

Повышение детальности изображения при разноракурсном наблюдении космического комплекса РСА

М.И. Бабокин, В.В. Костров, М.П. Титов

АО «АЭРОКОН», 140180, г. Жуковский, МО, ул. Жуковского, 1

E-mail: m.baboki@hotmail.ru

МИ ВлГУ, 602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23

E-mail: yvk@mit.ru

В докладе рассмотрены вопросы формирования отраженных от земной поверхности сигналов космического комплекса РСА при разноракурсном наблюдении. Обоснована возможность детального формирования изображения земной поверхности при совместной обработке сигналов. Приведены результаты экспериментальной обработки.

This report concerns questions about of forming signals, reflected from the earth surface in multipassage systems SAR. The possibility to form the imagery with cooperative signals of each passage processing is proofed. The results of experimental verification of the algorithms are given.

Введение

Развитие теории и принципов построения радиолокаторов с синтезированием апертуры антенны (РСА) позволило создать высокоэффективные комплексы космического базирования, способные получать радиолокационные изображения (РЛИ) с высокой пространственной разрешающей способностью и производить детальное зондирование Земли на большой дальности, независимо от погодных условий. Вместе с тем, ряд технических ограничений, таких как высокая скорость изменения мгновенной полосы излучения и приёма, ограниченный сектор сканирования по азимуту и т.п., не позволяют воспользоваться в полной мере достоинствами субметрового пространственного разрешения.

Одним из вариантов решения проблемы может быть применение совместной обработки сигналов, полученных в разных ракурсах при обоснованном пространственном смещении космического аппарата (КА), способной повысить детальность РЛИ по дальности и (или) по азимуту, а также подавить когерентный спекл-шум.

Реализовать разноракурсное наблюдение возможно различными методами. Например, при наличии одного КА используется вариант многопроходной съемки, когда к наблюдению объекта исследования возвращаются через несколько витков орбиты (по времени – до десятков суток). Другим возможным вариантом является использование нескольких (минимум двух) КА с РСА в независимом или бистатическом сочетании [1–4]. В любом из этих случаев радиолокационные изображения одной и той же сцены получаются с разных ракурсов.

Каждый из этих вариантов реализации пространственного смещения имеет свои достоинства и недостатки. В качестве объекта исследования выбран первый вариант, основные положения и результаты анализа которого с учётом некоторой специфики могут быть перенесены на любой из вариантов построения.

Цель работы – рассмотреть основы построения космического комплекса РСА при разноракурсном наблюдении и провести анализ его характеристик пространственного разрешения при обзоре земной поверхности, обосновать алгоритмы обработки парных сигналов с последующей их экспериментальной проверкой.

Сигнальная функция двухпроходного РСА комплекса

На рис. 1 представлена геометрическая схема двухпроходного РСА комплекса, где показано положение носителя РСА в начальный момент времени $t=0$, а затем положение того же КА через несколько суток при пролёте того же участка поверхности. Луч реальной диаграммы направленности антенны радиолокатора отклонен вперед на угол α_0 относительно угла «нулевой доплеровской частоты» (при боковом обзоре $\alpha_0 = 0^\circ$) [5].

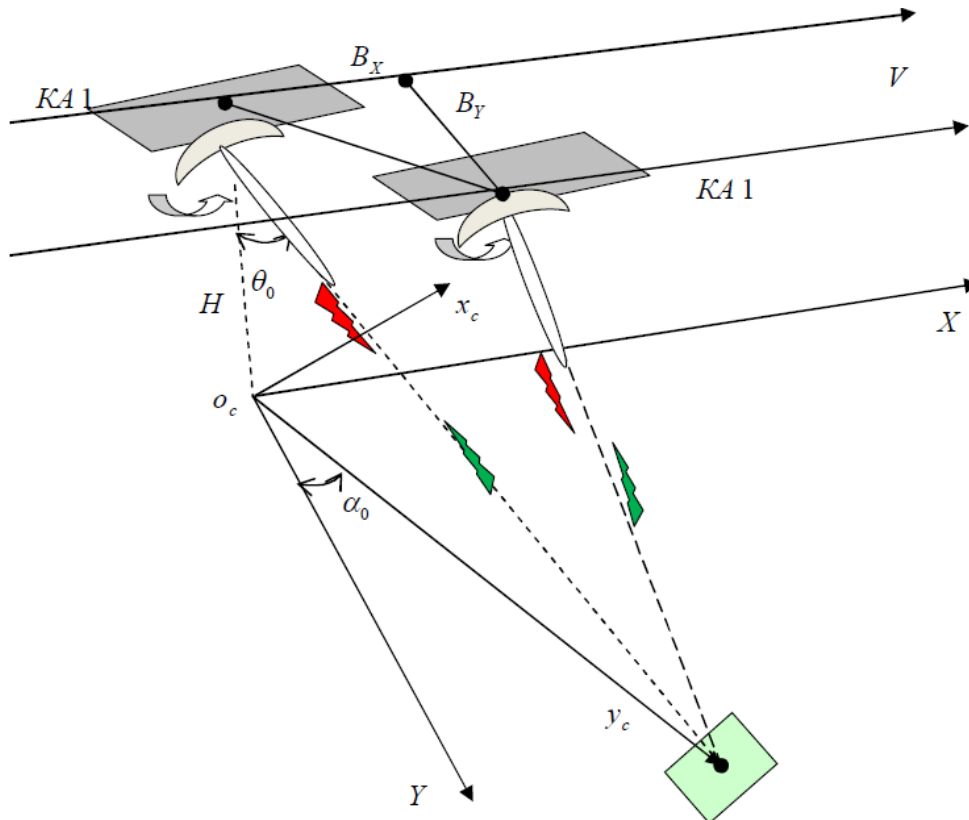


Рис. 1. Геометрическая схема двухпроходного РСА комплекса

Носитель РСА, летящий на высоте H со скоростью V , начинает наблюдение в момент времени $t = 0$ при угле «скоса» α_0 и угле падения θ_0 .

Наблюдение за выбранным участком земной поверхности производится некоторое время $t = 0 \dots T_c$, определяемое условиями наблюдения и разрешающей способностью (T_c – время синтезирования апертуры антенны), определяемой возможным сектором стабилизации луча на одном участке поверхности.

Для удобства описания в рассмотрение введена система координат синтезирования (СКС), ось $o_c y_c$ которой в начальный момент направлена вдоль проекции луча, проходящего через фазовый центр антенны (ФЦА) и центр участка поверхности, а оси $o_c x_c$, $o_c z_c$ образуют с ней правую ортогональную систему координат.

Учитывая возможности пространственного разрешения импульсно-доплеровских РСА [1–3], облучаемую поверхность удобно разбить на элементы разрешения размером δy по горизонтальной дальности (вдоль оси y_c) и δx в азимутальном направлении (вдоль оси x_c). В данном случае детальному анализу подвергается один элемент

разрешения в центре картографируемого участка земной поверхности с одним точечным отражателем (ТО) в центре этого элемента.

Фокусировка РСА в двух проходах производится относительно отмеченного центра элемента разрешения. Предполагаем, что земная поверхность достаточно ровная и неподвижная, а навигационные данные поступают с точностью достаточной, чтобы считать, что на интервалах синтезирования (ИС) фазовая траектория относительно центра элемента разрешения компенсируется полностью.

Определяющей характеристикой РСА является реакция на сигнал от точечного отражателя [1, 2], которую называют сигнальной функцией (СФ).

Определим изменение расстояния до этого точечного отражателя на ИС во втором проходе [1, 2] (с учётом компенсации постоянного сдвига по дальности):

$$r^1(x_c, y_c, t) \approx r^0(x_c, y_c, t) - y_c \frac{B_Y \cos(\alpha_0) \cos(\theta_0) \sin(\theta_0)}{R_0} - x_c \frac{B_X \cos(\alpha_0) \sin(\theta_0)}{R_0},$$

а отражённые сигналы запишем следующим образом;

$$s_o(x_c, y_c, t) = A_c \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} r^0(x_c, y_c, t) \right\},$$

$$s_1(x_c, y_c, t) = A_c \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} r^1(x_c, y_c, t) \right\},$$

где $A_c = 1$ – амплитуда переотражения ТО (будем считать неизменной в двух проходах).

Сигнальную функцию в первом и втором проходе запишем в виде [1–3]:

$$c_0(x_c, y_c) = \int_{\tau=-T_p/2}^{T_p/2} \int_{t=-T_c/2}^{T_c/2} s_o(x, y, t, \tau) h(t, \tau) dt d\tau,$$

$$c_1(x_c, y_c) = c_0(x_c, y_c) \times$$

$$\times \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda R_0} [B_X x_c \cos(\alpha_0) \sin(\theta_0) + B_Y y_c \cos(\alpha_0) \cos(\theta_0) \sin(\theta_0)] \right),$$

где $h(t, \tau)$ – комплексная опорная функция РСА, согласованная с центром элемента разрешения, T_p – период повторения зондирующих импульсов, $T_c = NT_p$, $\delta r = \delta \tau \cdot c/2$ – разрешение по наклонной дальности.

Для установленных допущений, модуль СФ в обоих проходах полностью совпадает, но если их просуммировать в комплексных величинах, получим следующее выражение:

$$c_\Sigma(x_c, y_c) = c_0(x_c, y_c) + c_1(x_c, y_c) =$$

$$2c_0(x_c, y_c) \exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda R_0} [B_X x_c \cos(\alpha_0) \sin(\theta_0) + B_Y y_c \cos(\alpha_0) \cos(\theta_0) \sin(\theta_0)] \right) \times$$

$$\times \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda R_0} [B_X x_c \cos(\alpha_0) \sin(\theta_0) + B_Y y_c \cos(\alpha_0) \cos(\theta_0) \sin(\theta_0)] \right). \quad (1)$$

У суммарной СФ появилась дополнительная амплитудная модуляция, которая более значимо проявляется по мере отклонения от центра элемента разрешения, а значит, влияет на результирующую разрешающую способность.

На рис. 2 представлен трёхмерный вид нормированной СФ в координатах горизонтальная дальность y , азимутальная дальность x (по вертикали). Расчёты проводились в соответствии с формулой (1) с нормировкой по максимальной амплитуде при условии использования импульсного ЛЧМ сигнала, определяемого предельными характеристиками приёмопередающего тракта РСА. Сжатие по дальности и азимуту проводилось без дополнительной весовой обработки. При расчётах использовались следующие значения определяющих параметров: угол падения $\theta_0 \approx 20^\circ$, угол скоса $\alpha_0 \approx 1^\circ$, разрешающая способность $\delta y \approx \delta x \approx 2$ м, высота полёта $H \approx 500$ км, длина волны излучения $\lambda \approx 9$ см.

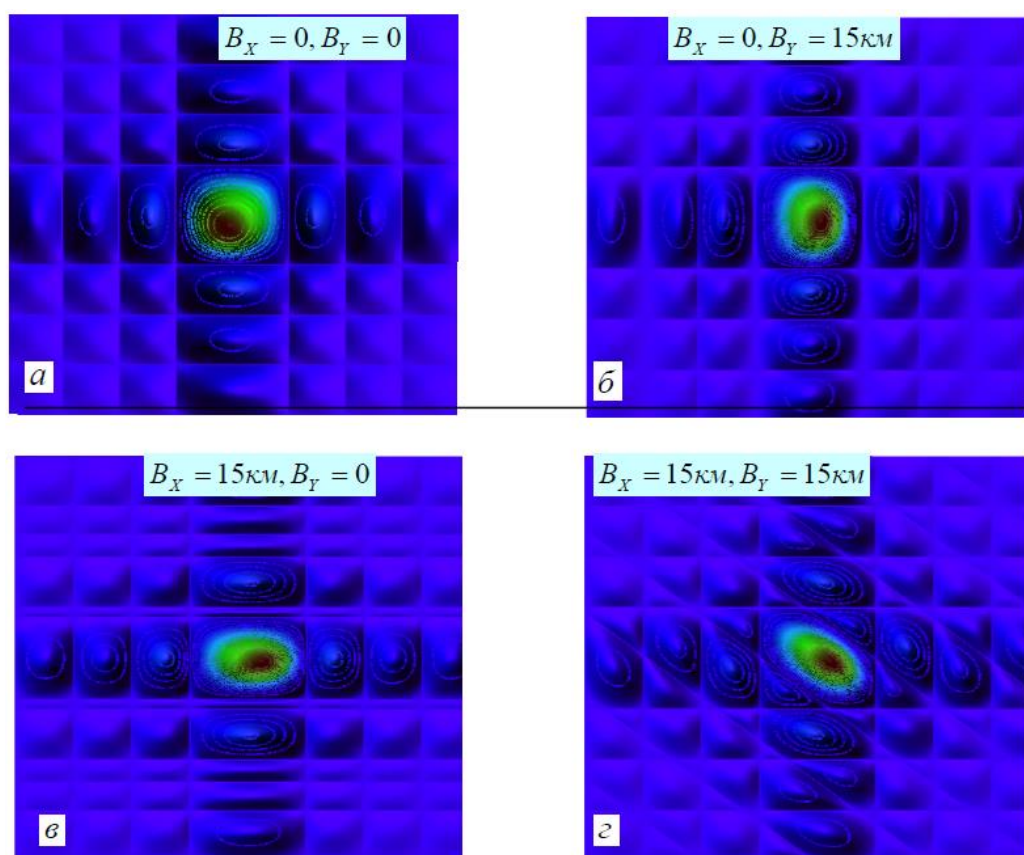


Рис. 2. Сигнальная функция РСА

Рис. 2а характеризует СФ РСА без каких-либо отклонений с одинаковой разрешающей способностью по азимуту и дальности. На рис. 2,б,в,г представлена трансформация сигнальной функции при отклонении второго прохода по дальности B_y , вдоль линии пути B_x и одновременном смещении B_y, B_x .

Видим, что при выбранных параметрах двухпроходного комплекса РСА происходит «сжатие» сигнальной функции приблизительно в 1,5...2 раза сначала по дальности (рис. 2,б), а затем в азимутальном направлении (рис. 2,в). Это говорит о повышении результирующей разрешающей способности двухпроходного комплекса сначала по дальности, а во втором случае по азимуту.

Интересен для анализа вариант одновременного сдвига B_Y, B_X (рис. 2,г). В этом случае ортогональные «срезы» по дальности и азимуту действительно «сжались» в 1,5...2 раза, но сигнальная функция «развернулась» таким образом, что площадь главного лепестка сигнальной функции практически не изменилась по сравнению с рис. 2,в. Это объясняется перекрёстным влиянием ортогональных отклонений x, y на фазовые соотношения (1).

Влияние ошибок совмещения и выбор базовых параметров

До сих пор допускалась ситуация «идеальной» навигационной поддержки многопроходного комплекса РСА и исследовалась возможность повышения детальности радиолокационного изображения. Реально сопряжение с высокой точностью двух изображений, полученных в разных проходах, является непростой задачей, требующей использование современных систем позиционирования и синхронизации [3, 4].

Хотелось бы оценить тот допустимый предел ошибки сопряжения по координатам $\Delta x_c, \Delta y_c$, при котором не теряется эффект повышения детализации изображения.

Эта ошибка совмещения фактически переходит с определённым коэффициентом в дополнительный фазовый сдвиг выражения (1). До некоторых пор это приводит к незначительному перераспределению боковых лепестков, затем к искажению главного лепестка СФ и, наконец, к полному разрушению. На рис. 3,4 представлены эти этапы (до разрушения). На рис. 3,а представлена суммарная СФ с повышением детальности по дальности, без каких-либо мешающих сдвигов. Далее, на рис. 3,б, та же функция но с относительным сдвигом по горизонтальной дальности в четверть элемента исходного (одиночного) РЛИ. Серьёзных искажений не наблюдается. А вот при сдвиге почти в половину разрешающей способности видим значительные искажения, в том числе главного лепестка СФ.

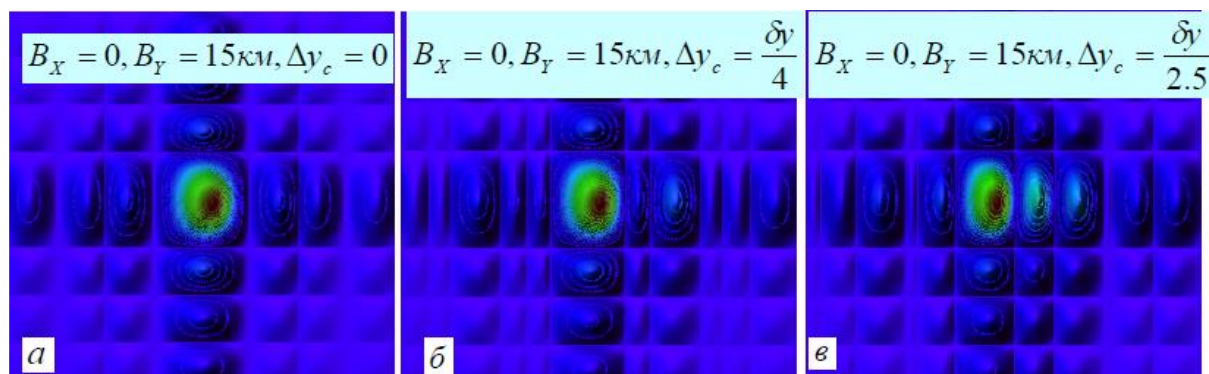


Рис. 3. Искажение сигнальной функции РСА при сдвиге по дальности

Подобная картина наблюдается при повышении разрешения по азимуту (рис. 4,а,б,в). Сдвиг в четверть разрешения по азимуту приводит к искажениям на уровне боковых лепестков (рис. 4,б), а сдвиг, близкий к половине элемента разрешения, провоцирует недопустимые искажения.

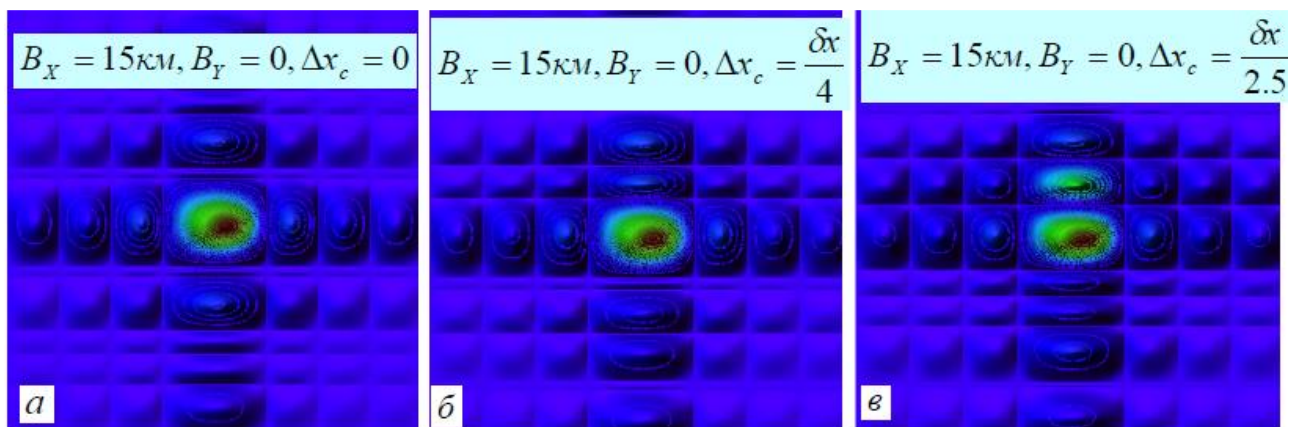


Рис. 4. Искажение сигнальной функции PCA при сдвиге по азимуту

Таким образом, для повышения детальности РЛИ с помощью многопроходного комплекса PCA сопряжение должно производиться с точностью $\Delta x_c \approx \frac{\delta x}{4 \dots 8}, \Delta y_c \approx \frac{\delta y}{4 \dots 8}$.

При разрешении исходного изображения 1...2 м, точность сопряжения должна быть 10...20 см.

В нашем случае, необходимо выполнить ещё одно требование: обеспечить корреляцию парных сигналов за счёт корректного выбора смещений носителя (носителей) B_Y, B_X .

Нормированный коэффициент пространственной корреляции (КПК), характеризующий относительные изменения парных сигналов, можно найти, используя известные определения [1, 2, 4]:

$$r_e = \overline{e_{mn}^0 e_{mn}^{1*}} / D_e,$$

где e_{mn}^0, e_{mn}^1 – элементы комплексного коэффициента рассеяния разрешаемой площадки поверхности для разных проходов; D_e – дисперсия коэффициента рассеяния, между комплексными коэффициентами рассеяния одного элемента поверхности для разных проходов; $\overline{}$ – математическая операция усреднения.

В общем случае для ровной поверхности, в предположении высокой степени «прямоугольности» импульса и низкого уровня боковых лепестков, нормированный коэффициент пространственной корреляции можно найти следующим образом [4, 5]:

$$r_e \approx \frac{\sin(2\pi B_Y \cos(\alpha_0) \sin(\theta_0) \cos(\theta_0) \delta y / (\lambda R_0)) \sin(2\pi B_X \cos(\alpha_0) \sin(\theta_0) \delta x / (\lambda R_0))}{(2\pi B_Y \cos(\alpha_0) \sin(\theta_0) \cos(\theta_0) \delta y / (\lambda R_0)) (2\pi B_X \cos(\alpha_0) \sin(\theta_0) \delta x / (\lambda R_0))},$$

При $\lambda = 9$ см, $H = 500$ км, $\theta = 20^\circ$, $\alpha_0 = 1^\circ$, $B_Y = 15$ км, $B_X = 0$ км, $\delta r \approx 2$ м имеем $r_e \approx 0,75$.

Если $B_Y = 0$ км, $B_X = 15$ км, получаем $r_e \approx 0,7$.

При одновременном отклонении: $B_Y = 15$ км, $B_X = 15$ км, $r_e \approx 0,5$.

Можно сказать, что только в третьем случае декорреляция парных сигналов превышает допустимый предел.

Экспериментальная проверка работоспособности

На рис. 5 представлена иллюстрация возможности повышения детальности и снижения когерентного спекл-шума РЛИ по информации двух проходов на примере наблюдения за гористым районом местности с помощью космического РСА комплекса «Кондор-Э».

Приведены два фрагмента с потенциальной разрешающей способностью: $\delta y \approx \delta x \approx 2$ м (слева) и результат совместной обработки сигналов двух проходов одного КА. Повторный проход над тем же участком местности производился через 16 дней со смещением по наклонной дальности на 9 км, так что поперечное смещение составило $B_y \approx 15$ км, а продольное – $B_x \approx 8$ км.

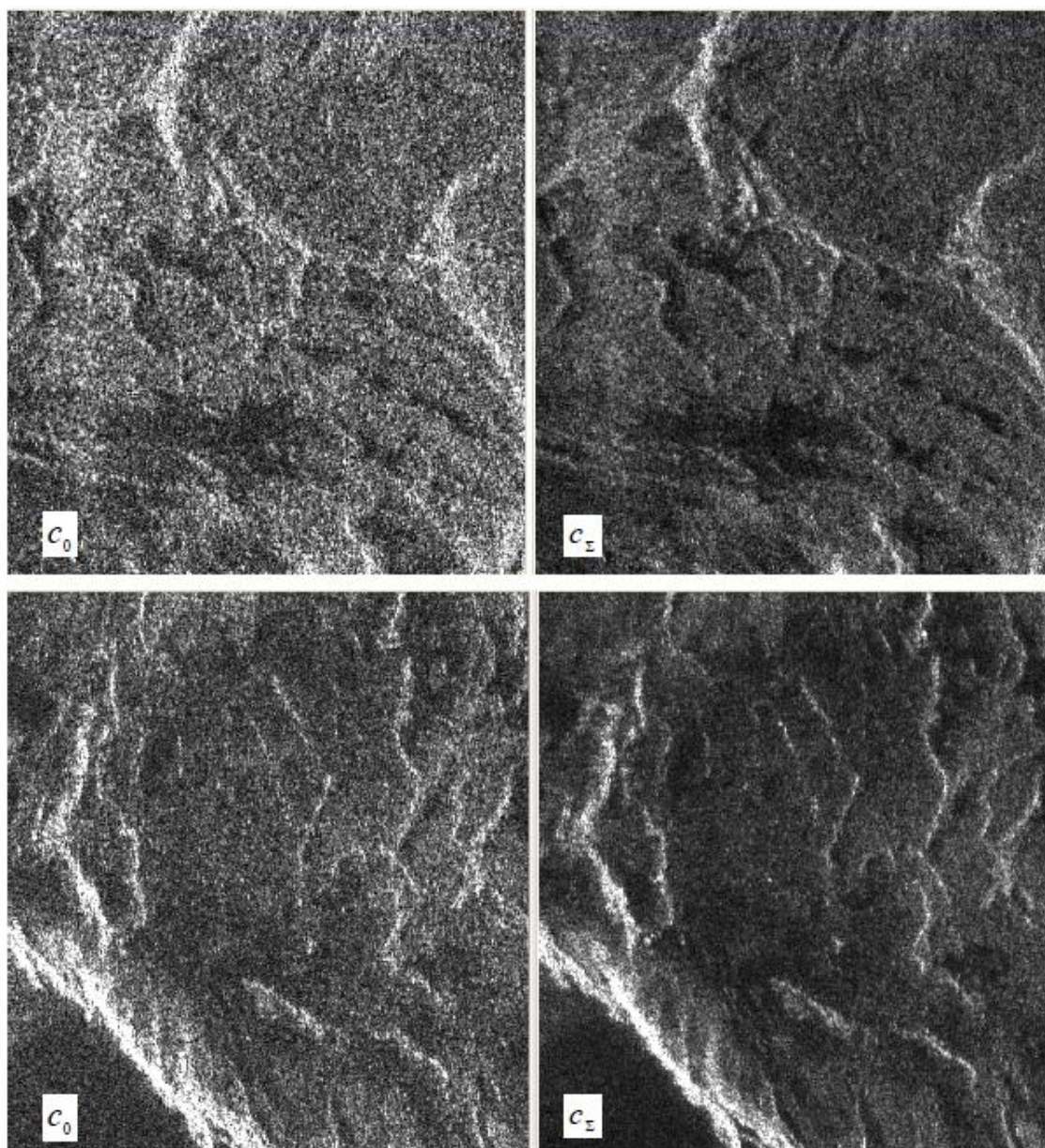


Рис. 5. Иллюстрация возможности повышения детальности РЛИ

Следует отметить, что гористая местность – не лучший объект для исследования детальности РЛИ, поскольку местный рельеф и его изменения заметно влияют на точность совмещения парных сигналов. Однако можем заметить, что даже в этом случае по всем двум фрагментам пространственная разрешающая способность заметно

(в 1,5...2 раза) повысилась, и значительно понизился уровень когерентного спекл-шума.

Заключение

Таким образом, в работе обоснована модель сигнала многопроходной РСА, получено выражение суммарной сигнальной функции, характеризующее пространственное разрешение комплекса, оценено влияние ошибок относительного совмещения и ограничение на выбор базового параметра. Полученные результаты справедливы и применимы для варианта нескольких (не менее двух) КА с РСА с темпом возобновления активного зондирования от единиц минут до нескольких часов.

Для варианта бистатического картографирования во всех представляемых обоснованиях и определяющих выражениях необходимо учесть пространственную односторонность, а в остальном результаты могут быть обобщены, тем более, что парные сигналы будут формироваться одновременно [3].

Все представляемые характеристики (1,5...2-х кратное повышение пространственного разрешения по дальности или азимуту) подтверждено результатами математического моделирования, а также экспериментальной отработкой по сигналам двухпроходного радиолокационного комплекса с РСА.

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.
2. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В.Н. Антипов, В.Т. Горяинов, А.Н. Кулин и др.; Под ред. В.Т. Горяинова. – М.: Радио и связь, 1988.
3. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под общей ред. В.С. Вербы – М.: Радиотехника, 2010.
4. Capella X-SAR – Satellite Missions-eoPortal Directory.
5. Бабокин М.И. Алгоритмы оценки относительного рельефа местности в многопозиционных комплексах РСА // Радиотехника. 2009. № 7.