

Измерение угла установки оси диаграммы направленности антенны космических РСА в вертикальной плоскости

Зайцев Сергей Эдуардович

кандидат технических наук, Главный конструктор по направлению, директор Объединённой дирекции космических систем АО «ВПК «НПО машиностроения».
Адрес: 143966, г. Реутов, Московская область, ул. Гагарина, д.33
E-mail: zaisergeri@mail.ru.

Карпов Олег Анатольевич

доктор технических наук, старший научный сотрудник ЗАО «АЭРОКОН».
E-mail: karp.smtp@mail.ru.

Адрес: 140180, г. Жуковский, Московская обл., ул. Жуковского, 1.

Аннотация: Рассмотрен эффект неоднозначности измерения дальности и наложения рекуррентных периодов эхо-сигналов в радиолокаторах с синтезированием апертуры (РСА) космического базирования. Проведён анализ влияния углового положения оси диаграммы направленности антенны (ДНА) на выбор периода следования и временное положение последовательности зондирующих импульсов. Изложена методика измерения углового положения оси ДНА в угломестной плоскости с использованием дальномерного канала и юстировочного режима. Рассмотрен расчёт и приведены зависимости, позволяющие определить погрешности измерения угла установки оси антенны РСА космического аппарата в юстировочном режиме, что необходимо учитывать при проектировании режимов съёмки и синтезе радиолокационных изображений.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированием апертуры антенны, неоднозначность по дальности, период следования, измерение дальности, рекуррентные периоды, опорная функция, радиолокационное изображение.

Радиолокаторы с синтезированием апертуры антенны (РСА) авиационного и космического базирования в своей основе содержат импульсную радиолокационную станцию с высокой степенью когерентности, причём в качестве зондирующего сигнала используются сложные сигналы с внутриимпульсной частотной или фазовой модуляцией [1–5]. Именно когерентность сигналов и приёмо-передающего тракта позволяют провести синтез апертуры антенны, а применение сигналов с широкой полосой частот обеспечивает системе высокое разрешение и делает её системой «радиовидения». Однако на качество формируемого радиолокационного изображения (РЛИ) оказывает влияние ещё несколько десятков параметров, включая организацию и геометрические параметры радиолокационного обзора. Особенностью режимов съёмки РСА космического базирования [1–5], в том числе и РСА «Стриж» космического аппарата «Кондор-Э», о котором речь идёт в

данной статье, является существенное несоответствие однозначной дальности (определяемой частотой повторения) и дальности наблюдения (сотни километров). Целью данной работы является анализ взаимного влияния угла визирования и периода следования зондирующих импульсов на уровень помех, возникающих при синтезировании РЛИ и вызываемых неоднозначностью сигналов РСА по дальности.

Вообще говоря, классический подход к выбору частоты повторения импульсов F_p приводит к необходимости обеспечения однозначности представления траекторного сигнала по азимутальной координате и однозначности измерения дальности до объектов. Обычно эти два условия формулируются в виде выполнения двух неравенств:

$$\frac{2 \cdot V_p \cdot \theta_a}{\lambda} \leq F_p \leq \frac{c}{2R_0}. \quad (1)$$

Выражение $\Delta f_{az} = 2 \cdot V_p \cdot \theta_a / \lambda$ определяет ширину спектра сигнала по азимуту. Здесь θ_a – ширина диаграммы направленности антенны (ДНА) РСА в азимутальной плоскости, V_p – путевая скорость носителя, R_0 – заданная максимальная дальность наблюдения до объекта съёмки, λ – рабочая длина волны, c – скорость света.

Корректный выбор F_p во многом предопределяет качество выходной информации в виде РЛИ. В первую очередь от системы требуют выполнения левой части неравенства (1), поскольку задача снижения уровня шума дискретизации по азимуту (путевому времени) является определяющей, ибо нарушение теоремы В.А.Котельникова неизбежно приведёт к проявлению эффекта наложения спектров и, как следствие, к снижению качества РЛИ.

Рассмотрим более подробно механизм возникновения шумов неоднозначности по дальности. Неоднозначность по дальности обусловлена наложением друг на друга отражённых сигналов, относящихся, в основном, к двум последовательно излучённым импульсам.

Если диаграмма направленности антенны в вертикальной плоскости широкая, а частота повторения зондирующих импульсов велика, то может возникнуть ситуация, когда эхосигналы трёх и более периодов накладываются друг на друга. Такая ситуация представлена на рис. 1,а. Происходит это в связи со следующими обстоятельствами.

В космических РСА выполнение правой части неравенств (1) (однозначность частоты по дальности) невозможно из-за огромных дальностей картографирования и большой ширины азимутального спектра траекторного сигнала. Простой анализ показывает несопоставимость этих двух значений для РСА «Стриж»: Δf_{az} в рассматриваемом случае составляет около 2700 Гц, отношение $c/2R_0$ составляет порядка 150...270 Гц. В результате практически в любом режиме съёмки отражённый поверхностью сигнал принимается не в текущем периоде зондирования, а через десятки периодов повторения. Это означает, что на пути от антенны РСА до участка местности, РЛИ которого следует получить, находятся десятки ещё не достигших Земли зондирующих импульсов

(см. рис. 2). В момент приёма отражённого сигнала на входе приёмника может оказаться сигнал одновременно от нескольких излучённых сигналов, находящихся в рамках однозначной для данной частоты зондирования дальности. Выходом из положения может быть использование ДН реальной антенны как пространственного фильтра, выделяющего главным лепестком заданный участок местности на земной поверхности (см. рис. 2). При согласовании длительности периода повторения и положения ДН в вертикальной плоскости возникает идеальная картина, показанная на рис. 2 и 1,б. При этом в неравенствах (1) R_0 можно заменить на $\Delta R_p = cT_p/2$. Тогда получаем

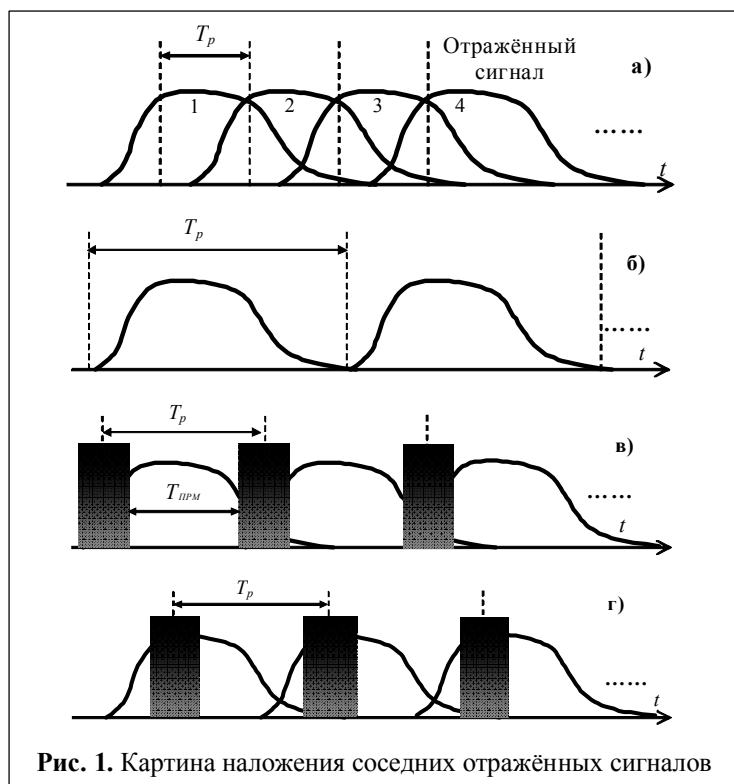


Рис. 1. Картина наложения соседних отражённых сигналов

$$\frac{2 \cdot V_p \cdot \theta_a}{\lambda} \leq F_p \leq \frac{c}{2 \Delta R_p} \quad (2)$$

Итак, подавление сигнала рекуррентных дальностей обеспечивается применением узконаправленных антенн. В результате (в идеале) приём сигналов мешающих отражений происходит только по боковым лепесткам. Тогда основное требование к однозначной частоте по дальности определяется шириной следа главного лепестка ДНА по дальности. Физическая трактовка этого условия достаточно простая: импульс должен успеть «пробежать» на поверхности в пределах основного лепестка ΔR_p «туда и обратно» до прихода следующего. Тогда период повторения импульсов должен удовлетворять условию:

$$T_p = \frac{1}{F_p} \geq \frac{2 \cdot R_0 \cdot \theta_{ay}}{c \cdot \text{tg} \beta}, \quad (3)$$

где θ_{ay} – ширина ДНА в вертикальной плоскости, β – угол скольжения на поверхности. При этом чаще всего картина отражений отличается от идеальной. В результате компромисса по (2) период повторения выбирается несколько меньше границы (3), и в каждом периоде зондирования отражённый сигнал смежных периодов всё-таки принимается даже по главному лепестку ДНА, как это показано на рис. 1, в.

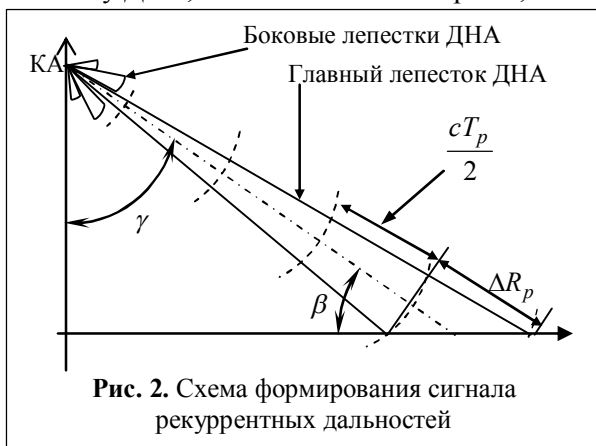


Рис. 2. Схема формирования сигнала рекуррентных дальностей

Однако необходимо иметь в виду, что отражённый сигнал принимается только в рамках строба приёмника длительностью $T_{ПРМ}$ (см. рис. 1, в). При этом в каждом периоде зондиро-

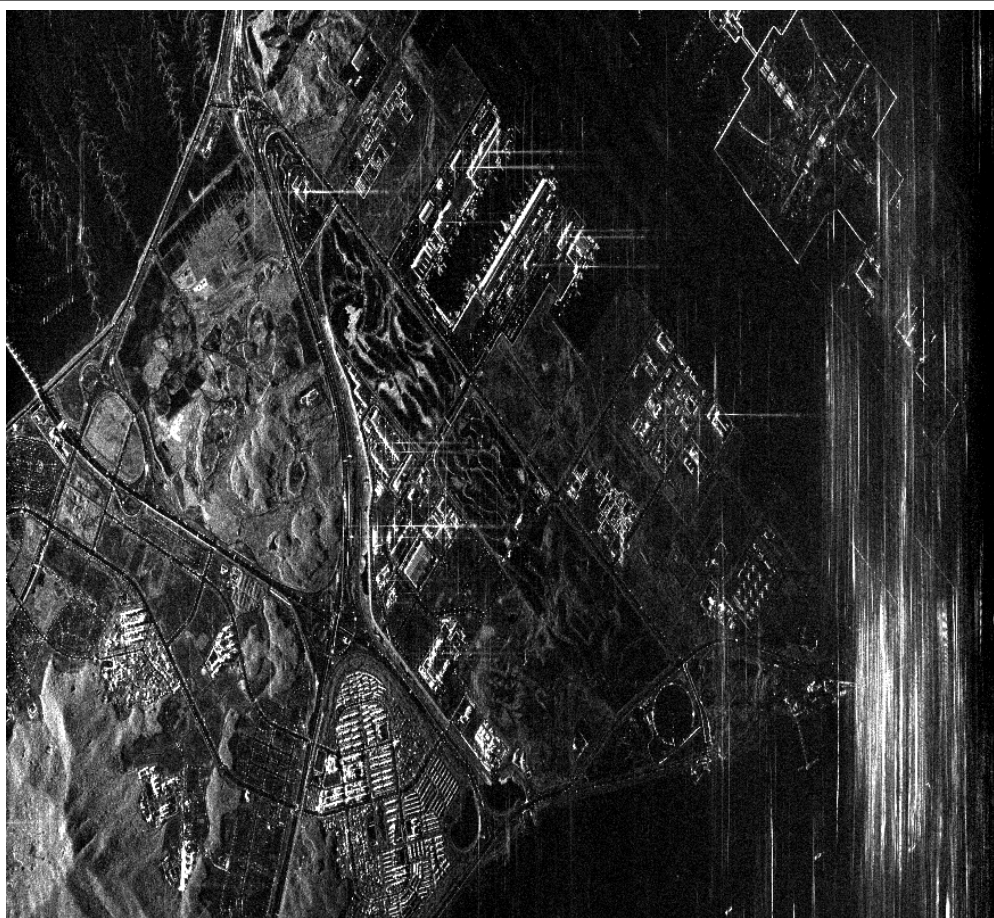
вания выделяется определённый участок местности по дальности

$$\Delta R_c = c T_{ПРМ} / 2.$$

Размеры строба (начало и конец) определяются шириной полосы захвата РСА в каждом режиме и, по крайней мере, двумя защитными интервалами: 1) в начале периода – для закрытия приёмного устройства на время излучения зондирующего импульса; 2) в конце периода – для подготовки радиолокатора к излучению в следующем периоде. Вариант положения строба приёмника показан на рис. 1, в.

Очень важным условием нормальной работы РСА является согласование положения строба приёма с участком местности, облучаемым главным лепестком ДНА. Ось ДНА должна совпадать с центром участка картографируемой поверхности по дальности, а размер строба соответствовать длине облучаемого участка местности. Именно такой случай показан на рис. 1, в. Однако далеко не всегда происходит такое совпадение. Рассогласование положения ДНА и строба дальности приёмного канала обычно вызывается ошибкой в установке ДНА в вертикальной плоскости, поскольку точность установки границ строба высока, и ошибка установки строба находится на уровне разрешающей способности. Пример влияния такого рассогласования на положение отражённого сигнала показан на рис. 1, г. В примере на этом рисунке ДНА ушла «под себя», то есть установленный угол места γ (рис. 2) меньше, чем требуется. Тогда сигнал рекуррентной дальности проходит по главному лепестку ДНА. РЛИ местности, сформированное в рамках лётных испытаний РСА «Стриж» именно для такого случая, иллюстрируется рис. 3 (а, б), причём дальность на РЛИ отсчитывается по горизонтали.

Напомним, что для РСА «Стриж» F_p должна быть гарантированно выше 2700 Гц (а в режиме прожекторного обзора желательно выше в два и более раза 2700 Гц). В таком случае в принимаемом стробе по дальности $\Delta R_c = c T_{ПРМ} / 2$ неизбежно присутствуют

а) настройка опорной функции на заданную дальность R_0 **Рис. 3.** РЛИ в случае ошибки установки ДН в вертикальной плоскости

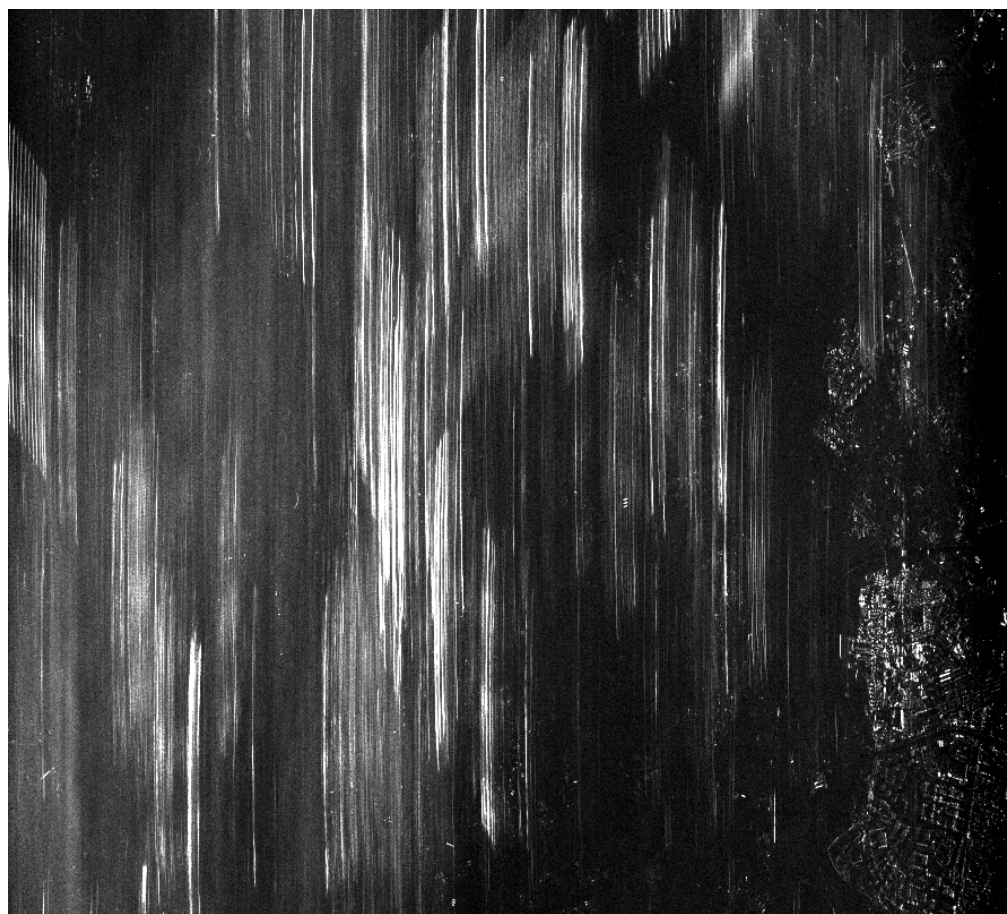
сигналы с так называемых рекуррентных дальностей: $R_0 = \pm n cT_p / 2$, $n = 1, 2, 3, \dots$ (см. рис. 2).

Если положение строба приёмного канала согласовано по дальности и длительности с направлением оси ДНА (см. рис. 1, в и рис. 2), при формировании РЛИ проблем неоднозначности по дальности не возникает. Если же положение ДНА не согласовано по дальности и сдвинуто относительно строба, как это показано на рис. 1, г, то кроме изображения, соответствующего дальности R_0 , появляется расфокусированное РЛИ, соответствующее дальности $R_0 - cT_p / 2$. Чтобы убедиться в этом, достаточно сформировать РЛИ для этой дальности. Оно окажется сфокусированным (см. рис. 3, б). Вместе с тем, вновь сфокусированное РЛИ не является непосредственно продолжением уже ранее сформированного для реальной дальности, поскольку получено из сигнала рекур-

рентной дальности, да ещё с изъятиями двух защитных интервалов (см. рис. 1, г).

Важно отметить, что неоднозначность по дальности проявляется в виде расфокусировки («растяжек») по азимуту. Поскольку система обработки настроена на дальность R_0 , а сигнал неоднозначности приходит с других дальностей $R_0 = \pm n cT_p / 2$, то система обработки по азимуту оказывается не согласованной по фазе с отражённым сигналом. Такой эффект напоминает похожее явление в оптике, которое известно как глубина резкости.

Однако условие (3), по которому выбирается длительность периода зондирования, не исключает приёма сигналов рекуррентных дальностей по боковым лепесткам ДНА даже в условиях полного согласования положения строба и оси, как это показано на рис. 1, в. Это просто неизбежно. Уровень первых боковых



б) настройка опорной функции на заданную дальность минус $c \cdot T_p / 2$
Рис. 3. РЛИ в случае ошибки установки ДН в вертикальной плоскости

лепестков ДНА в худшем случае составляет $-13...-15$ дБ ($-26...-30$ дБ, если учесть излучение и приём). Это обычно определяет недостаточный коэффициент подавления рекуррентных отражений. Дополнительным серьёзным эффектом подавления обладает расфокусировка совместно с изменением закона миграций сигналов опорной («настроенной») дальности и рекуррентной (сдвинутой на $\pm cT_p/2$). Такой эффект, при метровом разрешении, обеспечивает снижение амплитуды сигнала при синтезе РЛИ ближайшей рекуррентной дальности ещё на $-27...-30$ дБ. Таким образом, результирующее подавление помехового сигнала первых боковых лепестков может составлять $-50...-60$ дБ. Это уже неплохой уровень подавления.

Кроме того, аппаратура РЛС имеет дополнительные возможности снижения уровня сиг-

налов рекуррентных дальностей. Дело в том, что в основной строб приёмника попадают помеховые сигналы «предыдущих» и «последующих» импульсов. Бортовая РЛС имеет возможность излучать сигналы с разной функцией модуляции: фазокодированные (ФКМ) сигналы или линейно частотно модулированные (ЛЧМ) сигналы с разным знаком крутизны («вверх», «вниз» – естественно, с сохранением ширины спектра) от импульса к импульсу. Иногда такие импульсы называют ортогональными, хотя, строго говоря, это свойство не вполне выполняется. Взаимная корреляционная функция этих двух разных импульсов (в рассматриваемом случае ЛЧМ) определяет уровень помехового сигнала после сжатия по дальности. В результате «декорреляции» сигнала текущей и рекуррентной дальности удаётся добиться дополнительного сни-

жения уровня помехового сигнала ещё на 25...30 дБ.

Приведённые цифры демонстрируют весьма эффективное снижение сигналов соседних рекуррентных дальностей, принятых по боковым лепесткам. Однако, как показано ранее, неточная установка луча антенны (угла γ) на заданную дальность приведёт к ошибочному приёму заданного строба в других каналах дальности, что фактически может свести на нет возможность получения РЛИ высокого качества. Ось ДН антенны РСА в вертикальной плоскости должна быть направлена на середину участка местности, попадающего в приёмный строб дальности. Для измерения ошибок установки луча ДНА потребуется организовать специальный режим (режим юстировки) с большой однозначно измеряемой дальностью (с низкой частотой повторения F_p). Переход к большим периодам повторения T_p обеспечивает широкий диапазон однозначной дальности (несколько интервалов ширины ДНА по дальности ΔR_p), однако при этом максимальная однозначно измеряемая частота по путевой (азимутальной) координате уменьшается. Ясно, что в этом случае не может идти речь о формировании высококачественного РЛИ, поскольку отказ от высокой однозначной азимутальной частоты приводит к проявлению эффекта наложения. Кроме того, необходимо учитывать технические ограничения аппаратуры РСА, которые при заданном угле визирования γ не позволяют получить период повторения T_p длительностью более нескольких стробов приёмного канала в штатных режимах. Применительно к параметрам РСА КА «Кондор-Э» строб приёмника, соответствующий ширине луча на поверхности, будет составлять от 27 до 220 мкс. Целесообразно использовать самый больший из них, тогда период повторения T_p хотя бы в два наибольших строба будет составлять 440 микросекунд. Следует также иметь максимально длинный интервал строба

приёмника $T_{\text{ПРМ}}$ (см. рис. 4), чтобы обеспечить «полное» присутствие отражённого сигнала главного луча антенны.

Определение дальности по оси ДНА требует измерения временного положения точки пересечения оси ДН и земной поверхности (T_m на рис. 4). Возможным вариантом достаточной точности в этом случае может быть положение максимума усреднённого отражённого сигнала. Для повышения точности измерений следует обеспечить высокое отношение сигнал-шум. Поэтому целесообразно использовать импульсы максимальной длительности (для РСА «Стриж» 17 мкс) с последующим сжатием по дальности. Окончательная оценка времени «максимума» определяется строкой значений сигнала по дальности – результату усреднения всех наблюдаемых сжатых стробов (всех периодов повторения). Отметим, что для повышения точности также желательно иметь однородный сюжет отражающей поверхности.

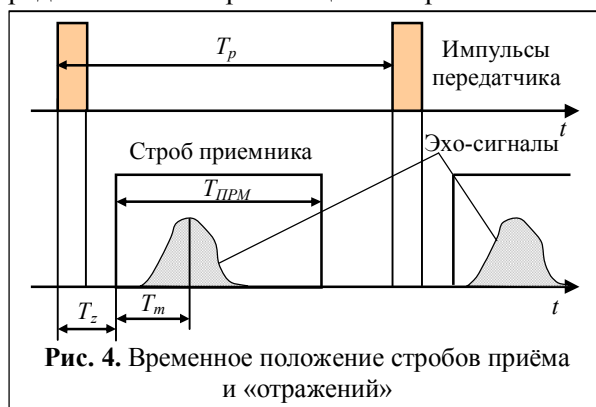


Рис. 4. Временное положение стробов приёма и «отражений»

Для космического РСА [7] связь между углами γ , β и наклонной дальностью R_0 можно установить, используя геометрические соотношения, следующие из анализа рис. 5.

Зависимость дальности от угла визирования определяется соотношением

$$R_0 = R_3 \cdot \frac{\cos(\beta + \gamma)}{\sin \gamma}, \quad (4)$$

где $R_3 = 6371$ км – радиус Земли.

Угол скольжения β определяется углом визирования

$$\beta = \arccos \left[\left(1 + \frac{H}{R_3} \right) \cdot \sin \gamma \right], \quad (5)$$

где H – высота орбиты.

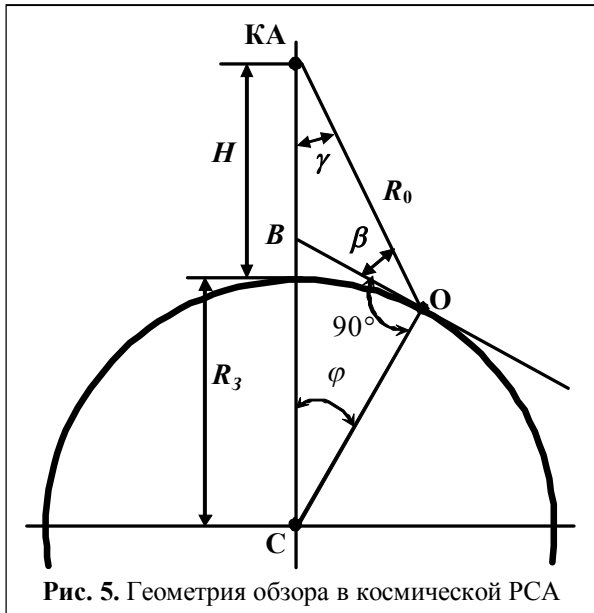


Рис. 5. Геометрия обзора в космической РСА

Соотношения (4) и (5) определяют однозначную взаимосвязь между наклонной дальностью и углами. Проведём с использованием (4) и (5) расчёт ошибок для РСА космического аппарата «Кондор-Э» [8] при следующих параметрах: высота орбиты $H = 510$ км; угол визирования $\gamma = 20^\circ \dots 55^\circ$. Пусть погрешность угловой ориентации космического аппарата при проведении целевой работы составляет $(3\sigma_\gamma) = 3' \dots 5'$. На рис. 6 представлены зависимости ошибки определения наклонной дальности ($3\sigma_R$) от угла визирования при двух значениях погрешности нацеливания оси ДНА в зону съёмки. Как следует из графиков, погрешности могут быть значительными, что может привести к уже рассмотренным выше искажениям РЛИ, которое синтезировалось при идеальной расчётной опорной функции. Также следует заметить, что из-за нелинейности уравнений (4), (5) в оценке дальности появляется смещение, зависимость которого от угла визирования представлена на рис. 7. Справедливости ради надо отметить, что величина смещения невелика и составляет 1...2 элемента разрешения по дальности, поэтому

его следует учитывать при реализации детальных режимов с высоким разрешением.

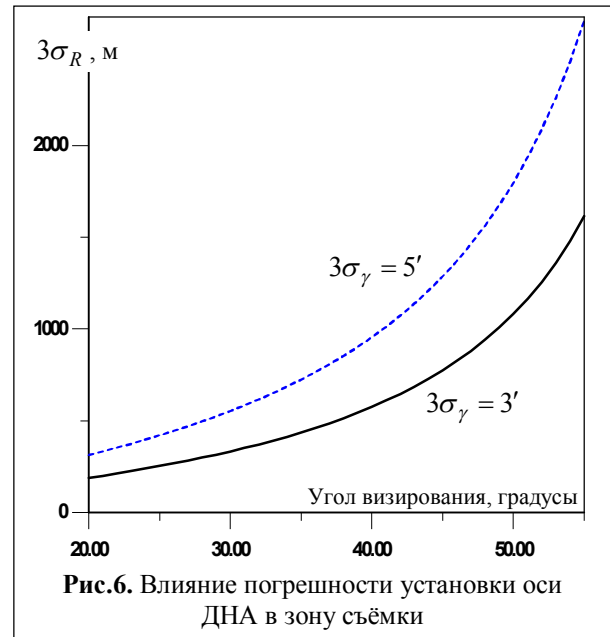


Рис. 6. Влияние погрешности установки оси ДНА в зону съёмки

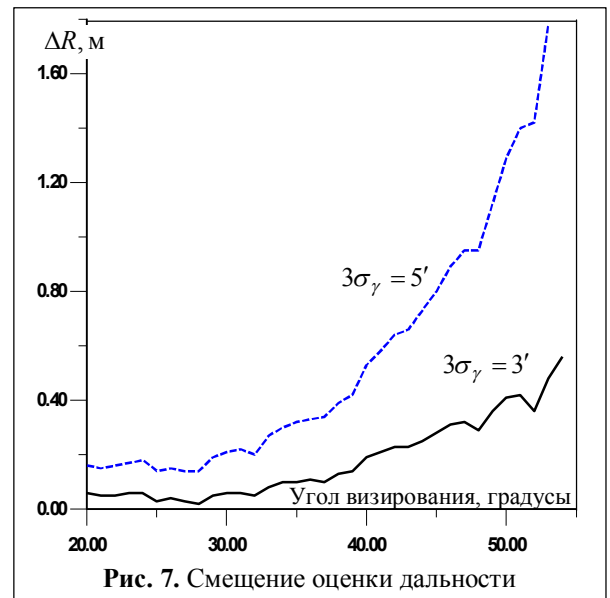


Рис. 7. Смещение оценки дальности

Особый интерес представляет точность оценивания положения оси ДНА в угломестной плоскости по измерению наклонной дальности. Так, например, известно [9], что при гауссовской аппроксимации основного лепестка ДНА и большом отношении сигнал-шум ($q_0 \gg 1$) точность измерения угловой координаты методом максимума определяется соотношением $\sigma_m = \theta_{ay} / \sqrt{2\pi q_0}$. При накоплении и усреднении дальностных строк в юстировочном режиме достигается отношение сигнал-шум до $q_0 = 40 \dots 45$ дБ. Это позволяет оценить

положение точки t_m в пересчёте в угловые координаты и с учётом ширины ДНА $\theta_{av} = 1^\circ$ с погрешностью $\sigma_m = 0,004^\circ$. Кроме того, необходимо учесть погрешности дискретизации и импульсный характер работы РСА.

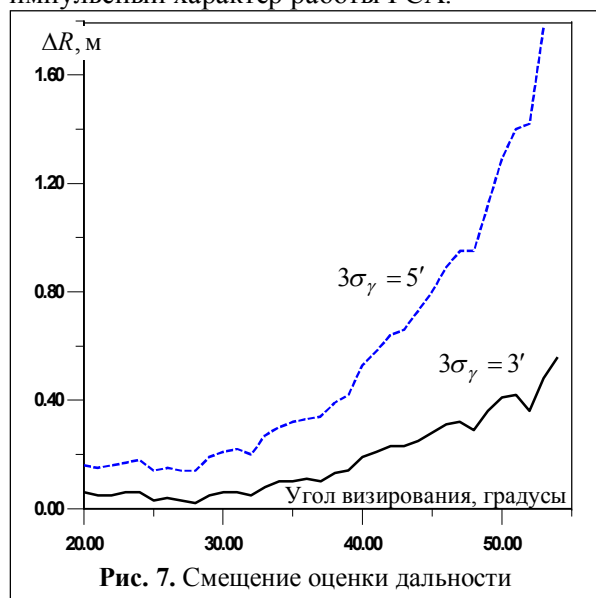


Рис. 7. Смещение оценки дальности

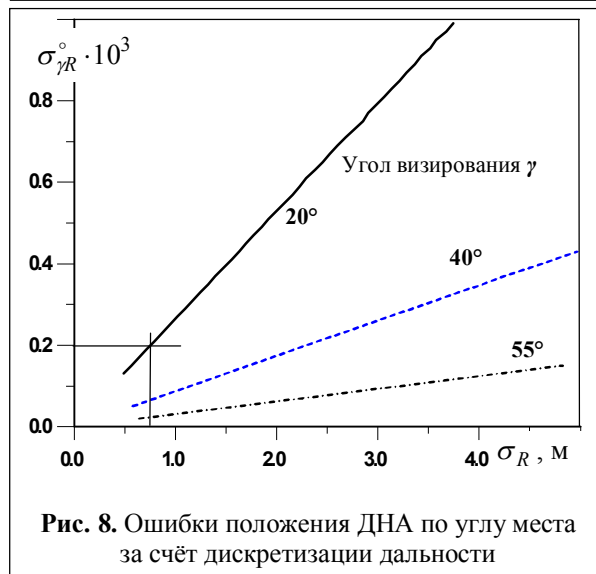


Рис. 8. Ошибки положения ДНА по углу места за счёт дискретизации дальности

В РСА «Стриж» для наилучшего с точки зрения точности измерения дальности обзорного режима ОР-30 получаем: погрешность измерения дальности за счёт дискретизации составляет $\sigma_d = 0,72$ м; погрешность измерения дальности импульсным методом $\sigma_{imp} = 0,2$ м, что даёт суммарную погрешность $\sigma_R = \sqrt{\sigma_{imp}^2 + \sigma_d^2} \approx 0,75$ м. Графики зависимости среднеквадратического значения ошибок измерения угла, рассчитанные с использованием

(4), (5), от точности измерения дальности при различных углах визирования приведены на рис. 8. Графики показывают, что во всех режимах ошибки измерения угла установки оси ДНА за счёт дискретизации дальности не превысят $\sigma_{\gamma R} = 0,0002^\circ$. Расчет суммарной погрешности $\sigma_\gamma = \sqrt{\sigma_{\gamma R}^2 + \sigma_m^2}$ даёт значение среднеквадратической ошибки $\sigma_\gamma \approx 0,004^\circ$ ($\sim 15''$), что в 4...7 раз меньше ошибок, которые обеспечиваются навигационной аппаратурой и траекторными измерениями.

Следовательно, измерение по принятому сигналу параметра R_0 в юстировочном режиме позволяет оценить реальный угол отворота ДНА γ с более высокой точностью, чем обеспечивает навигационная система оценивания вектора состояния КА как носителя РСА. Это предоставляет возможность учесть ошибки установки луча ДНА при синтезе радиолокационного изображения и корректно совместить строб приёмного канала со следом ДНА на Земле в штатных режимах.

Литература

1. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турок Э.Г. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В.С. Вербы. — М.: Радиотехника, 2010. — 676 с.
2. 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.
3. Радиолокационные системы воздушной разведки. Дешифрирование радиолокационных изображений / Под ред. Л.А. Школьного. — М.: Изд. ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2008. — 531 с.
4. Авиационные системы радиовидения. Монография / Под ред. Г.С. Кондратенкова. — М.: Радиотехника, 2015 — 648 с.
5. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны. / Под ред. В.Т. Горяинова. - М.: Радио и связь, 1988. — 304 с.
6. Авиационные радиолокационные комплексы и системы: учебник для слушателей и курсантов ВУЗов ВВС / Под ред. П.И. Дудника. — М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2006. — 1112 с.
7. Зеленцов В.В., Казаковцев В.П. Основы баллистического проектирования искусственных спутников Земли: Учебное пособие. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. — 174 с.
8. Зайцев С.Э. Космический аппарат — носитель РСА «Кондор-Э» как основа радиолокационной

космической системы «Кондор-ФКА» // VI Всероссийские Армандовские 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.431-442.

9. Сосулин Ю.Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации. Учебное пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1992. – 304 с.

Поступила 05 сентября 2017 г.

English

Axis mounting angle measurement for the beam pattern of space-based SAR in elevation

Sergey Eduardovich Zaytsev – Candidate of Technical Sciences, Segment Chief Engineer Director, Joint Directorate of Space Vehicles, JSC “MIC NPO Mashinostroyeniya”.

E-mail: zaiserger@mail.ru.

Address: 143966, Reutov, Moscow Region, Gagarin St., 33.

Oleg Anatolyevich Karpov – Doctor of Engineering, Senior Research Associate, CJSC AEROKON.

E-mail: karp.smtp@mail.ru.

Address: 140180, Zhukovsky, Moscow Region, Zhukovsky st., 1.

Abstract: Return signals in space-based synthetic aperture radars (SAR) is examined. Basic limitations for the pulse sounding period that are to be regarded in engineering SAR operation modes are analyzed. In particular, the replaying control requirement without overlapping azimuth spectrum for space-based systems forbids providing unambiguous range measurements. Recommendations to choose the sounding pulse period are given. The angular position effect of the antenna pattern (AP) axis on choosing the sounding pulse period and its sequence temporal position is analyzed. It is noted that antenna nulling, accurate AP beaming at the target and support function focusing enables to suppress range ambiguity noise by 50 ... 60 dB. The synthesized radar images with the support function settings for various ranges are given. Further steps to reduce the effect of signal interference in range are considered. It is indicated that the interference signal level can be reduced by 25 ... 30 dB due to modulation law change in the aggregate signal. The measuring methods for AP axis angular position in elevation plane using radar range-measurement channel and positioning mode are listed. The calculation is analyzed and the dependences are given enabling to define the measurement error for SAR antenna axis mounting of space-based SAR in the positioning mode, which should be considered in engineering shooting modes and in radar image synthesis. The calculation which is carried out for Condor-E space vehicle manifested that AP axis angular position measurement via the onboard radar can ensure higher accuracy than the navigation equipment and path measurements.

Key words: synthetic aperture radar, range ambiguity, pulse period, range measurement, recurrent periods, support function, radar image.

References

1. Verba V.S, Neronsky L.B., Osipov I.G., Turuk E.G. Space-based Earth viewing radar systems. Ed. by V.S. Verba - M Radiotekhnika, 2010. - 676 p.
2. Kondratenkov G.S., Frolov A.Yu. Radio vision. Radar systems for Earth remote sensing. The textbook for higher education institutions. Ed. by G.S. Kondratenkov. - M.: Radiotekhnika, 2005. - 368p.
3. Air reconnaissance radar systems, radar image interpretation. - Ed. by L.A. Shkolny. - M.: VVIA publ.h. named after N.E. Zhukovsky, 2008. - 531 p.
4. Aircraft radiovision systems. The monograph. Ed. by G.S. Kondratenkov. - M.: Radiotekhnika, 2015 - 648 p.
5. Digital synthetic aperture radars. Ed. by V.T. Goryainov. - M.: Radio i svyaz, 1988. - 304 p.
6. Aircraft radar facilities and systems: textbook for attendees and cadets of the Air Force Higher Education Institutions. Ed. by P.I. Dudnik. - M.: Publ.H. VVIA named after prof. N.E. Zhukovsky, 2006. - 1112 p.
7. Zelentsov V.V., Kazakovtsev V.P. Ballistic engineering fundamentals of man-made Earth Satellites: Textbook. - M.: MSTU named after N.E. Bauman, 2012. - 174 p.
8. Zaitsev S.E. The space vehicle - SAR carrier Condor-E as a basis of the radar-tracking space system Condor-FKA. VI All-Russian Armand readings: Radio physical methods in media remote sensing: VII All-Russian scientific conference (31.05-2.06. 2016, Murom). - Murom: Izdatelsko-poligrafichesky tsentr MI VIGU, 2016. – P. 431-442.
9. Sosulin Yu.G. Fundamental theory of radar detection and radio navigation. Textbook for higher education institutions. - M.: Radio i svyaz, 1992. - 304 p.