

Проблемные вопросы адаптивного синтеза радиолокационных изображений в бистатических и моностатических системах

С.Б. Алексеев, А.М. Алексеева, Т.А. Лепёхина, С.Г. Лиханский, В.И. Николаев

АО «Концерн «Вега», г. Москва, tatonika@inbox.ru

Аннотация — В статье дан анализ основных проблем, возникающих при синтезе радиолокационных изображений в различных режимах (бистатическом, моностатическом) для радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) авиационного и космического базирования. Сделана попытка структурной унификации задачи синтеза для разных режимов. Для сложных проблем, требующих новых подходов – адаптации, фокусировки, редукции бистатического обзора к моностатическому, дано подробное математическое изложение и иллюстрации.

Ключевые слова — радиолокатор с синтезированной апертурой, миграция дальности, цифровая радиолограмма, радиолокационное изображение, опорная функция, синтез, адаптация, фокусировка, скользящее окно, закон движения.

I. ВВЕДЕНИЕ

Статья посвящена обзорному изложению основных проблем, возникающих при синтезе радиолокационных изображений (РЛИ) в различных радиолокационных (РЛ) системах и режимах съёмки. Рассмотрены бистатический и моностатический обзоры для РСА авиационного и космического базирования, маршрутный и прожекторный режимы съёмки (МР и ПР).

Доказана возможность формальной математической редукции произвольного бистатического обзора к моностатическому – с тем же законом миграции дальности в центре сцены и теми же первыми вариациями закона миграции дальности по координатам сцены, что и у бистатического обзора, выведены явные формулы.

Сделана попытка унификации проблематики РЛ синтеза для различных геометрий РЛ обзора и режимов съёмки под единую математическую и структурную схему. Обоснована возможность такой унификации, дан краткий анализ специальных случаев.

В статье представлены:

- 1) анализ основных проблем синтеза в бистатике и методов их решения, математическая редукция любого бистатического обзора к моностатическому;
- 2) обоснование необходимости адаптации (до синтеза) и/или фокусировки (после синтеза) при синтезе РЛИ высокого разрешения для различных обзоров;
- 3) методы фокусировки и адаптации.

Графические иллюстрации даны на примере задачи синтеза РЛИ по цифровым радиолограммам (ЦРГ) РСА «Кондор-Э» в МР.

II. ОБЗОР СПЕЦИФИЧНЫХ ДЛЯ БИСТАТИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ПРОБЛЕМ И МЕТОДОВ ИХ РЕШЕНИЯ

A. Сильная скошенность авиационного бистатического обзора общей конфигурации

Эта проблема может проявить себя в большом доплеровском сдвиге частоты в авиационной бистатической системе общей конфигурации (из активного РСА-1 и пассивного РСА-2) – даже при геометрически боковом обзоре со стороны РСА-2 [1 – 3] (чего не бывает в моностатике). Решение проблемы описано ниже.

Любой бистатический обзор математически редуцируем (в 2 шага) к моностатическому боковому обзору с законом движения (ЗД) носителя, дающим (в первом порядке точности по координатам точек сцены) то же семейство миграций дальности РСА → точка → РСА, что и исходный бистатический обзор с семейством миграций дальности РСА-1 → точка → РСА-2.

Шаг 1 – сведение к боковому обзору достигается компенсацией в законах миграции всех точек сцены единого линейного слагаемого, соответствующего центру сцены и центру интервала синтеза [1 – 3].

Шаг 2 – сведение эквивалентно-бокового бистатического обзора к моностатическому с тем же законом миграции центра сцены и теми же первыми вариациями закона миграции по горизонтальным евклидовым координатам y_1, y_2 сцены в окрестности ее центра.

Семейство (\bar{y} -зависимое, $\bar{y} \equiv (y_1, y_2, y_3)$, $y_3 \approx 0$ – рельефом пренебрегаем) результирующих законов миграции (после центральной компенсации) [1 – 3]:

$$r(t) = \sum_{k=1}^2 x^{(k)}(t) - t \cdot \sum_{k=1}^2 \left(\dot{\bar{x}}^{(k)}(0), \bar{x}^{(k)}(0) \right) / x^{(k)}(0), \quad (1)$$

Закон миграции центра сцены $r(t) \equiv r(0; t)$ и его первые вариации $\delta_m r(t)$; $m = 1, 2$ по координатам y_1, y_2 :

$$r(t) = \sum_{k=1}^2 x^{(k)}(t) - t \cdot \sum_{k=1}^2 \left(\dot{\bar{x}}^{(k)}(0), \bar{x}^{(k)}(0) \right) / x^{(k)}(0), \quad (2)$$

$$\delta_m r(t) = \sum_{k=1}^2 x_m^{(k)}(t) / x^{(k)}(t); \quad m=1, 2. \quad (3)$$

Исходя из соотношений (2, 3), найдем t -вектор $\bar{z}(t) \equiv (z_1(t) \ z_2(t) \ z_3(t))$ 3Д при эквивалентном моностатическом обзоре из системы трех уравнений:

$$r^2(t)/4 = \sum_{m=1}^3 z_m^2(t), \quad \delta_m r(t)/4 = z_m(t)/r(t); \quad m=1, 2. \quad (4)$$

Из (4) получаем 3Д гипотетического носителя:

$$z_m(t) = \frac{1}{4} r(t) \cdot \delta_m r(t); \quad m=1, 2, \quad z_3(t) = \frac{1}{2} r(t) \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{4} \sum_{m=1}^2 \delta_m^2 r(t)}, \quad (5)$$

где под квадратным корнем всегда положительное число, ибо модуль градиента $(\delta_1 r, \delta_2 r)$ эквивалентной дальности всегда существенно меньше 2, так как заведомо меньше суммы синусов углов «падения» и «отражения» луча РСА-1 → точка сцены → РСА-2.

После перехода к эквивалентному моностатическому обзору (в первом порядке по координатам сцены) переходим в пространство вторичных баллистических величин – законов миграции и их преобразований Лежандра (ПЛ), фигурирующих в фазах опорных функций синтеза [1 – 3], вариаций ПЛ и фаз опор по прямоугольным горизонтальным координатам сцены, а также коэффициентов Тейлора указанных функций.

Таким образом, произвольный бистатический синтез РЛИ формально математически эквивалентен (1 – 5) некоторому моностатическому (5) синтезу РЛИ любым корректным алгоритмом двумерно сверточного типа, требующим знания первых вариаций миграций (фаз опорных функций) и дающим результат в горизонтальных координатах сцены, а не в путевых координатах (не всегда определенных однозначно) [1 – 3].

В терминах вторичной баллистики бистатичность обзора никак не проявляет себя, кроме двух возможных отличий. Эти отличия, по сути, количественные, бывают столь большими, что порождают «переход в качество». Если речь идет об авиационной бистатике, то, во-первых, обеспечивающий высокое разрешение размах миграции дальности может быть так велик в отношении к минимальной дальности, что расходятся ряды Тейлора закона миграции и его преобразования Лежандра (ПЛ), фигурирующего в фазе опорных функций [2, 3], во-вторых, вариации ПЛ по азимуту могут быть столь же велики, что и вариации ПЛ по дальности. Это – следствие аналитически сложного характера законов миграции и их семейства [2, 3].

Указанные выше две специфичные для авиационной бистатики проблемы решаются далее (см. В. и С.).

В. Необходимость использования больших интервалов синтеза, на которых закон миграции не разложим в ряд Тейлора

Проблема решается представлением законов миграции, преобразования Лежандра и фазовых опорных функций синтеза через вещественные одномерные массивы [2, 3], а не через коэффициенты Тейлора. Кроме того, указанное представление массивами ускоряет вычисления во всех обзорах и режимах [2, 3]. Таким образом, представление законов миграции, ПЛ и опорных функций массивами можно применять не только в авиационной бистатике сложной конфигурации, но и во всех остальных случаях (космическая бистатика и моностатика, авиационная моностатика).

Вывод: представление вторичных баллистических данных массивами, а не рядами является универсальным и рекомендуется к применению к синтезу РЛИ во всех конфигурациях РЛ обзора и режимах съёмки. Это – важный шаг в структурной унификации разных обзоров и режимов, а также процедуры синтеза.

С. Выраженная зависимость опорной функции не только от дальности, но и от азимута

Проблема решается применением алгоритма синтеза Omega-КА-М, в котором классическое преобразование Столта (ST) [4, 5] заменено обобщённым преобразованием Столта (GST), подробно изученным в [1 – 3].

Д. Адаптация и фокусировка – проблемы, общие для синтеза во всех обзорах и режимах съёмки

Неточность знания навигационных данных носителей (носителя) или их отсутствие приводит к невозможности получить качественное РЛИ даже при применении самых точных алгоритмов синтеза.

При малых ошибках навигации ряды Тейлора остаточных (не учтенных априорно) законов миграции, ПЛ и фаз опорных функций хорошо сходятся с ограниченным числом членов, причем младшие члены резко доминируют (это верно даже в общем случае авиационной бистатики – вывод из моделирования). Сказанное облегчает фокусировку (апостериорную) и адаптацию (априорную) в терминах вторичных параметров.

Моделирование показало, что необходимость применения адаптации и/или фокусировки возникает даже в благоприятном случае моностатического космического обзора с реальными данными навигации. Например, при синтезе РЛИ по голограммам РСА «Кондор-Э» выяснилось, что точность этих данных недостаточна. В космосе нет проблем нерегулярности полета, как в авиационной системе с малыми носителями в сложных метеоусловиях. А поскольку все конфигурации РЛ систем с регулярным движением носителей редуцируемы к моностатике с регулярным движением носителя (5), практически вся возникающая в задачах адаптивного синтеза РЛИ в

разных режимах съемки проблематика может быть проиллюстрирована (и теоретически, и графически) на примере космической моностатики. Исключение – случаи нерегулярного движения в авиационных РЛ системах или ПР в авиационной бистатической системе с грубой навигацией.

В рамках этой статьи иллюстрации даны на примере синтеза РЛИ по голограммам РСА «Кондор-Э» обобщенным алгоритмом Omega-КА (Omega-КА-М) с адаптацией и/или фокусировкой. Этот алгоритм ранее был введен, подробно описан и промоделирован для авиационной бистатики [1 – 3], а ранее – для космической и авиационной моностатики. В случае задания законов миграции, их ПЛ и опорных функций для синтеза массивами алгоритм Omega-КА-М можно считать практически универсальным и рекомендовать его применение для адаптивного синтеза РЛИ с фокусировкой для различных конфигураций обзора в ПР и МР. Выходные РЛИ получаем в географических координатах.

Е. О специфике прожекторного режима в самолетном бистатическом обзоре с неточной навигацией в контексте задачи адаптации

В самолетной бистатике при неточной навигации, но регулярном характере полета носителей априорно известного качественного типа (линейный, круговой, эллиптический и т. д.), адаптацию лучше делать через восстановление ЗД носителей путем отслеживания сдвигов изображений характерных элементов местности на парциальных РЛИ от субкадра к субкадру. При этом обязательно наличие топографической карты, по которой дешифрируем на парциальных РЛИ характерные элементы местности (реперные точки). Парциальные РЛИ пониженного разрешения получены по субкадрам простым и быстрым алгоритмом SPECAN [4 – 6], не требующим обязательного знания данных навигации. При таком методе адаптации число оцениваемых параметров первичной навигации гораздо меньше числа вторичных параметров. Таким образом, при синтезе РЛИ не всегда целесообразно (априорно, до адаптации) сводить бистатику с простыми ЗД двух носителей к моностатике со сложным ЗД одного носителя (5).

Ф. Начальные выводы о возможности структурной унификации задачи синтеза в разных обзорах

Сложность проблем синтеза – не в бистатичности (моностатичности) обзора, а в сложном аналитическом характере семейства миграций и отсутствии (грубости) априорной информации о движении – количественной (числовых данных навигации) и/или качественной (об аналитическом характере движения). Возможность редукции любого обзора к моностатическому унифицирует как алгоритм синтеза (всегда применим Omega-КА-М с заданием фаз опорных функций и их вариаций массивами [2, 3]), так и всю задачу синтеза во всех обзорах и режимах, сводя ее к трехэтапной (не считая этапа редукции) структуре – адаптация, синтез, фокусировка. Авиационная бистатика при выраженных ошибках навигации в прожекторном

режиме требует нестандартного подхода на этапе адаптации. Однако даже в этой ситуации возможно сведение к моностатическому обзору – уже после адаптации, перед синтезом. Априорное сведение к моностатическому обзору в самом начале возможно, но нецелесообразно с вычислительной точки зрения – значительно усложняет процедуру адаптации. Синтез и фокусировка (апостериорная) во всех обзорах и режимах имеют стандартную структуру. Сказанное дает право рассматривать теоретически и иллюстрировать графически (по итогам моделирования) общие проблемы синтеза и методы их разрешения на примере моностатических обзоров.

III. АДАПТАЦИЯ И ФОКУСИРОВКА

Необходимость адаптации и/или фокусировки даже при наличии данных навигации и регулярном характере полета хорошо иллюстрирует приведенное далее изображение, полученное в гораздо менее сложном, по сравнению с авиационным бистатическим обзором, моностатическом обзоре из космоса. Это – РЛИ Тайваньского международного аэропорта, полученное по живым (неточным) данным навигации в РСА «Кондор-Э» алгоритмом Omega-КА-М в МР (рис.1).



Рис. 1. Фрагмент РЛИ (без адаптации и фокусировки) Тайваньского аэропорта, 15 x 10 км², база $N=2^{14}$ (МР)

Выходные РЛИ прописаны в горизонтальных (не путевых) координатах сцены (север – сверху, запад – слева). Этот подход является универсальным, он происходит из бистатики, где введение путевых координат проблематично и неоднозначно [1 – 3]. Далее будут рассмотрены два метода фокусировки – апостериорная фокусировка сырого РЛИ (рис. 1) и априорная адаптация (до синтеза РЛИ по кадру). В случае авиационной бистатики и моностатики целесообразно комбинирование обоих методов. Причем это комбинирование абсолютно необходимо для авиационной бистатики в прожекторном режиме с неточной навигацией.

IV. МЕТОД АПОСТЕРИОРНОЙ ФОКУСИРОВКИ РЛИ

А. Метод скользящего окна в двумерном спектре

Данный метод использует набор сырых парциальных РЛИ низкого разрешения, полученных Omega-КА-М по набору малых вырезок из двумерного спектра сырого РЛИ (без адаптации, рис. 1). Вырезки

(«скользящие окна») берем круговой формы, диаметра 1/8 от полной базы спектра. Парциальные РЛИ, синтезированные по «окнам», имеют удовлетворительное качество – в них не разрушена текстура и они поддаются визуальному дешифрированию (рис. 2).

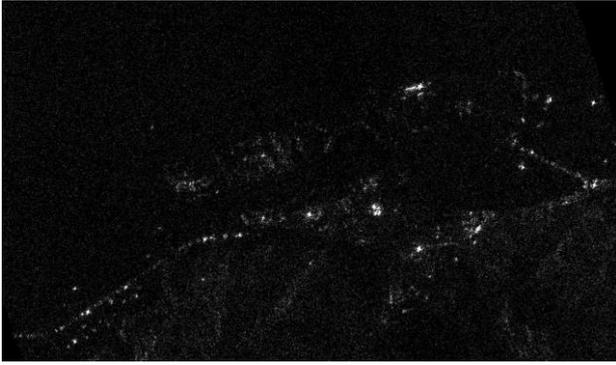


Рис. 2. Фрагмент РЛИ, синтезированного на базе $N=2^{14}$ по «окну» спектра (в центре) диаметра 1/8 базы

В каждом положении «окна», сдвигаемого по двумерному спектру, выполняем двумерное обратное быстрое преобразование Фурье (ОБПФ) спектра с обнуленными за рамками «окна» отсчетами, и получаемые РЛИ почти идентичны РЛИ (рис. 2), но сдвинуты на некоторый двумерный вектор и подвержены малому аффинному искажению. Последнее показывает, что разные точки РЛИ сдвигаются по-разному. Зависимость вектора сдвига элемента РЛИ от его координат (отсчетов) практически линейная. Зададимся вначале одним элементом РЛИ с текущими отсчетами x, y и изучим зависимость вектора сдвига РЛИ от вектора $(\delta_{n,1}, \delta_{n,2})$ $n=1\dots N$ сдвига «окна» относительно центра двумерного спектра. Сдвигов «окна» берем несколько (N штук) для повышения достоверности результата. Изучая зависимость вектора $(\zeta_{n,1}, \zeta_{n,2})$ сдвига элемента РЛИ от вектора сдвига «окна» относительно центра спектра (x, y фиксированы), можно получить оценки значений функциональных коэффициентов $\alpha \equiv \alpha_0 + \alpha_1 \cdot x + \alpha_2 \cdot y, \quad \beta \equiv \beta_0 + \beta_1 \cdot x + \beta_2 \cdot y, \quad \gamma \equiv \gamma_0 + \gamma_1 \cdot x + \gamma_2 \cdot y$ остаточного неучтенного семейства фазовых множителей (в приближении 2-го порядка) в спектре сырого РЛИ (рис. 1). Это остаточное семейство имеет вид:

$$\Psi_{\text{res}}(x, y; w, z) \approx \exp \left(j \cdot \frac{\pi}{N} \cdot \left(\alpha(x, y) \cdot w^2 + \gamma(x, y) \cdot z^2 + 2 \cdot \beta(x, y) \cdot w \cdot z \right) \right), \quad (6)$$

где N – база синтеза ($N \times N$ – размер массива РЛИ и спектра), w, z – спектральные отсчеты (Фурье-двойственные координатным отсчетам РЛИ (сцены)). Для определения остаточных коэффициентов α, β, γ в (6) по набору векторов $(\zeta_{n,1}, \zeta_{n,2})$ сдвига фиксированной реперной точки, отвечающих набору N векторов сдвига «окна» спектра $(\delta_{n,1}, \delta_{n,2})$, методом наименьших квадратов минимизируем невязку

переопределенной системы $2N$ линейных уравнений в $2N$ -евклидовом пространстве, сводя ее к определенной системе трех уравнений и получая ее решение:

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} \delta_1^2 & (\bar{\delta}_1, \bar{\delta}_2) & 0 \\ (\bar{\delta}_1, \bar{\delta}_2) & \delta_1^2 + \delta_2^2 & (\bar{\delta}_1, \bar{\delta}_2) \\ 0 & (\bar{\delta}_1, \bar{\delta}_2) & \delta_2^2 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} (\bar{\delta}_1, \bar{\zeta}_1) \\ (\bar{\delta}_2, \bar{\zeta}_1) + (\bar{\delta}_1, \bar{\zeta}_2) \\ (\bar{\delta}_2, \bar{\zeta}_2) \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где $\bar{\delta}_k \equiv (\delta_{n,k}), \bar{\zeta}_k \equiv (\zeta_{n,k}); k=1, 2$ – столбцы высоты N .

Коэффициенты α, β, γ из (6) для текущего элемента РЛИ вычислены согласно (7).

Простейший случай: задав три сдвига $(\delta, 0), (0, \delta), (\delta, \delta)$ «окон» спектра определим набор α, β, γ для фиксированной реперной точки x, y формулами:

$$\alpha \approx \frac{\zeta_{1,1}}{N \cdot \delta}, \quad \gamma \approx \frac{\zeta_{2,2}}{N \cdot \delta}, \quad \beta \approx \frac{\zeta_{3,1} - \alpha \cdot \zeta_{2,2} - \beta \cdot \zeta_{1,1}}{N \cdot \delta}. \quad (8)$$

Почему бы не ограничить себя простым результатом формул (8)? Проблема – в неточности определения векторов сдвига РЛИ $(\zeta_{n,1}, \zeta_{n,2})$ рисунка 2.

Результат рис. 3 получен корреляционным методом – быстрой сверткой центрального фрагмента амплитудного РЛИ (АРЛИ) размера $2^{12} \times 2^{12}$ рисунка 2 с центральными фрагментами сдвинутых АРЛИ для 8 сдвигов «окон» спектра: $(\pm M, 0), (0, \pm M), (\pm M, \pm M), (\pm M, \mp M); M \equiv 5N/16$. Метод (7) при $N \gg 3$ дает точность $\sim 1/\sqrt{N}$ оценки α, β, γ . Вместо АРЛИ для корреляции брали функции $\exp(j \cdot \pi \cdot d \cdot a(x, y) / \max a(x, y)), d \approx 2^5 \dots 2^6$, построенные по АРЛИ $a(x, y)$. Это – эвристический прием: на АРЛИ корреляция не работает.

Ниже – полученные методом корреляции отклики, индицирующие концы векторов сдвига РЛИ: 8 векторов для 8 сдвигов окна, 9-й вектор в центре без сдвига.

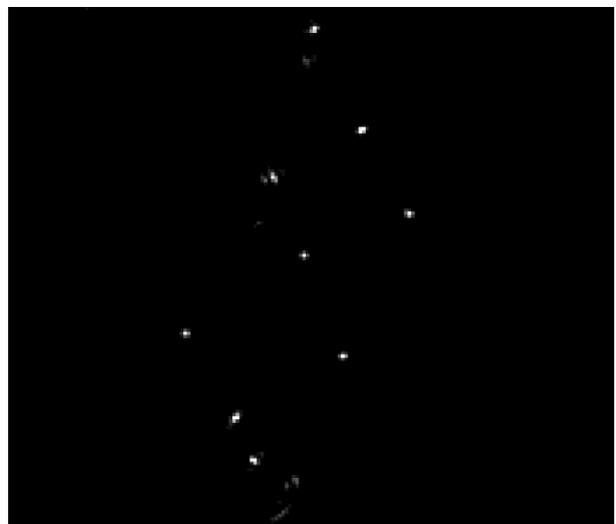


Рис. 3. Положение концов 9 векторов сдвига РЛИ

При вычислении векторов $(\zeta_{n,1}, \zeta_{n,2})$ помимо откликов рис. 3 были задействованы также отклики сдвигов $(M, 0)$, $(0, M)$, (M, M) ; $M \equiv N/2$.

В. Вычисление констант функциональных коэффициентов по минимальному набору реперных точек

Найдем константы $\alpha_k, \beta_k, \gamma_k$, $k=0, 1, 2$ по трем реперным точкам: из формулы (8) известны три тройки значений: $\alpha(x_l, y_l)$, $\beta(x_l, y_l)$, $\gamma(x_l, y_l)$, $l=1, 2, 3$, тогда из системы трех линейных уравнений получаем:

$$\begin{pmatrix} \alpha_0 & \beta_0 & \gamma_0 \\ \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \alpha(x_1, y_1) & \beta(x_1, y_1) & \gamma(x_1, y_1) \\ \alpha(x_2, y_2) & \beta(x_2, y_2) & \gamma(x_2, y_2) \\ \alpha(x_3, y_3) & \beta(x_3, y_3) & \gamma(x_3, y_3) \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где $l=1, 2, 3$ – номер реперной точки. Для числа реперных точек больше трех задача нахождения указанных констант (левой части (9)) решается методом наименьших квадратов (подобно методу формулы (7)).

С. GST-подобная апостериорная фокусировка РЛИ

Изображения, приведенные на рис. 4 и 5, получены в горизонтальных координатах (север – сверху, запад – слева) апостериорной фокусировкой сырого РЛИ (рис. 1) описанным далее способом.



Рис. 4. Фрагмент кондиционного РЛИ (после фокусировки) Тайваньского международного аэропорта, $15 \times 10 \text{ км}^2$, разрешение 3,5 м (МР), база $N=2^{14}$



Рис. 5. Центральная часть фрагмента кондиционного РЛИ Тайваньского международного аэропорта, $7 \times 5 \text{ км}^2$, разрешение 3,5 м (МР), база $N=2^{14}$

Интегральная формула, выражающая искомое кондиционное РЛИ $I(x, y)$ через центрально фокусированный ($x=y=0$) спектр $S_0(w, z)$ сырого РЛИ, имеет следующий вид (с константами из левой части (9)):

$$I(x, y) \approx \iint dw dz \cdot S_0(w, z) \times \exp(j \cdot 2\pi / N \cdot (w + (\alpha_1 \cdot w^2 + 2 \cdot \beta_1 \cdot w \cdot z + \gamma_1 \cdot z^2) / 2) \cdot x) \times \exp(j \cdot 2\pi / N \cdot (z + (\alpha_2 \cdot w^2 + 2 \cdot \beta_2 \cdot w \cdot z + \gamma_2 \cdot z^2) / 2) \cdot y). \quad (10)$$

Если в формуле (10) выполнить замену

$$\begin{aligned} W &:= w + (\alpha_1 \cdot w^2 + 2 \cdot \beta_1 \cdot w \cdot z + \gamma_1 \cdot z^2) / 2; \\ Z &:= z + (\alpha_2 \cdot w^2 + 2 \cdot \beta_2 \cdot w \cdot z + \gamma_2 \cdot z^2) / 2 \end{aligned} \quad (11)$$

она принимает вид обратного преобразования Фурье:

$$I(x, y) \approx \iint dW dZ \cdot \text{Jac}(w(W, Z), z(W, Z)) \times S(w(W, Z), z(W, Z)) \cdot \exp(j \cdot 2\pi / N \cdot (W \cdot x + Z \cdot y)) \quad (12)$$

где $\text{Jac}(w, z)$ – якобиан замены (11), $S_0(w, z)$ – спектр (из (10)) сырого РЛИ после «0-компенсации» фазы.

Формула (12) дает до-фокусированное РЛИ. (Видно, что замена переменных (11) обобщает GST [1 – 3]).

Замену (11) можно разложить на 2 одномерных нелинейных масштабирования: по оси абсцисс, а затем (уже в новых координатах) – по оси ординат.

Последовательные одномерные замены переменных при такой факторизации имеют вид:

$$\begin{aligned} W &:= w + 0,5 \cdot (\alpha_1 \cdot w^2 + 2 \cdot \beta_1 \cdot w \cdot z + \gamma_1 \cdot z^2); \\ Z &:= z + 0,5 \cdot (\alpha_2 \cdot w^2(W, z) + 2 \cdot \beta_2 \cdot w(W, z) \cdot z + \gamma_2 \cdot z^2) \end{aligned} \quad (13)$$

где функция от двух переменных $w(W, z)$ во второй формуле (13) имеет следующий (явный) вид:

$$w(W, z) = \frac{2 \cdot (W - 0,5 \cdot \gamma_1 \cdot z^2)}{(1 + \beta_1 \cdot z) + \sqrt{(1 + \beta_1 \cdot z)^2 + \alpha_1 \cdot (2 \cdot W - \gamma_1 \cdot z^2)}},$$

получаемый из первой формулы (13), рассматриваемой как квадратное уравнение относительно w .

После компенсации остаточной фазы в спектре сырого РЛИ делаем двумерное ОБПФ над компенсированным спектром и получаем кондиционное РЛИ (рис. 4 и 5).

V. МЕТОД АПРИОРНОЙ АДАПТАЦИИ СИНТЕЗА К ОБЗОРУ

А. Необходимость метода, альтернативного методу апостериорной фокусировки РЛИ

Необходимость введения альтернативного автоматического (не требующего участия оператора), хотя и более медленного, метода была вызвана тем, что описанный метод фокусировки, несмотря на его быстроту и универсальность, плохо поддается автоматизации.

Фокусировка эффективно (автоматически, без участия оператора) срабатывает только на сюжетах с достаточным числом ($\gg 3$) ярких компактных целей.

На сюжетах без ярких целей с однообразной текстурой (лес, равнина) метод чаще всего не работает.

Улучшает результат визуальная оценка оператором векторов сдвигов малых элементов РЛИ.

Кроме того, даже на благоприятных сюжетах «Кондора-Э», в МР возникает неприятный эффект. Когда двигаем «окно» в МР, происходит «исчезновение» целей с одного края РЛИ и «появление» новых целей с другого края РЛИ. Это привносит дополнительную погрешность в корреляционный метод и вызывает необходимость замены его «ручным» с участием оператора. В ПР этот эффект почти не выражен.

В. Описание эвристической пошаговой адаптации

В основе данного метода лежит процедура минимизации нормированной по максимуму гильбертовой нормы $L_2 \equiv L_2/L_\infty$ АРЛИ. Минимизация происходит в цикле, содержащем процедуру синтеза РЛИ на «малой» базе $N/4=2^{12}$ (алгоритм Омега-КА-М), в условиях радикальной скоростной оптимизации вычислений на низком уровне (практически обязательно!). Наилучшая фокусировка достигается в точке минимума данного функционала.

На практике такой метод использует последовательную квазиоптимизацию коэффициентов d_0, φ, d_1 априорно неучтенной остаточной фазы в приближении 2-го порядка в остаточной (после компенсации центрального набега фазы [3]) фазовой функции спектра ЦРГ, которую удобно представить в виде [1 – 3]:

$$\Phi_{\text{res}}(p, q) \approx \exp \left[j \cdot \frac{\pi}{N} \cdot \left(d_0 \cdot q^2 + d_1 \cdot \left(\cos \varphi \cdot \frac{Q}{Q+q} \cdot p + \sin \varphi \cdot q \right)^2 \right) \right]. \quad (14)$$

Квазиоптимизацию завершаем градиентным методом скорейшего спуска (не всегда обязательно).

Наличие множителя (14) вызвано неточностью навигации, p, q – путевые спектральные отсчеты, Q – безразмерная несущая частота [1 – 3].

Приведем изображение пригорода Сеула (Корея), полученное по живым данным навигации «Кондор-Э» (рис. 6).

Метод адаптации состоит из трех итерационных процедур – в едином цикле с кратно выполняемым синтезом (Омега-КА-М) на малой базе $N/4 = 2^{12}$.

Шаг 1. Вычисляем значение $d_0 \rightarrow d_{0,\min}$ (14), минимизирующее функционал L_2 от РЛИ при ограничении $d_1 = 0$ «методом вложенных переборов» (в цикле по синтезу на малой базе, описание «метода» – далее).



Рис. 6. Фрагмент сырого (без адаптации) РЛИ пригорода г. Сеул, $15 \times 10 \text{ км}^2$, база $N=2^{14}$ (МР)

Шаг 2. Вычисляем значение $\varphi \rightarrow \varphi_{\min}$ (14), минимизирующее функционал от РЛИ при ограничениях $d_0 = d_{0,\min}, d_1 = d_{1,\min_aprior} \approx 0,5$ «методом вложенных переборов».

Шаг 3. Вычисляем значение $d_1 \rightarrow d_{1,\min}$ (14), минимизирующее функционал L_2 от РЛИ при ограничениях $d_0 = d_{0,\min}, \varphi = \varphi_{\min}$ «методом вложенных переборов».

Для уточнения результата следует повторить Шаги 1, 2, 3 («итерация 2»), используя итоги «итерации 1»: на Шаге 1 при минимизации $d_0 \rightarrow d_{0,\min}$ берем посчитанные «итерацией 1» ограничения $d_1 := d_{1,\min}, \varphi := \varphi_{\min}$, Шаги 2 и 3 делаем, как описано выше, с одним отличием: на Шаге 2 вместо ограничения $d_1 = d_{1,\min_aprior} \approx 0,5$ берем ограничение $d_1 = d_{1,\min}$ (по итогу «итерации 1»).

Шаг 4. Отправляясь от значений $d_{0,\min}, d_{1,\min}, \varphi_{\min}$, запускаем итерационную процедуру (в цикле по синтезу на малой базе) скорейшего спуска; получаем глобальный минимум функционала L_2 от РЛИ в пространстве коэффициентов: $d_{0,\text{glob-min}}, d_{1,\text{glob-min}}, \varphi_{\text{glob-min}}$.

Компенсируя в спектре ЦРГ фазовый множитель (14) с коэффициентами $d_{0,\text{glob-min}}, d_{1,\text{glob-min}}, \varphi_{\text{glob-min}}$, и применяя (уже на полной базе $N=2^{14}$) алгоритм синтеза Омега-КА-М, получаем кондиционное РЛИ. Это проверено моделированием на ряде ЦРГ «Кондор-Э».

На рис. 7 приведен РЛИ одного из пригородов Сеула (Корея), полученное Омега-КА-М после адаптации ().

Одномерные шаги позволяют избежать неподъемной глобальной трехмерной оптимизации в условиях, когда функционал изобилует локальными минимумами, представляет собой почти сплошное «плато» с колебаниями значения $\pm 10...20\%$ от среднего и не до-

пускает непосредственного применения градиентного метода. Эти шаги – эвристический прием, позволяющий в «разумное время» попасть в окрестность глобального минимума, где применим градиентный метод – без опасности «застыть» в побочном минимуме.

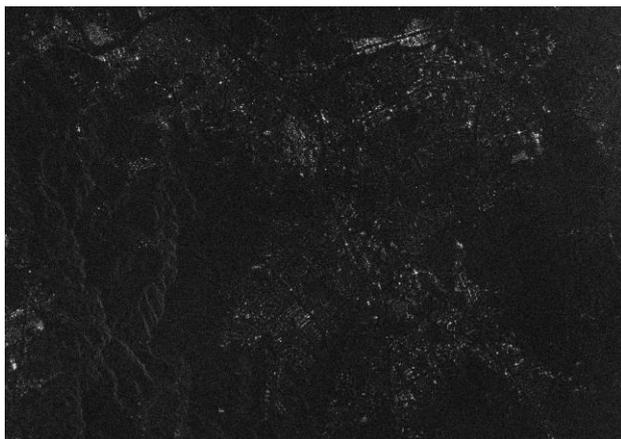


Рис. 7. Фрагмент кондиционного РЛИ (синтез после адаптации) пригорода г. Сеул, 15 x 10 км², разрешение 3,5 м (МР), база $N=2^{14}$

С. Приложение – метод вложенных переборов

Одномерный «метод вложенных переборов», применяемый в Шагах 1, 2, 3, состоит в следующем.

Прямым перебором значений с грубыми шагами (0,05 на интервале $-0,5...+0,5$ – для d_0, d_1 и 10° на интервале $0^\circ...360^\circ$ – для φ) находим квазиминимум 1-го уровня вложения функционала по текущему коэффициенту (остальные – фиксированы).

Дважды итерировуем описанную процедуру в окрестности квазиминимума с очередным уровнем вложения – для текущего (того же) коэффициента.

В окрестностях квазиминимумов 1-го уровня параметры перебора: шаг 0,01 и интервал $d_{k, \min} \pm 0,1$ – для d_k ; $k=0, 1$; шаг 1° и интервал $\varphi_{\min} \pm 10^\circ$ – для φ . На выходе перебора 1-го уровня – квазиминимум 2-го уровня вложения по текущему коэффициенту.

В окрестностях квазиминимумов 2-го уровня параметры перебора: шаг 0,001 и интервал $d_{k, \min} \pm 0,01$ – для d_k ; $k=0, 1$; шаг $0,1^\circ$ и интервал $\varphi_{\min} \pm 1^\circ$ – для φ . На выходе перебора 2-го уровня – квазиминимум 3-го уровня вложения по текущему коэффициенту.

Проводим вложенный трехуровневый перебор для каждого из трех коэффициентов в отдельности – в соответствии с логикой Шагов 1, 2, 3 (см. выше). Полное число перебираемых значений равно 196 (для коэффициентов d_k – по 60, для коэффициента φ – 76). С учетом повторной итерации, число переборов – 392.

VI. ВОЗМОЖНОСТЬ СТРУКТУРНОЙ УНИФИКАЦИИ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА ДЛЯ РАЗНЫХ ОБЗОРОВ И РЕЖИМОВ

Структура синтеза в разных обзорах и режимах:

- 1) формальная редукция обзора к моностатическому (в первом порядке по координатам сцены);
- 2) адаптация (априорная фокусировка до синтеза);
- 3) синтез РЛИ по полному кадру обзора;
- 4) фокусировка синтезированного по кадру РЛИ.

Первый шаг (редукция к моностатике) целесообразнее всего выполнять (5) для бистатических (только!) обзоров с навигацией повышенной точности.

Второй шаг (адаптация) основан на эвристическом алгоритме пошаговой квазиминимизации нормы РЛИ.

Однако в случае авиационной бистатики, неточной навигации и режима ПР, адаптацию лучше делать через восстановление 3Д носителей по субкадрам (и без редукции к моностатике).

Третий и четвертый шаги (синтез, фокусировка) подводимы под единую схему во всех ситуациях.

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретическое исследование и моделирование синтеза выявили возможность редукции произвольного бистатического обзора к моностатическому обзору. При этом редуцированное семейство законов миграции дальности имеет такую же локальную структуру в первом порядке точности по координатам сцены, что и исходный бистатический обзор. Получены формулы движения эквивалентного моностатического носителя.

Выявлена возможность изучения, решения и иллюстрации проблем синтеза в различных обзорах и режимах в рамках эквивалентной моностатики.

Проведена структурная унификация задачи адаптивного синтеза, его проблем и методов их решений в различных конфигурациях и режимах под единую 4-шаговую схему. Особенно ценным является то, что синтез и фокусировка допускают неизменную структуру алгоритма для всех режимов съемки.

Для синтеза во всех ситуациях рекомендуется применение алгоритма Omega-КА-М с представлением фаз опорных функций и их вариаций первого порядка одномерными массивами.

Ценным моментом также является возможность автоматизации предложенной в статье процедуры адаптации практически для всех режимов съемки.

Особый случай – авиационная бистатика общей конфигурации с неточной навигацией в режиме ПР. По возникающим там проблемам адаптации подготовлена статья. Однако синтез и фокусировка и в этом случае сохраняют неизменную структуру.

Выявлено, что в космических обзорах достаточно одного вида фокусировки: априорной (адаптации) или апостериорной. В авиационных обзорах, особенно бистатических, целесообразно применение обоих видов фокусировки (и априорной, и апостериорной).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Алексеев С.Б., Лиханский С.Г., Лепёхина Т.А., Николаев В.И. Алгоритм синтеза радиолокационного изображения наземной обстановки в РСА при самолетном бистатическом обзоре // Материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2018» (МЭС-2018). ИППИ РАН, 2018. Вып. 4. С. 127-134.
- [2] Алексеев С.Б., Лиханский С.Г. Исследование влияния взаимного движения носителей на качество радиолокационного изображения в бистатической системе РСА // Материалы 28-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» КрыМиКо 2018, г. Севастополь, 09-15 сентября 2018. С. 1591-1597.
- [3] Алексеев С.Б., Лиханский С.Г., Тарасенко А.М. Влияние конфигурации радиолокационной бистатической системы на ее разрешающую способность // Ural Radio Engineering Journal. 2018. Т. 2. № 4. С. 7-19.
- [4] Mittermayer J., Moreira A., Loffeld O. High Precision Processing of Spotlight SAR Data Using the Extended Chirp Scaling Algorithm // EUSAR'98. Friedrichshafen, Germany, May 1998. Pp. 561-564.
- [5] Ian G. Cumming, Frank H. Wong. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data. Algorithms and Implementation. ArtechHouse, Boston & London, 1992.
- [6] Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. Издательство «Радиотехника», 2010.

Problematic Issues of Adaptive Synthesis of Radar Images in Bi-static and Mono-static Looks

S.B. Alekseev, A.M. Alekseeva, T.A. Lepekhina, S.G. Likhansky, V.I. Nikolaev

Joint-Stock Corporation «Vega», Moscow, tatonika@inbox.ru

Abstract — The paper is devoted to analysis of the main problems encountered in radar image synthesis tasks in various SAR configurations (bistatic and monostatic, airborne and space-based) and survey modes. Methods of solving these problems are presented. The attempt of structural unification for different survey modes, imaging algorithms for them, and also for problem solution methods in different cases is presented in the paper. For some cases, the detailed analysis with mathematical proofs and illustrations is presented. These cases are concerned with the most complicated problems demanding new approaches – adaptation, focusing, and reducing of any look to monostatic one.

The following themes are considered in the paper:

- 1) the analysis of main problems appearing in bistatic synthesis and description of their solution methods, formal mathematical reduction of any SAR configuration to equivalent monostatic SAR is described;
- 2) the proof and illustration of necessity of adaptation (a-priori, before synthesis) and/or focusing (a-posteriori, after synthesis) is presented;
- 3) the methods of focusing and adaptation are described.

The possibility of structural unification of synthesis procedure and its parts (in frames of restrict scheme) is explored in the paper.

The structure of synthesis procedure in different configurations and modes is the following one (step-by-step):

- 1) The formal mathematical reduction of any configuration to monostatic model, having the same set of migration laws in first order of precision by scene horizontal coordinates. (The step is recommended firstly in case of bistatic SAR with improved-precision navigation knowledge data.)
- 2) The adaptation (a-prior focusing – before synthesizing SAR image by the whole interval). The step-by-step quasi-minimization of reduced Hilbert image norm is recommended in most of cases.
- 3) The synthesizing procedure (the algorithm Omega-KA-M [1 – 3] is advised here for each case).

4) The a-posterior focusing of obtained SAR image (the method, generalizing GST [1 – 3], is recommended here in each case).

The “Condor-E” SAR images are used for the graphical illustration of problem solution methods in the most complicated and important cases.

Keywords — synthetic aperture radar, range migration, digital radio-hologram, radar image, reference function, look, scene, synthesis, adaptation, focusing, sliding window, motion law.

REFERENCES

- [1] Likhansky S.G., Alekseev S.B., Lepekhina T.A., Nikolaev V.I. Algoritm sinteza radiolokacionnogo izobrazheni'a nazemnoj obstanovki v passivnom RSA pri samoletnom bistaticheskom obzore obshchego vida (Algorithm of synthesizing on-Earth scene radar images in passive SAR being the part of airborne bi-static radar system of general configuration) // Materialy VIII Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii «Problemy razrabotki perspektivnyh mikro- i nanoelektronnyh sistem MES-2018». M.: IPPM RAS, 2018. Issue 4. str. 127-134 (in Russian).
- [2] Alekseev S.B., Likhansky S.G. Issledovanie vli'ani'a vzaimnogo dvizheni'a nositelej na kachestvo radiolokacionnogo izobrazheni'a v bistatichsko'i sisteme RSA (Research of the carriers relative motion effects on the radar image quality in the bistatic SAR system) // Materialy 28-j Mezhdunarodnoj Krymskoj konferencii «SVCH-tehnika i telekommunikacionnye tekhnologii» KryMiKo 2018, g. Sevastopol', 09-15 sentyabrya 2018 g. str.1591-1597 (in Russian).
- [3] Alekseev S.B., Lihanskij S.G., Tarasenko A.M. Vliyanie konfiguracii radiolokacionnoj bistaticheskoj sistemy na ee razreshayushchuyu sposobnost' (Influence of bistatic radar system configuration on its resolution) // Ural Radio Engineering Journal, Tom 2, Nomer 4, 2018 g. str. 7-19 (in Russian).
- [4] Mittermayer J., Moreira A., Loffeld O. High Precision Processing of Spotlight SAR Data Using the Extended Chirp Scaling Algorithm // EUSAR'98. Friedrichshafen, Germany, May 1998. Pp. 561-564.
- [5] Ian G. Cumming, Frank H. Wong. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data. Algorithms and Implementation. ArtechHouse, Boston & London, 1992.
- [6] Verba V.S., Neronskij L.B., Osipov I.G., Turuk V.E. Radiolokacionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya (Space-borne Earth Surveillance Radar Systems). // Izdatel'stvo «Radiotekhnika», 2010. (In Russian).