

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В КОСМИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАТОРАХ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

Рассмотрены основные этапы цифровой обработки сигналов при формировании изображений в космических радиолокаторах с синтезированной апертурой (РСА). Обоснована необходимость компенсации смещения элементов дальности, автофокусировки и адаптивной оценки центральной доплеровской частоты.

The basic stages of digital processing of signals are considered at formation of the images in space radiolocators with the synthesized aperture radar (SAR). The necessity of indemnification of displacement of elements of range, Autofocus and adaptive estimation central Doppler frequency is proved.

Современные радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны (РСА), установленные на космических аппаратах (КА), обладая высокой разрешающей способностью по поперечной и наклонной дальностям, позволяют получать детальные радиолокационные изображения объектов и местности с качеством близким к оптическим системам, в любых метеоусловиях и в любое время суток. Практическая реализация метода искусственного (синтезированного) раскрытия ставит ряд сложных задач, основной из которых является когерентное суммирование тысяч сигналов на траектории полета одновременно в нескольких тысячах каналов дальности. Поэтому требования к цифровым системам обработки траекторного сигнала по-прежнему достаточно велики, что ведет к постоянному совершенствованию алгоритмов обработки сигналов РСА. Статья посвящена анализу основных этапов и методов цифровой обработки сигналов при формировании радиолокационного изображения (РЛИ) в космических РСА.

**Этапы обработки сигналов.** При использовании цифровых методов получения РЛИ сжатый по дальности сигнал на выходе линейной части приемника РЛС проходит через АЦП и далее обработка ведется в цифровой форме. С целью снижения требований к быстродействию вычислительных систем, обработка, как правило, ведется на нулевой частоте в двух квадратурных каналах (рис.1).

Динамический диапазон АЦП определяется динамическим диапазоном восстанавливаемого изображения и требуемым сжатием сигнала по азимуту. Скорость преобразования устанавливается в соответствии с шириной спектра зондирующего сигнала  $\Delta f = \frac{c}{2\Delta R}$ , связанной с разрешением по наклонной дальности  $\Delta R$ .

Для понижения темпа поступления отсчетов сигнала в процессор синтеза апертуры применяют буферное ЗУ и предварительную фильтрацию [1]. Запись в буферное ЗУ идет в каждом периоде повторения в течение времени приема сигналов в полосе захвата, границы которой определяются максимальной  $R_{max}$  и минимальной  $R_{min}$  наклонными

дальностями, а считывание - равномерно в течение всего периода повторения  $T_n$ . Скорость поступления входных данных снижается за счет этого в  $\frac{cT_n}{2(R_{\max} - R_{\min})}$  раз.

Предварительная фильтрация служит для снижения частоты дискретизации траекторного сигнала в каждом канале дальности от частоты повторения посылок РЛС  $F_n$  до частоты  $F_0$ , определяемой условием неискаженной передачи спектра обрабатываемых доплеровских частот. Обычно фильтрация сводится к замене нескольких соседних отсчетов их взвешенной суммой.

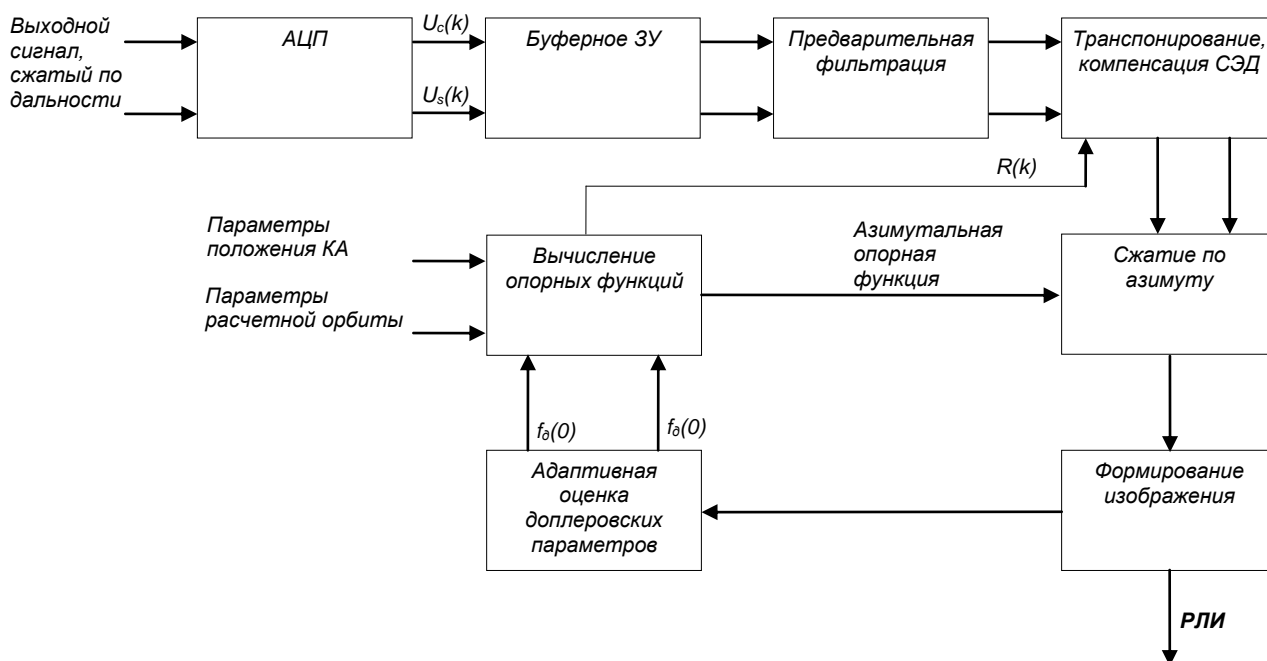


Рис. 1. Основные этапы цифрового формирования изображения в РСА

Транспонирование состоит в изменении порядка следования данных. Отсчеты, поступающие в порядке увеличения расстояний (по строкам дальности), считываются для реализации алгоритма синтеза апертуры по отдельным каналам дальности. Эта операция может быть реализована в ЗУ с перекрестным доступом. Минимальное число хранимых в таком ЗУ комплексных отсчетов определяется произведением числа отсчетов по дальности в полосе обзора  $N_R$  и числа азимутальных отсчетов  $N$ , используемых при синтезировании апертуры для обеспечения заданного разрешения по путевой дальности  $\Delta X$ :

$$N = \frac{\lambda R_{\max} F_0}{4\Delta X V_{T3}}, \quad (1)$$

где  $V_{T3}$  - эквивалентная тангенциальная скорость, измеренная по поверхности Земли.

Сжатие сигналов по азимуту для получения высокого разрешения вдоль направления движения осуществляется по классическому принципу оптимальной фильтрации, заключающемуся в вычислении взаимной корреляционной функции принятого сигнала и опорной функции  $h(x, r)$ , согласованной с откликом от точечной цели. Комплексная огибающая этого отклика в координатах: путевая дальность  $x = Vt$ , наклонная дальность  $r = ct/2$  описывается выражением:

$$\dot{s}(x, r) = G(x) e^{-j \frac{4\pi}{\lambda} R(x)} S(x) e^{-j\Phi(x)} e^{-R(x)}. \quad (2)$$

Здесь  $G(x)$  - диаграмма направленности антенны по мощности,  $\lambda$  - длина волны РСА,  $S(x)$  - огибающая зондирующего импульса,  $\Phi(x)$  - закон фазовой внутриимпульсной модуляции,  $R(x)$  - закон изменения наклонной дальности до цели.

Обратим внимание на следующую особенность этого сигнала. Огибающая смещается по дальности за время синтезирования по закону  $R_0 - R(x)$ . При большом интервале синтезирования сигнал от цели может сместиться настолько, что попадет в соседние, более удаленные элементы разрешения. Этот эффект, называемый эффектом смещения элементов дальности (СЭД), должен учитываться при транспонировании путем считывания информации из ЗУ по определенному закону. Комплексная опорная функция может быть представлена в виде, аналогичном (2)

$$\dot{h}(x, r) = H_1(x) H_2(r) \left[ -\hat{R}(x) e^{j \frac{4\pi}{\lambda} \hat{R}(x)} e^{-j\Phi(x)} e^{-\hat{R}(x)} \right]. \quad (3)$$

Здесь  $\hat{R}(x)$  - оценка закона изменения наклонной дальности,  $H_1(x)$ ,  $H_2(r)$  - амплитудные весовые функции по путевой и наклонной дальности соответственно.

При  $H_1(x) = G(x)$ ,  $H_2(r) = S(r)$  и точной оценке  $\hat{R}(x) = R(x)$  выражение (3) описывает импульсную характеристику двумерного оптимального фильтра, согласованного с откликом от точечной цели:

$$\dot{h}(x, r) = s(x, -r)^*$$

Обработка сигнала в таком фильтре осуществляется совместно по двум направлениям - вдоль наклонной и путевой дальности в соответствии со следующим выражением, представляющим собой алгоритм формирования РЛИ:

$$P(\alpha, r) = \left| \int_{x-\frac{X_c}{2}}^{x+\frac{X_c}{2}} H_1(\alpha - \alpha_0) e^{j\frac{4\pi}{\lambda} R(\alpha-x)} \dot{U}(\alpha, r + R(\alpha-x)) d\alpha \right|, \quad (4)$$

где  $X_c$  - интервал синтезирования,  $\dot{U}(\alpha, r)$  - комплексная огибающая принятого сигнала после сжатия по наклонной дальности (результат внутрипериодной обработки в каждом канале дальности). Перед сжатием по путевой дальности вводится операция компенсации эффекта СЭД.

При цифровой обработке (4) представляют в дискретной форме:

$$P(n, i) = \left| \sum_{k=m-\frac{N-1}{2}}^{m+\frac{N-1}{2}} \dot{U}(k, i) H_1(n-k) e^{j\frac{4\pi}{\lambda} R(-m, i)} \right|, \quad (5)$$

где  $k, m$  - номера отсчетов по путевой дальности для сигнала и изображения соответственно,  $i$  - номер канала дальности,  $N$  - число отсчетов, используемых при синтезировании апертуры,  $R(\alpha, i)$  - закон изменения наклонной дальности для  $i$ -го канала,  $H_1(\alpha)$  - амплитудная весовая функция обработки, регулирующая уровень боковых лепестков в синтезированной диаграмме направленности, в общем случае также зависящая от дальности,  $\dot{U}(k, i)$  - отсчеты комплексной огибающей сжатого по дальности сигнала в  $i$ -м канале.

Таким образом, процедура формирования РЛИ в соответствии с (5) состоит из сжатия сигнала по дальности в каждом периоде зондирования; компенсации СЭД при транспонировании цифровых отсчетов; сжатия по азимуту (путевой дальности) и вычисления модуля по синфазной и квадратурной составляющим выходного сигнала. На заключительном этапе может также производиться некогерентное суммирование частных изображений, полученных в нескольких парциальных лучах, в целях снижения уровня спекл-шума.

**Закон изменения наклонной дальности.** Для выполнения операции сжатия по азимуту необходимо знать закон изменения наклонной дальности, определяющий закон фазовой доплеровской модуляции траекторного сигнала и, следовательно, вид азимутальной опорной функции, а также закон СЭД.

Известное приближенное выражение  $R(\alpha) \approx R_0 \left( 1 + \frac{x^2}{2R_0^2} \right)$  не учитывает присущих

космическим РСА таких особенностей, как нелинейность траектории, кривизна Земли и других факторов. В общем случае выражение для закона изменения наклонной дальности получают из анализа относительного движения РСА и визируемого участка земной поверхности [3]. В эталонный момент времени (момент пролета центра интервала синтезирования) векторы положения,

скорости и ускорения носителя РСА в геоцентрической системе координат заданы как  $\vec{R}_{РЛС}$ ,  $\vec{V}_{РЛС}$ ,  $\vec{A}_{РЛС}$ . Соответствующие векторы цели (визируемого участка земной поверхности)  $\vec{R}_{Ц}$ ,  $\vec{V}_{Ц}$ ,  $\vec{A}_{Ц}$ .

Векторы относительного расстояния (наклонной дальности), скорости и ускорения цели и РСА определяются как разница соответствующих векторов (рис. 2):

$$\left. \begin{aligned} \vec{R} &= \vec{R}_{РЛС} - \vec{R}_{Ц} \\ \vec{V} &= \vec{V}_{РЛС} - \vec{V}_{Ц} \\ \vec{A} &= \vec{A}_{РЛС} - \vec{A}_{Ц} \end{aligned} \right\}.$$

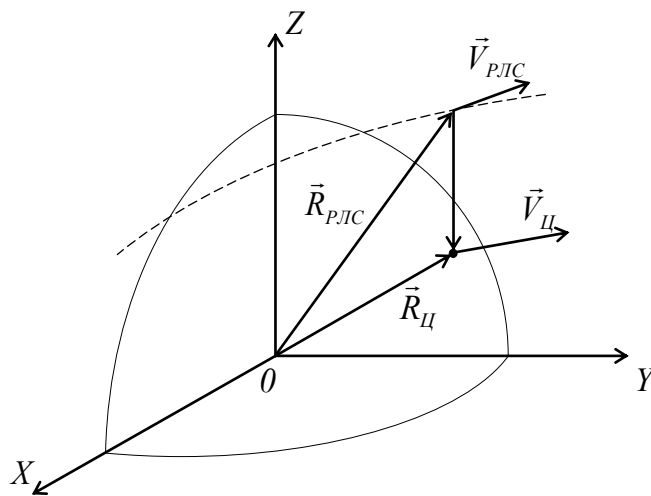


Рис. 2. Относительное положение РЛС и цели

Закон изменения доплеровской фазы определяется нормой

$$R \dot{\varphi} = \|\dot{\vec{R}}\| = \sqrt{\dot{\vec{R}} \dot{\vec{R}}} \quad (6)$$

Разложение этой функции в ряд Тейлора для малых  $t$  дает:

$$R \dot{\varphi} = R + \dot{R}t + \frac{1}{2} \ddot{R}t^2, \quad -\frac{T_c}{2} \leq t \leq \frac{T_c}{2} \quad (7)$$

Здесь  $T_c$  - время синтезирования, а коэффициенты разложения:

$$\left. \begin{aligned} \dot{R} &= \frac{\vec{V}\vec{R}}{R} = V_R \\ \ddot{R} &= \frac{\vec{A}\vec{R}}{R} + \frac{V^2}{R} - \frac{V_R^2}{R} = A_R + \frac{V_T^2}{R} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Здесь  $V_R$ ,  $V_T$ ,  $A_R$ , - радиальная и тангенциальная скорости и радиальное ускорение в эталонный момент времени. Для их расчета необходимо знать параметры движения и положения космического аппарата в точке съемки и координаты визируемого участка земной поверхности.

Из (7) и (8) следует, что функция, описывающая СЭД, содержит в первом приближении две составляющие:

- линейную (миграция дальности);
- квадратичную (искривление дальности).

Линейная составляющая является следствием смещения ДНА от нормали к вектору относительной скорости, возникающего за счет вращения Земли и эллиптичности орбиты. Квадратичная составляющая обусловлена сферичностью фазового фронта отраженной волны и проявляется при большом времени синтезирования.

Закон изменения наклонной дальности может быть выражен через два доплеровских параметра траекторного сигнала - центральную доплеровскую частоту  $f_D$  и скорость изменения доплеровской частоты  $\dot{f}_D$ , измеренные в момент пролета центра интервала синтезирования:

$$R = R_0 - \frac{\lambda}{2} \left[ f_D \frac{x}{V} + \frac{1}{2} \dot{f}_D \left( \frac{x}{V} \right)^2 \right], \quad (9)$$

где

$$\left. \begin{aligned} f_D &= -\frac{2}{\lambda} V_R \\ \dot{f}_D &= -\frac{2}{\lambda} \left[ A_R + \frac{V_T^2}{R} \right] \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

Погрешности в определении доплеровских параметров за счет неточного вычисления, а также неточная стабилизация КА приводит к ухудшению качества изображения, выражающуюся в смещении, ухудшении разрешающей способности и снижении динамического диапазона за счет уменьшения уровня главного и роста боковых лепестков синтезированной диаграммы направленности [3].

Ошибки в определении параметров движения и положения КА обусловлены не только неточностью соответствующих измерителей, но и изменением измеряемого параметра в промежутке между измерениями, поскольку значения параметров движения в систему обработки вводятся дискретно.

Если расчетные значения  $f_D$  и  $\dot{f}_D$  недостаточно точны для получения изображения высокого качества, используют их адаптивную оценку на основании анализа РЛИ или измерения указанных величин доплеровскими методами.

Основная функциональная операция при цифровом формировании изображения в РСА – **сжатие по азимуту** (синтезирование апертуры) заключается в реализации в каждом канале дальности корреляционного алгоритма (5). Алгоритм сжатия по азимуту часто реализуется также в частотной области, т.е. строится на фильтрационном принципе. В этом случае дискретная свертка сигнала и фокусирующей функции заменяется перемножением их спектров [2]. При этом последовательно выполняются перевод данных из временной области в частотную с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ), перемножение спектров сигнала и фокусирующей функции и обратный перевод изображения во временную область представления с помощью обратного БПФ. В ряде случаев при цифровом синтезировании апертура удается воспользоваться эффективными в вычислительном отношении алгоритмами “гармонического анализа” [4] и кусочно-линейной аппроксимации [5]. Модификация последнего реализована в программно-алгоритмическом обеспечении базового тракта цифровой обработки РСА ЭКОР-А КА “Алмаз-1” [6].

Адаптивная оценка закона изменения доплеровской фазы называется **автофокусировкой РЛИ**. Простые методы автофокусировки предлагались и строились с первых дней развития РСА. К настоящему времени создано большое количество алгоритмов восстановления изображений. Как правило, эти алгоритмы имеют общую схему построения. Вначале оценивается функция фазовой ошибки (определяется характер искажения РЛИ), а затем она устраняется. Наибольшее развитие получили два метода автофокусировки – субапертурный и градиентный.

Субапертурный алгоритм автофокусировки [7] оценивает смещения между парами РЛИ, образованными при обработке сигналов в субапертурах. Ширина субапертуры выбирается такой, чтобы фазовая ошибка в ее пределах не сильно отличалась от линейного закона. Суть метода заключается в том, что любой линейный элемент функции фазовой ошибки смещает картинку, но не нарушает ее четкости. Субапертурный алгоритм автофокусировки использует для параметризации фазовой оценки линейную комбинацию синусоид вместо полиномов. Это улучшает оценку фазовой ошибки высокого порядка, вносимой средой распространения.

Основная идея, которая определила развитие метода фазовой градиентной автофокусировки (ФГА) [8], заключается в том, чтобы получить устойчивую оценку производной (градиента) от фазовой ошибки, используя только расфокусированное комплексное изображение РСА. Метод предполагает последовательную реализацию основных этапов обработки сигнала: смещение к центру, взвешивание, оценку градиента фазы и итеративную коррекцию.

Процесс оценки использует избыток информации о фазовой ошибке, содержащейся в ухудшенном изображении, независимо от скрытого содержания изображения. ФГА восстанавливает изображения, полностью лишенные «культурных» признаков. Важным моментом является то, что для осуществления ФГА требуется фиксированное количество данных и

вычислений, т.е. время коррекции составляет небольшую часть от общего времени формирования изображений большого и среднего размера.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры / В.Н.Антипов, В.Т.Горяинов, А.Н.Кулин и др.; Под ред. В.Т.Горяинова. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.
2. В.Г.Ахметьянов и др. "Цифровые методы получения изображений с помощью космических радиолокационных станций с синтезированной апертурой". Зарубежная радиоэлектроника, 1985, №5
3. Тетерин А.Р., Коберниченко В.Г. Требования к точности оценки комплекса параметров движения при обработке сигналов в РЛС с синтезированной апертурой. – Известия ВУЗов СССР. Радиоэлектроника, 1988, №5, с.93-95.
4. Коберниченко В.Г., Зраенко С.М. Сравнение алгоритмов цифрового синтезирования апертуры //Преобразование пространственно-временных сигналов и обработка информации в радиотехнических сигналах: Межвуз. темат. сб. №71, М., изд. МЭИ, 1985, с.53-61.
5. Зраенко С.М., Коберниченко В.Г. Цифровое синтезирование апертуры при кусочно-линейной аппроксимации опорной функции. – Известия ВУЗов СССР. Радиоэлектроника, 1987, т.30, №8, с.8-12.
6. Л.Б.Неронский, В.Г.Коберниченко, С.М.Зраенко. "Цифровое формирование радиолокационных изображений земной поверхности в радиолокаторе с синтезированной апертурой космического аппарата "Алмаз-1". Исследование Земли из космоса, 1993, №4.
7. Calloway T. M., Donohoe G. W. Subaperture Autofocus for Synthetic Aperture Radar / IEEE Trans on AES v.30, № 2, 1994, p.617-621.
8. 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 Trans on AES v.30, № 3, 1994, p.827-834.

**Коберниченко В.Г. Особенности формирования изображений в космических радиолокаторах с синтезированной апертурой//Вестник УГТУ-УПИ. Теория и практика радиолокации земной поверхности. Сер. радиотехническая, Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. № 19(71).**