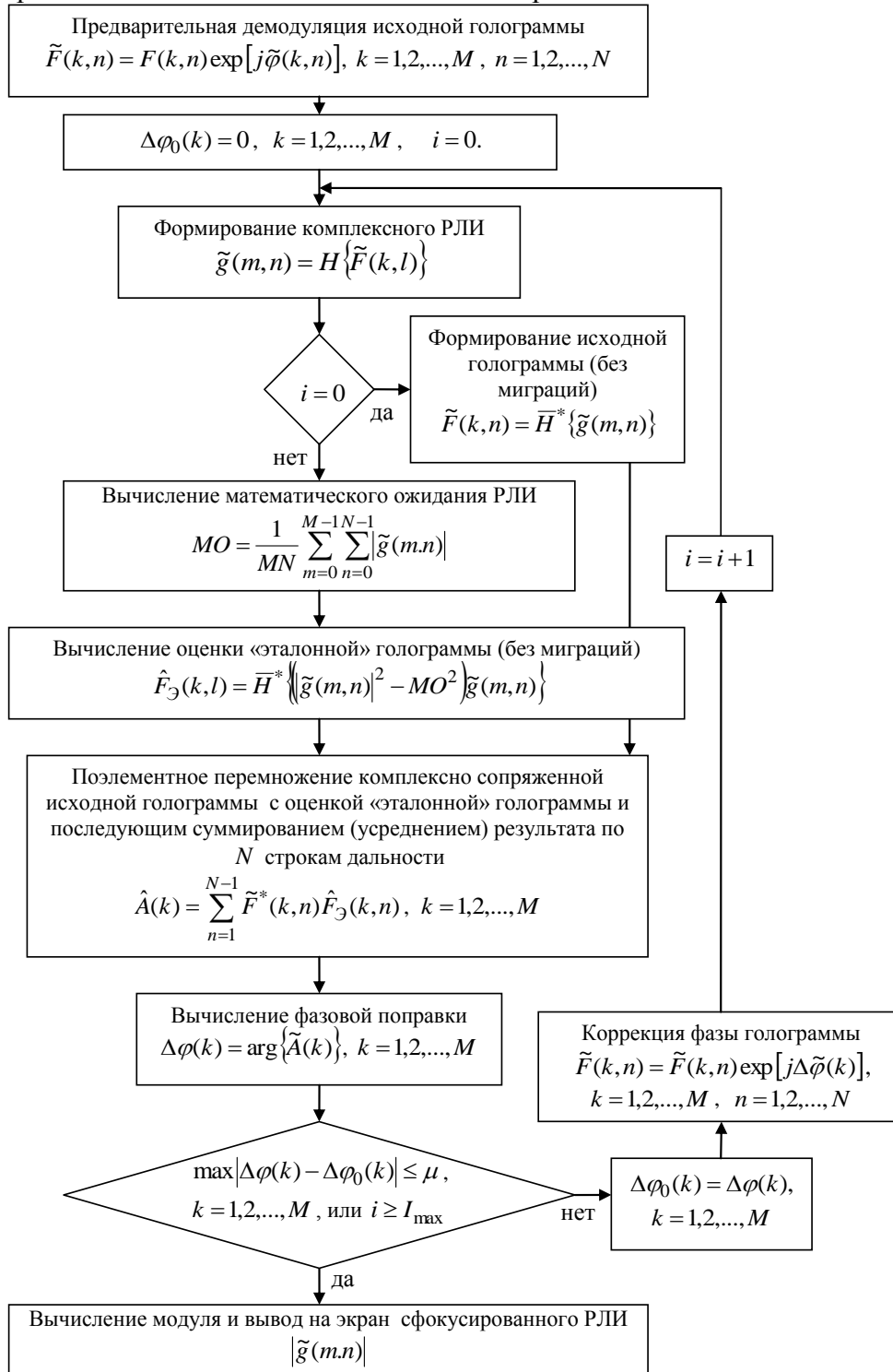


Рис. 2. Структурная схема обобщенного вычислительно эффективного алгоритма.

Литература

1. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов / Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
2. Верба В.С, Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук Э.Г. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В.С. Вербы. – М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.
3. Авиационные системы радиовидения / Под ред. Г.С.Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2015. – 648 с.
4. Wahl D.E., Eichel P.H., Ghiglia D.C., Jakowatz C.V. Phase gradient autofocus – a robust tool for high resolution SAR phase correction // IEEE Transactions Aerospace and Electronic Systems. 1994. Vol.30. No.3. P.827-835.
5. Wu X.W., Zhu Z.D. A Novel Autofocus Algorithm Based on Minimum Entropy Criteria for SAR Images // Systems Engineering and Electronics, 2003, 25(7): 867-869.
6. Song S.; Gong Y., Xie J., Ma L. A Novel Autofocus Algorithm Based on DCT Criteria for SAR Images // Journal of Information & Computational Science. 2013. Vol. 10:13. P.3999–4006.
7. Adel Ahmed M. Weighted Least Square Sar Autofocusing Technique (WLS) // International Journal of Advanced Research, 2016, Vol. 4. Issue 6. P.1506-1511.