

Проблемы стыковки по дальности кадров РЛИ в обзорных режимах

М.П. Титов¹, В.В. Костров², О.Е.Цветков¹

¹ ЗАО «АЭРОКОН», г. Жуковский, ул. Гагарина, 1, e-mail: titovmp@mail.ru

² Муромский институт Владимирского государственного университета, г. Муром, Орловская, 23, e-mail: vvk@mit.ru

В статье рассмотрены вопросы стыковки отдельных азимутальных кадров РЛИ по дальности в обзорных режимах. Показано, что этот процесс требует специальных расчетов, оценки доплеровского сдвига полученной радиоголограммы и, при необходимости, использования специальных корректирующих алгоритмов. В статье приведены оценочные расчеты применительно к РСА «Кондор-Э».

This article examines matters relating to the range docking of radar azimuth frames in ScanSAR mode. It is shown that this process requires special calculations, evaluation Doppler centroid and, if necessary, the use of special corrective algorithms. Estimates are presented in the article in relation to the «Condor-E» SAR.

В настоящее время практически все бортовые РЛС как воздушного, так и космического базирования выполняются с режимами синтеза апертуры антенны [1,2]. Практически все имеют обзорные режимы с невысоким линейным разрешением. Этот вид режимов является довольно важным, т.к. обеспечивает обзор больших площадей местности. Однако, несмотря на их относительно простую реализацию, имеются определенные нюансы в построении РЛИ.

В данной статье рассмотрены вопросы определения дальности в соседних азимутальных кадрах РЛИ, которое возникает в обзорных режимах и режимах мозаики. На первый взгляд это очень простой вопрос, который определен задержками стробов приемника. Однако, это не совсем так. Рассмотрим этот вопрос более детально для радиолокатора с синтезированием апертуры антенны (РСА) при реализации обзорного (сканирующего – ScanSAR) режима работы.

На рис. 1 приведена структура формирования РЛИ в режиме ScanSAR. Легко видеть, что отдельные кадры (например, 1,5,9...; 2,6,10...; 3,7,11...; а также 4,8,12...), формирующие единую полосу по дальности, стыкуются друг с другом по азимуту. При этом обычно требования по разрешению достаточно низкие, поэтому к синтезированию не предъявляются требования по компенсации миграций по дальности [3].

Однако в процессе стыковки возникает проблема, вытекающая из того, что соотношение между интервалом накопления (синтезирования) и размером получаемого кадра РЛИ значительно меньше 1. Как уже отмечалось, это приводит к тому, что при достаточно невысоком разрешении по дальности (более 10...15 метров) на обработку не накладываются ограничения по учету миграций по дальности. Однако на краях кадра РЛИ изменение расстояния до объектов, находящихся на одинаковом удалении от линии полета космического аппарата (КА) (от траектории центра фаз антенны РСА), достигает многих элементов разрешения. Это приводит к уходу по дальности одних и тех же объектов при стыковке соседних кадров РЛИ. Рассмотрим этот эффект подробнее (рис. 2).

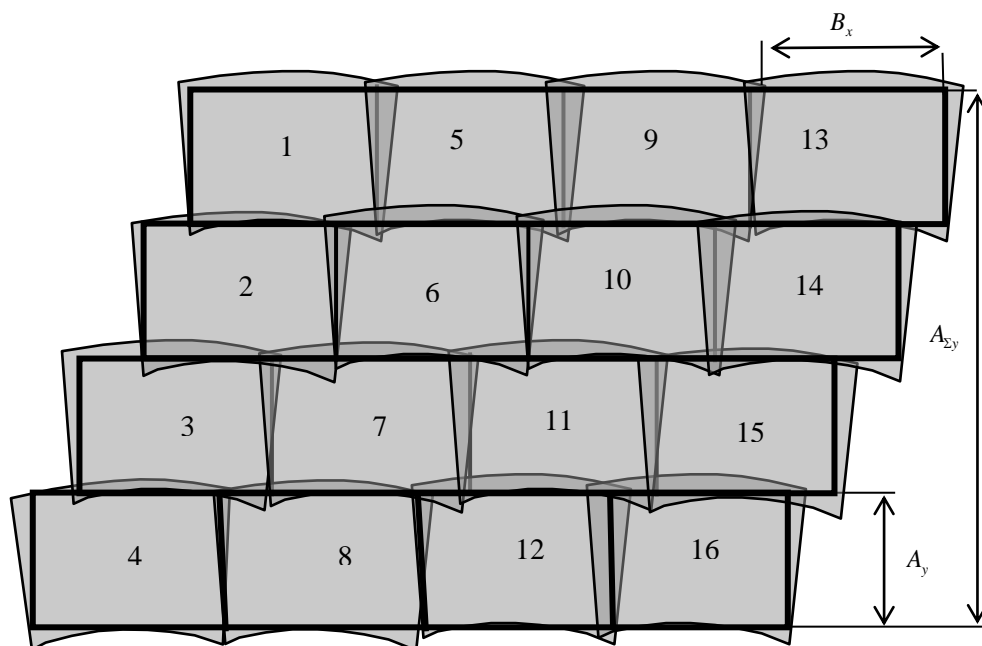


Рис. 1. Структура формирования РЛИ методом «ScanSAR»

Известно, что расстояние по дальности в радиолокации определяется по задержке переданного и принятого сигналов РЛС

$$R = (\tau_{\text{зад}} C / 2),$$

но в тоже время $R^2 = X_1^2 + Y_1^2$. Здесь R – измеренное расстояние, X_1 и Y_1 – координаты объекта, C – скорость света, $\tau_{\text{зад}}$ – время задержки сигнала.

Поэтому при формировании первого кадра дальность до объекта определится как $X = R$, а в следующем – как $X - X_1$.

Это хорошо видно из рис. 2, один и тот же объект на двух соседних кадрах, снятых на Y_1 расстоянии друг от друга, будет представлен на различных дальностях (X и X_1), т.е. «ошибка» в расстоянии составит $X - X_1$. Очевидно, что для случая, изображенного на рисунке,

$$X_1 = \sqrt{R^2 - Y_1^2},$$

но $X = R$, тогда

$$X - X_1 = R - X_1 = R - \sqrt{R^2 - Y_1^2}.$$

Однако на рисунке изображен один частный (хотя и достаточно наглядный) случай сдвига соседних кадров, а именно – сдвиг равен половине получаемого кадра.

$$Y_1 = R \cdot \sin(\pm\Theta / 2),$$

здесь Θ – ширина диаграммы направленности (ДН) антенны по уровню 3 дБ.

Тогда

$$X - X_1 = R - \sqrt{R^2 - R^2 \sin^2(\pm\Theta / 2)}, \quad (1)$$

причем знак перед Θ говорит о левом или правом краях кадра. Ввиду осевой симметричности краев кадра (рис. 2) конкретное значение знака в формуле (1) не имеет принципиального значения.

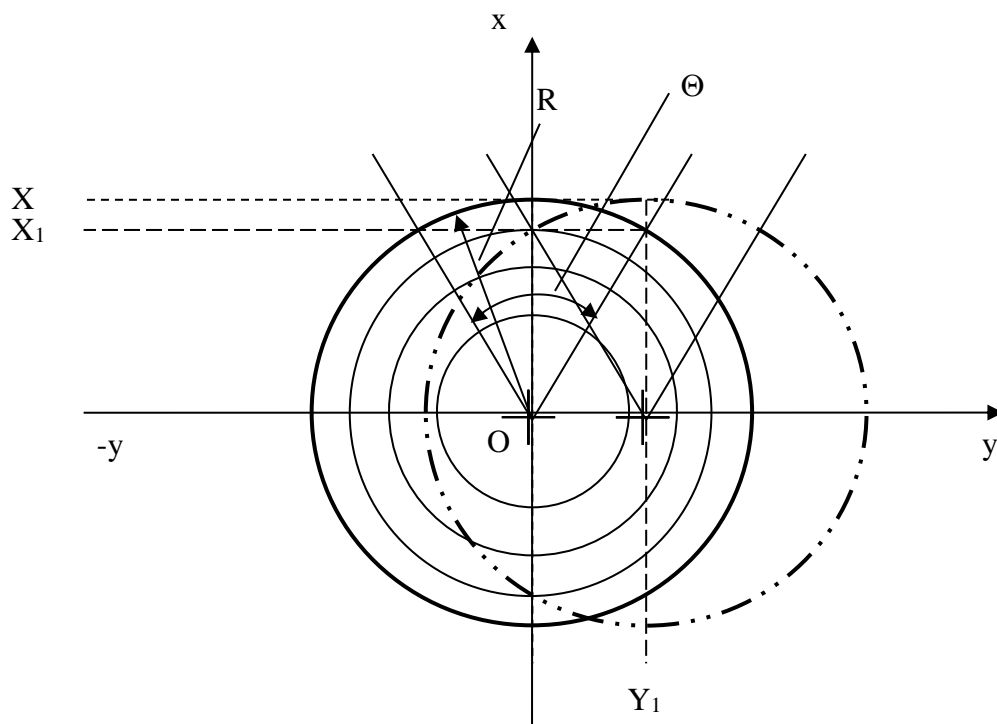


Рис. 2. Схема формирования кадра РЛИ в обзорных режимах

Выше рассмотрен вариант получения кадров РЛИ максимального размера, т.е. когда соседние кадры следуют «встык». В реальных вариантах это не всегда так. Обозначим через α угол, на который сдвигается одна и та же точка РЛИ в двух соседних кадрах. Тогда в формуле (1) вместо $\Theta/2$ подставим α и получим

$$X - X_1 = R - \sqrt{R^2 - R^2 \sin^2(\pm\alpha)} \quad (2)$$

или

$$X - X_1 = R \times (1 - \sqrt{1 - \sin^2(\pm\alpha)}), \quad (3)$$

причем легко видеть, что $\alpha = \arcsin(Y_1 / R)$.

Таким образом, видим, что смещение точки по дальности в соседних кадрах зависит от дальности до нее при прохождении траверса (R) и от угла сдвига ее в соседнем кадре α . На рис. 3 показан процесс формирования двух соседних кадров по азимуту.

Более темным выделен общий для обоих кадров участок. Для повышения отношения сигнал/шум было бы выгодно суммировать отсчеты РЛИ, отображающие один и тот же участок местности. Однако это вызывает трудности в связи с выше изложенной нестыковкой по дальности. Применительно к КА «Кондор-Э» [5] на дальности порядка 800 км и ширине ДН антенны около 1° изменение дальности составит около 30 м на краю кадра, т.е. перемещение объектов составит около 2 элементов разрешения. Поэтому суммировать отсчеты без корректировки не представляется возможным. В связи с этим стыковка на полученных РЛИ производилась без суммирования – «встык» (рис. 3а). Обычно указанный сдвиг соседних кадров программируется для каждой съемки. При использовании максимальной азимутальной ширины кадра, т.е. при $Y - Y_1$ равном половине азимутального размера кадра (рис. 3б, рис. 4) стыковка возможна без корректировки, т.к. функция \sin^2 – четная и сдвиги на краях кадра (справа и слева) одинаковы.

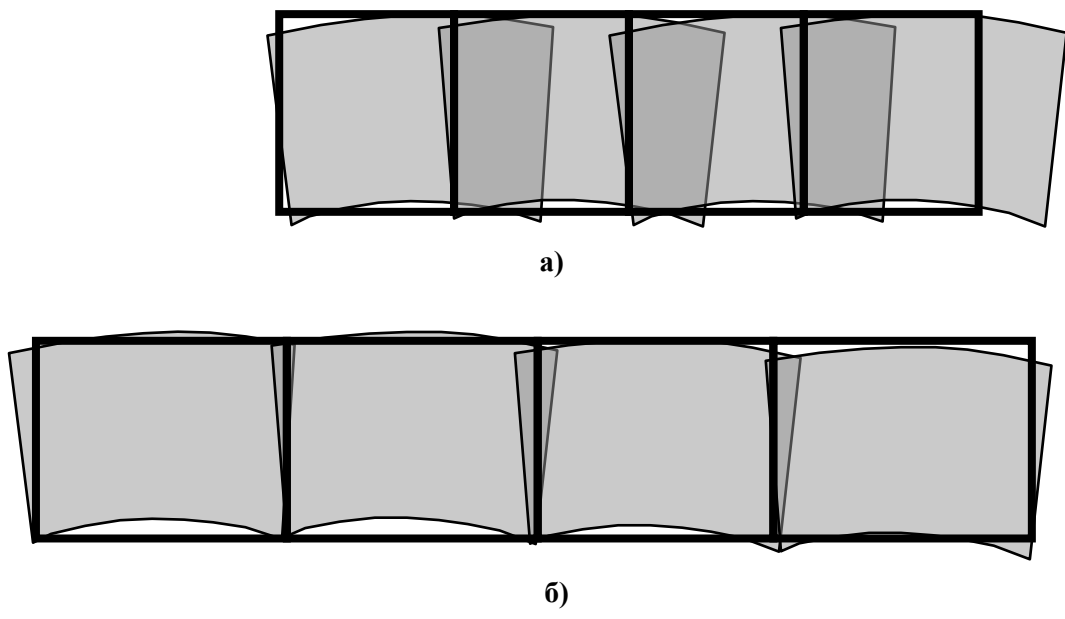


Рис. 3. Формирование соседних кадров по азимуту режима ScanSAR

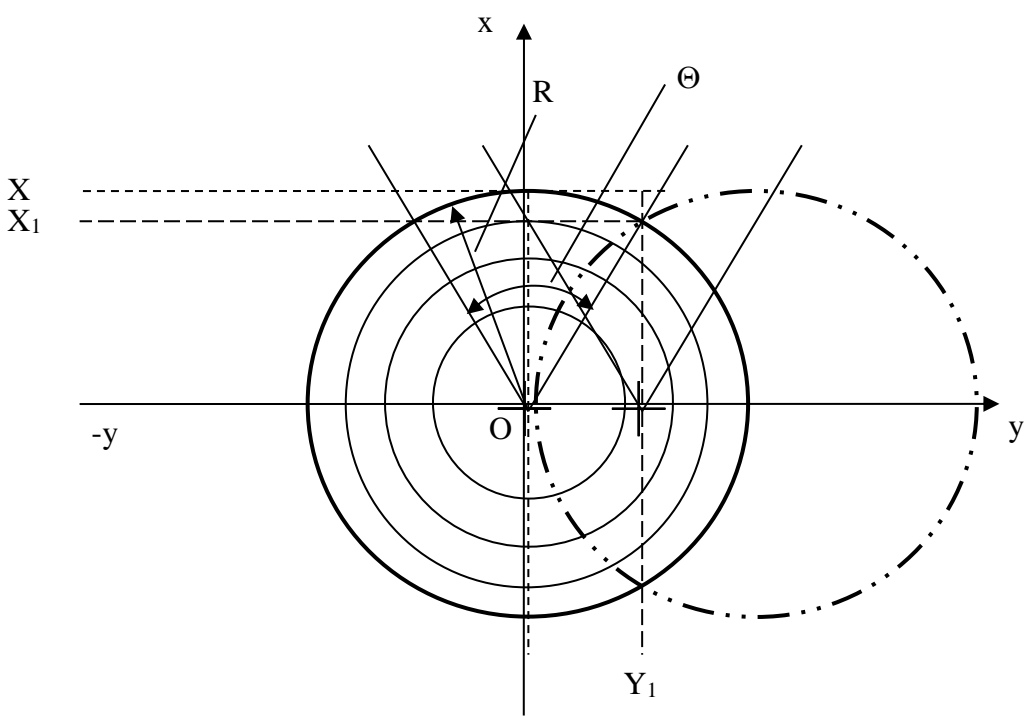


Рис. 4. Стыковка кадров при Y_1 равной половине раскрыва антенны

Все представленные выше рассуждения относятся к простейшему случаю – когда луч диаграммы направленности (ДН) перпендикулярен траектории полета. В реальных съемках этого часто не происходит, и мы имеем дело с передне/заднебоковым обзором. Обозначим отклонение луча ДН через γ , тогда $\alpha = \pm (\gamma \pm \theta/2)$, причем знак плюс при γ по направлению стыковки кадров, а минус – против (рис. 5).

При такой конфигурации съемки симметричность краев кадра нарушается, поэтому стыковка возможна только без некогерентного суммирования общих частей РЛИ, т.е. встык (рис. 3а). Для примера можно рассчитать «нестыковку» соседних кадров для

РСА «Кондор-Э». При дальности 800 км и ширине Θ равной 1° и угле $\gamma=1^\circ$ нестыковка может достигать 270 м (при линейном разрешении около 20 м), что лишает возможности некогерентного сложения РЛИ соседних кадров и даже не обеспечивает их корректной стыковки в соответствии рис. 3а. Очевидно, что даже при невысоком разрешении, формирование РЛИ из нескольких кадров в режимах ScanSAR и/или «мозаики» потребует внимательного отношения и расчетов. Выходом из положения может послужить обязательный анализ и определение угла отклонения ДН антенны γ (например, по доплеровскому центроиду) и, при необходимости, применения алгоритмов, используемых для устранения миграций по дальности в режимах высокого разрешения [3, 4] (в частотной или во временной области) независимо от отсутствия необходимости их учета. Реализация таких алгоритмов потребует дополнительных вычислительных затрат, однако их применение может быть вызвано потребностью получения качественных РЛИ.

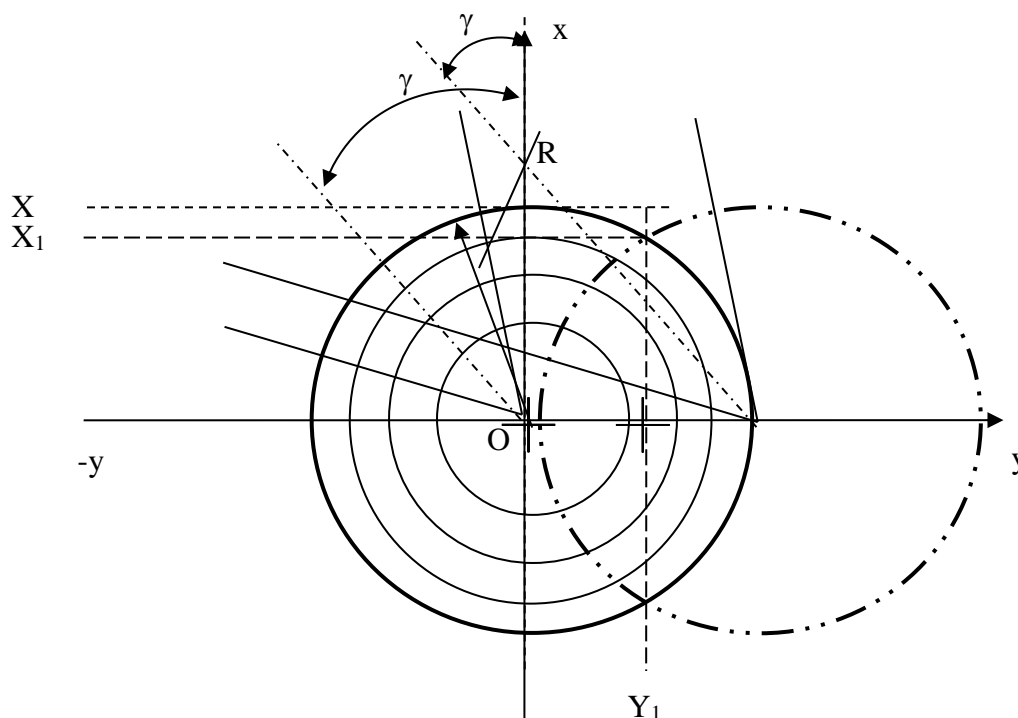


Рис. 5. Схема формирования кадров при заднебоковой съемке

В заключение можно сказать, что формирование единого РЛИ из отдельных кадров не является тривиальной задачей и требует внимательного рассмотрения и, при необходимости, специального учета.

Литература

1. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли / Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
2. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / Под ред. В.Т. Горяинова. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.

3. Цветков О.Е. Алгоритмы обработки сигналов в РСА с миграцией по каналам дальности // Цифровая обработка сигналов в РСА / Под ред. Е. Ф. Толстова. – Смоленск: Изд-во ВА ВПВО ВС РФ, 2005 – С.71-87.
4. Carrara W.G., Goodman R.S., Majewski R.M. Spotlight Synthetic Aperture Radar. Signal Processing Algorithms. – Artech House, Boston, London, 1995. – 554 p.
5. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Зайцев С.Э., Карпов О.А., Костров В.В, Неронский Л.Б., Савосин Г.В., Титов М.П., Толстов Е.Ф., Турук В.Э., Цветков О.Е. Итоги и уроки лётных испытаний РСА малого космического аппарата «Кондор-Э» // VI Всероссийские Армадовские чтения: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред: VII Всероссийская научная конференция (31.05–2.06. 2016 г., Муром). – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2016. – С.16-36.