

Радиолокационные и радионавигационные системы

DOI 10.24412/2221-2574-2022-1-5-13

УДК 621.396: 528.835

КОСМИЧЕСКИЕ РСА-ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ ДЕТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ С ОДНОВРЕМЕННЫМ ФОРМИРОВАНИЕМ ПАРНЫХ СИГНАЛОВ

Бабокин Михаил Иванович

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник АО «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В.В. Тихомирова»¹.

E-mail: m.baboki57@mail.ru

Костюк Евгений Александрович

кандидат технических наук, начальник отдела научного центра оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы»².

E-mail: kostiuk@inbox.ru

Бадак Любава Александровна

начальник сектора научного центра оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы»².

E-mail: badak_la@ntsomz.ru

Стёпин Виталий Георгиевич

старший инженер АО «Научно-исследовательский институт приборостроения имени В.В. Тихомирова»¹.

E-mail: vitalii.stepin@mail.ru

¹Адрес: 140180, Российская Федерация, Московская обл., г. Жуковский, ул. Гагарина, д. 3.

²Адрес: 127490, Российская Федерация, Москва, ул. Декабристов, вл. 51, стр. 25.

Аннотация: Рассмотрены особенности построения и основные характеристики интерферометров детальной оценки относительного рельефа местности на базе космических радиолокаторов с синтезированием апертуры антенны (РСА) с одновременным формированием парных сигналов, работающих в режимах бистатического и скошенного однопроходного обзора. Определена достижимая точность измерения рельефа местности, условия функционирования и требования к информационному обеспечению. Обоснован выбор оптимального значения базового параметра космического интерферометра на основе минимизации ошибки измерения рельефа. Показано, что потенциальная точность оценивания рельефа может достигать 1..2 м при использовании двух РСА в бистатическом режиме и 3..8 м при применении одного РСА в скошенном режиме.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой антенны, РСА, интерферометрическая обработка, земная поверхность, местный рельеф, отражённый сигнал.

Введение

В современных комплексах ДЗЗ интерферометрический мониторинг земной поверхности рассматривается как один из основных способов целевого применения, существенным образом увеличивающий их информативность за

счёт использования фазы отражённого сигнала, как носителя полезной информации [1–3].

Во многих случаях целью проведения оперативной и долговременной интерферометрической съёмки является получение детальных цифровых моделей рельефа (ЦМР) местности.

Известны способы многопроходной интерферометрии или однопроходные с несколькими космическими аппаратами (КА) на орбите [1–3], но они подвержены влиянию временной декорреляции парных сигналов РСА-интерферометров, что значительно снижает их эффективность.

Наиболее изученным и перспективным способом оценивания рельефа местности является бистатический, предусматривающий одновременный приём отражённого сигнала на две разнесённые в пространстве самостоятельные антенны. Расстояние между двумя КА образует интерферометрическую базу, величина которой выбирается в интервале от сотен метров до нескольких километров. Достоинство данного варианта — большое и в широких пределах изменяемое значение базы, оперативность и высокая точность интерферометрических измерений, отсутствие временной декорреляции парных отражений. Недостатки — необходимость поддержания группировки на согласованных орбитах, необходимость точного

измерения взаимного положения КА и использования линии синхронизации работы радиолокаторов.

Другой способ построения одновременного РСА интерферометра реализуется при многосеансной съёмке с применением одного КА с РСА при скошенном обзоре. В этом режиме изображение одного участка поверхности Земли формируется несколько раз в пределах одного рабочего участка орбиты. Кроме достоинств, указанных выше, приём сигналов на одном борту КА с РСА позволяет значительно снизить требования к навигационному обеспечению и синхронизации, что в ряде случаев имеет принципиальное значение. Обеспечение гибкости наземной обработки данных также позволяет использовать переменную интерферометрическую базу и реализовать несколько циклов формирования ЦМР с последующим их усреднением и уточнением. К недостаткам этого способа можно отнести ограниченную точность оценивания и усложнение алгоритмов обработки сигналов при скошенном обзоре.

Целью работы является сравнительный анализ способов построения космических РСА интерферометров с одновременным формированием парных сигналов, обладающих максимальной оперативностью и помехозащищённостью.

Бистатический интерферометр

На рис. 1 представлена геометрическая схема двухпозиционного бистатического комплекса РСА. Два носителя РСА движутся в одну сторону с постоянным пространственным смещением $B = \sqrt{B_X^2 + B_Y^2 + B_Z^2}$, где B_X, B_Y, B_Z — смещение второго носителя по координатам X, Y, Z . Один РСА облучает участок земной поверхности, а оба практически одновременно принимают отражённый от поверхности сигнал. Оба радиолокатора работают в когерентном импульсном режиме при боковом обзоре с применением внутриимпульсной модуляции (ЛЧМ, ФКМ). На рис. 1 представлен частный

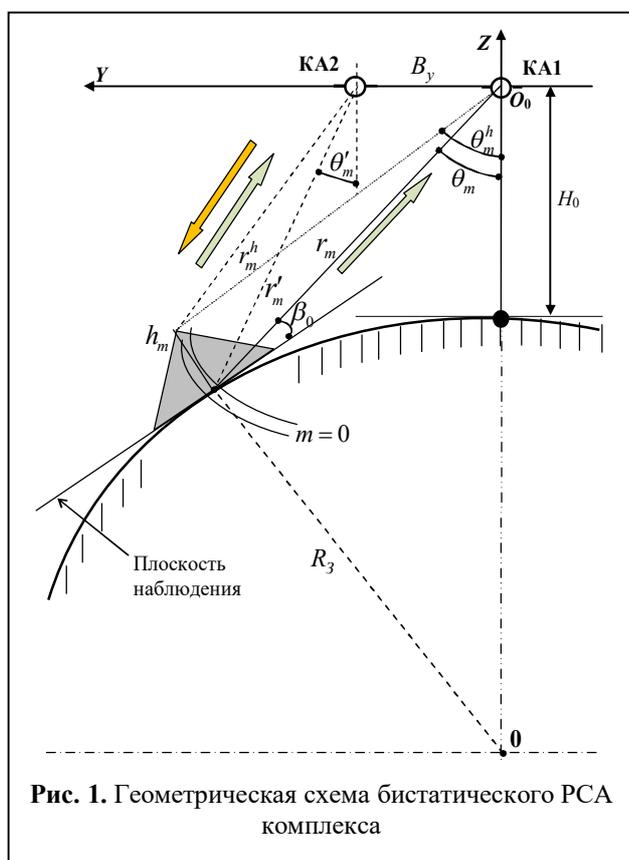


Рис. 1. Геометрическая схема бистатического РСА комплекса

случай бистатической съёмки, когда ось O_0X перпендикулярна плоскости рисунка, КА2 расположен на оси O_0Y , а база интерферометра $B = B_Y$.

Для малых интервалов времени ($t \leq 10$ с) с учётом плавности траектории и ориентации оси O_0X вдоль вектора путевой скорости W КА можем записать, что

$$x_{цм}(t) \approx Wt, y_{цм}(t) \approx \frac{1}{2}a_{y0}t^2, z_{цм}(t) \approx H_0 + \frac{1}{2}a_{z0}t^2,$$

где a_{y0} и a_{z0} — значения линейных ускорений вдоль осей O_0Y и O_0Z , H_0 — высота орбиты над поверхностью Земли в начальный момент времени,

$$W \approx \sqrt{(V_{орб} - V_{зэ} \cos(\gamma_0))^2 + 0,5V_{зэ}^2 \sin^2(\gamma_0)}$$

— путевая скорость, $V_{зэ}$ — скорость вращения

Земли на экваторе, $V_{орб} = \sqrt{\frac{f_M}{R_{КА}}}$ — орбитальная

скорость, $f_M = 398\,600 \text{ км}^3 \text{ с}^{-2}$ — геодезическая гравитационная постоянная, γ_0 — угол наклона орбиты.

В представленном на рис. 1 случае изменение текущего расстояния до m -ой полосы дальности в элемент разрешения исследуемого участка ровной поверхности определяется следующим образом:

$$r_m(t) \approx r_m(0) + a_{rm} \frac{t^2}{2}, r'_m(t) \approx r'_m(0) + a_{rm} \frac{t^2}{2},$$

где $r_m(0) = R_3 \frac{\cos(\theta_m + \beta_0)}{\sin \theta_m}$; $r'_m(0) \approx r_m(0) + B_Y \sin \theta_m$;

$$\theta'_m \approx \theta_m + \Delta\theta; \Delta\theta = \frac{B_Y \cos(\theta_m)}{r_m(0)};$$

$\beta_0 = \arccos \left[(1 + H_0/R_3) \sin \theta_0 \right]$ — угол между направлением на КА от центра зоны обзора и плоскостью местного горизонта, $a_{rm} = W^2/r_m$.

Запишем разность, которая несёт информацию о местном рельефе:

$$\Delta r_m(h) = r'_m(h) - r_m(h) \approx$$

$$\approx \Delta r_m^p - h_m \frac{B_Y}{r_m} \left[\cos(\theta_m + \beta_0) \text{ctg}(\theta_m) \right]^2,$$

где $\Delta r_m^p \approx B_Y \frac{R_3}{r_m} \text{ctg}(\theta_m)^2 \cos(\theta_m + \beta_0)$ — разность «ровной» поверхности, $r_m(h) \approx r_m + h \frac{\cos(\theta_m + \beta_0)}{\sin \theta_m}$, $r'_m(h) \approx r'_m + h \frac{\cos(\theta_m + \beta_0)}{\sin(\theta_m + \Delta\theta)}$.

Объект исследования, в данном случае земную поверхность, обоснованно представляют [1, 2] в виде дискретной матрицы функции радиолокационного рельефа, каждый m, n -й элемент которой определяется как среднее от указанной функции на площадке пространственного разбиения размером в элемент разрешения (ЭР).

Для интерферометрических измерений важно знать коэффициент пространственной корреляции (КПК) парных сигналов

$$r_e = \overline{e_{mn}^1 e_{mn}^{2*}} / D_e,$$

где D_e — дисперсия коэффициента рассеяния поверхности.

В условиях высокой «прямоугольности» ЭР и мелкоструктурной однородной земной поверхности без отклонений рельефа для поперечного бистатического интерферометра можно записать

$$r_{em} \approx \int_{m\delta y}^{m\delta y + \delta y} \int_{n\delta x}^{n\delta x + \delta x} e^{j \frac{2\pi}{\lambda} (r_{mn}(x,y) - r'_{mn}(x,y))} dx dy \approx \frac{\sin(w\delta y/2)}{w\delta y/2},$$

где $w = \frac{2\pi B_Y \cos(\theta_m + \beta_0)}{\lambda r_m}$; λ — рабочая длина

волны; $\delta y \approx \frac{\delta r}{\sin(\theta_m + \beta_0)}$ — разрешающая способность по горизонтальной дальности; δr — разрешающая способность по наклонной дальности; δx — разрешающая способность в азимутальном направлении.

Относительные ракурсные искажения парных сигналов РСА КА1 и КА2 можно представить в виде случайной аддитивной гауссовой комплексной помехи с нулевым математиче-

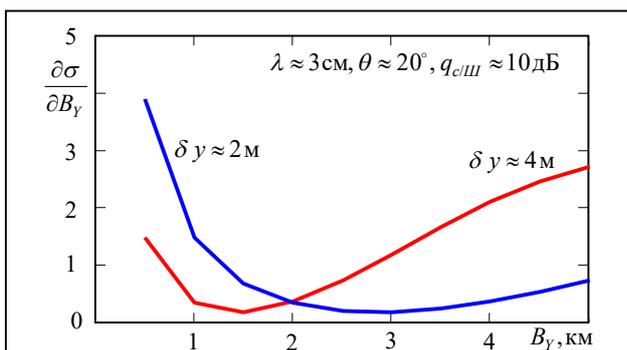


Рис. 2. Оптимальный выбор базового параметра поперечного бистатического интерферометра

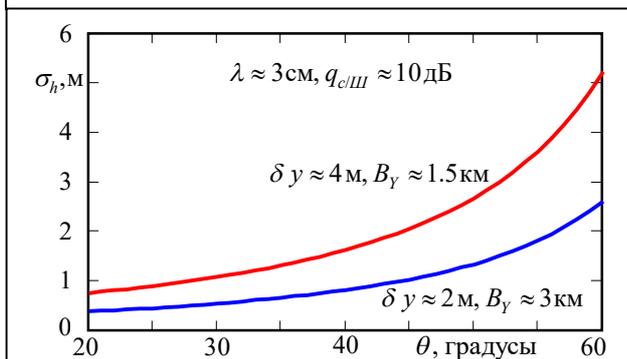


Рис. 3. Зависимость потенциальной точности измерения местного рельефа

ским ожиданием и дисперсией, определяемой выражением: $D_n = (1 - r_e)D_e$.

Ошибка измерения рельефа местности определяется следующим образом [4, 5, 7, 8]:

$$\sigma_h \approx \left(\frac{\lambda R_z \operatorname{tg}(\theta_m)}{2\pi B_Y \cos(\theta_m)} \right) \sqrt{\left(\frac{1}{q_{с/ш}} + (1 - r_e) \right)}, \quad (1)$$

где $q_{с/ш}$ — отношение сигнал/шум после РСА обработки.

Зависимость ошибки измерения от разрешающей способности связана с КПК и отношением сигнал/шум и имеет сложный характер. В частности, чем выше разрешающая способность, тем выше КПК, но и меньше отношение сигнал/шум для однородной мелкоструктурной поверхности. Возникает вопрос оптимизации ошибки оценивания от базового параметра при интерферометрическом измерении местного рельефа.

Попытаемся минимизировать производную среднеквадратической ошибки (СКО) измере-

ния рельефа по величине базы для нахождения оптимального базового параметра

$$\frac{\partial \sigma_h}{\partial B_Y} = \left(3r_e - \frac{\cos(w\delta y/2)}{w\delta y/2} - 2(q_{с/ш} + 1) \right) \rightarrow \min .$$

На рис. 2 представлены зависимости от значения базового параметра производной потенциальной ошибки измерения местного рельефа для двух значений разрешения по дальности $\delta y \approx 2$ м и $\delta y \approx 4$ м. По этим графикам без труда можно определить оптимальные значения базы интерферометра: $B_Y \approx 1,5$ км при $\delta y \approx 4$ м и $B_Y \approx 3$ км при $\delta y \approx 2$ м.

Оценим потенциальную точность измерения местного рельефа при этих оптимальных параметрах базы. Результаты получены с использованием соотношения (1) и представлены на рис. 3. Зависимости дают представление о точности измерения местного рельефа без каких-либо мешающих факторов при отражении от однородной мелкоструктурной поверхности.

При малых углах падения электромагнитных волн (ЭМВ) можно рассчитывать на потенциальную точность измерения (радиолокационную) выше одного метра. При углах падения более $30 \dots 40^\circ$ потенциальная точность довольно резко начинает падать до $3 \dots 6$ метров. Поэтому к выбору базового параметра и условиям наблюдения следует предъявлять особые требования при организации интерферометрической съёмки бистатическим комплексом РСА.

Следует также отметить, что одной из проблем реализации такого комплекса является пространственная декорреляция парных сигналов, вызванная ошибками навигационно-баллистического обеспечения (НБО) на малых временных интервалах, сопоставимых с временем синтеза апертуры антенны.

Можно определить КПК при относительной ошибке знания положения КА1 и КА2 (знание базовой линии), которое выразится в относительном смещении элементов пространственного разрешения:

$$r_e \approx \frac{(\delta y - \Delta y)}{\delta y} \frac{(\delta x - \Delta x)}{\delta x} \frac{\sin(w(\delta y - \Delta y)/2)}{w(\delta y - \Delta y)/2},$$

где Δy — относительное смещение сигналов по земной дальности, Δx — относительное смещение сигналов вдоль линии пути.

Для высокоточного измерения местного рельефа целесообразно ставить вопрос об ошибке НБО по двум координатам $\Delta x \leq 5$ см, $\Delta y \leq 5$ см. Отсюда получаем, что погрешность временной синхронизации двух бортов должна соответствовать величине $\Delta t \leq \frac{\Delta x}{V} = \frac{0,05}{7500} \approx 6 \cdot 10^{-6}$ с.

Очевидно, что для обеспечения требуемой точности знания относительного положения и временной привязки двух приёмных КА с РСА необходимо применять дополнительные меры с привлечением высокоточных дальномеров или систем комплексирования, фильтрации дифференциального и относительного фазоразностного позиционирования [4].

Однопроходный интерферометр при скошенном обзоре

На рис. 4 представлена геометрическая схема однопроходного РСА космического интерферометра скошенного обзора. Пространственное смещение обеспечивается за счёт естественного перемещения КА при отклонённом на угол α_0 вперед (назад) луче. Через определённый интервал $B = WT_0$ второй сеанс картографирования определённого участка поверхности возобновляется. Во втором сеансе наблюдения значения углов β_0, θ_m практически не изменяются. Чтобы формирование парного сигнала происходило без ощутимой для интерферометра задержки, интервал T_0 выбирается менее четверти интервала синтеза, т.е. $T_0 < T_c/4$, где T_c — время синтеза.

В представленном на рис. 4 случае изменение текущего расстояния от ФЦА РСА до m -ой

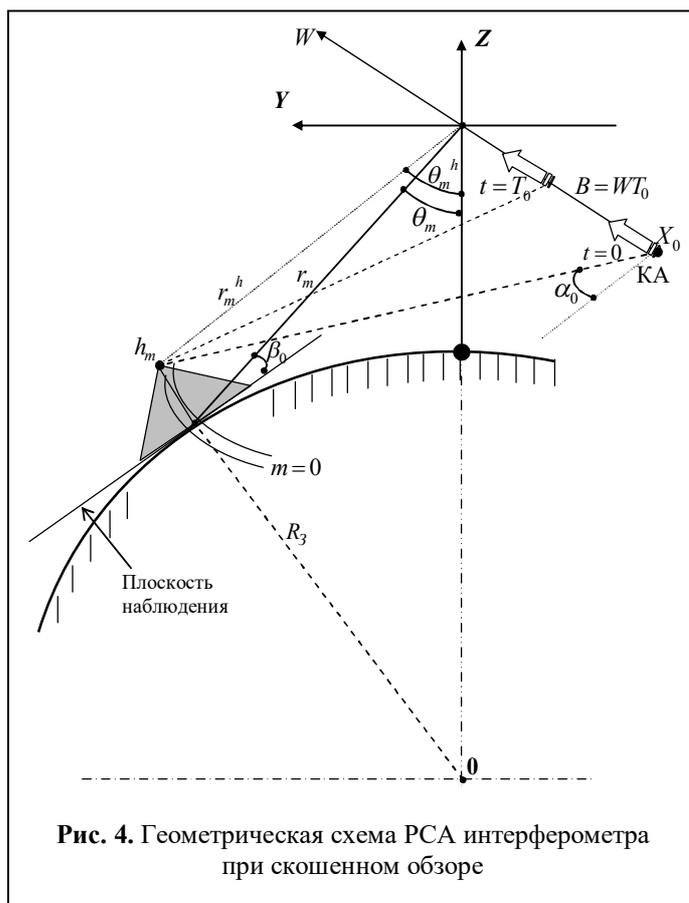


Рис. 4. Геометрическая схема РСА интерферометра при скошенном обзоре

полоски разрешения исследуемого участка ровной поверхности определяется следующим образом:

$$r_m(t) \approx r_m + \frac{X_0}{2} \operatorname{tg}(\alpha_0) - \operatorname{tg}(\alpha_0)Wt + \frac{W^2}{2r_m} t^2,$$

$$\text{где } r_m = R_3 \frac{\cos(\theta_m + \beta_0)}{\sin \theta_m}.$$

Рельеф местности влияет на текущее расстояние следующим образом:

$$r_m^h(t) \approx r_m(t) + h_m \cos(\theta_m + \beta_0) + h_m \frac{X_0^2}{2R_3} + h_m \frac{W}{R_3} \operatorname{tg}(\alpha_0)t.$$

При отклонении местного рельефа в парных сигналах формируется не только постоянный фазовый сдвиг:

$$\delta\varphi(h) \approx \frac{4\pi}{\lambda} \left(h_m \cos(\theta_m + \beta_0) + h_m \frac{X_0^2}{2R_3} \right),$$

но и линейное фазовое смещение:

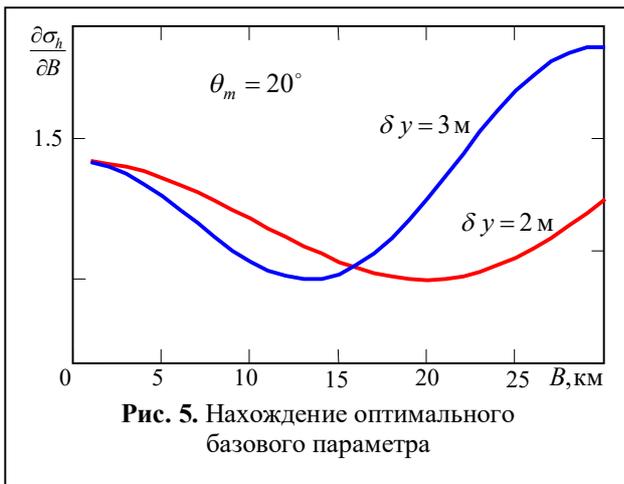


Рис. 5. Нахождение оптимального базового параметра

$$\delta\varphi(h, t) \approx \frac{4\pi}{\lambda} h_m \frac{W}{R_3} \operatorname{tg}(\alpha_0) t.$$

Именно это линейное отклонение дальности позволяет проводить при скошенном обзоре интерферометрические измерения местного рельефа с помощью одного РСА одного КА.

Следует также отметить, что в этом случае фазовое отклонение обеспечивается как в прямом (при излучении), так и в обратном (на приём) распространении ЭМВ, по сравнению с бистатистическим вариантом.

Парные сигналы, полученные в разных сеансах наблюдения, перед формированием интерферометрических пар, должны быть искусственно «приведены» к одному моменту времени. Техника синтезирования апертуры антенны позволяет производить подобное приведение через фазовую коррекцию после синтезирования апертуры антенны и получения пары комплексных изображений. Сеансы наблю-

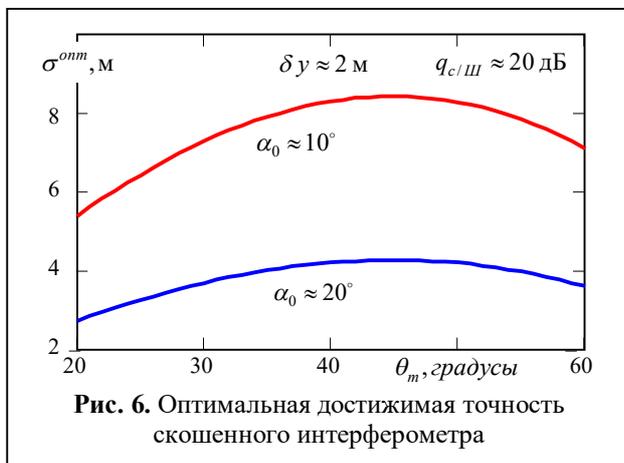


Рис. 6. Оптимальная достижимая точность скошенного интерферометра

дения следуют со сдвигом, размер которого значительно меньше самого интервала синтезирования, что обеспечивает практически одновременное формирование парных сигналов.

При этом обеспечивается высокая степень корреляции, которую можно оценить через КПК парных сигналов:

$$r_e \approx \frac{\sin(\pi B \sin(\alpha_0) \cos(\beta_0) \delta x / (\lambda R_0))}{\pi B \sin(\alpha_0) \cos(\beta_0) \delta x / (\lambda R_0)} \times \frac{\sin(\pi B \cos(\alpha_0) \cos(\beta_0) \delta y / (\lambda r_m))}{\pi B \cos(\alpha_0) \cos(\beta_0) \delta y / (\lambda r_m)}.$$

Рассмотрим достижимую точность измерения относительного рельефа местности однопроходного скошенного интерферометра [12, 13]:

$$\sigma_h \approx \frac{(\lambda R_3)}{(2\pi B \operatorname{tg}(\alpha_0))} \sqrt{\left(\frac{1}{q_{c/ш}} + \frac{(1-r_e)}{2}\right)}.$$

Выбор базового параметра интерферометра связан с вопросом оптимизации:

$$\frac{\partial \sigma_h}{\partial B} = \left(-\frac{1}{2} (r_e - \cos(wB)) - \frac{1}{q_{c/ш}} \right) \rightarrow \min,$$

где $w = \frac{\pi \cos(\alpha_0) \cos(\beta_0) \delta y}{\lambda r_m}$.

На рис. 5 представлены зависимости производной достижимой точности по величине базы для разного разрешения.

Анализ оптимального по точности базового параметра показывает, что по значению он близок к базовому параметру при $r_e \approx 0.7$, поэтому можно использовать для определения оптимальной достижимой точности следующее выражение:

$$\sigma^{onm} \approx \frac{(\lambda R_3)}{(2\pi B^{onm} \operatorname{tg}(\alpha_0))} \sqrt{\left(\frac{1}{q_{c/ш}} + 0,15\right)} \approx \frac{\delta y \sin(\theta) \cos(\beta_0)}{\pi \cos(\theta + \beta_0) \sin(\alpha_0)} \sqrt{\left(\frac{1}{q_{c/ш}} + 0,15\right)}$$

при $B^{onm} \approx \frac{\lambda r_m}{2\delta y \cos(\beta_0) \cos(\alpha_0)}$.

На рис. 6 представлена зависимость оптимальной достижимой точности для скошенного режима от угла визирования. Конечно же,

точность оценки рельефа бистатического интерферометра из двух носителей выше (см. рис. 3).

Однако, простота реализации и отсутствие сверхвысоких требований к навигационному обеспечению, а также возможность возобновления повторных измерений в том же проходе, особенно с переменным базовым параметром, позволяет существенно повысить возможности интерферометра при скошенном обзоре, в том числе и точность измерения.

Заключение

1. Детальное измерение рельефа местности космическими интерферометрическими комплексами РСА требует новых научных и технических решений для устранения влияния временной и пространственной декорреляцией парных сигналов, которые ограничивают возможности современных систем дистанционного зондирования Земли.
2. Одним из возможных путей дальнейшего развития является разработка комплексов РСА с одновременным формированием парных сигналов. В работе рассмотрены особенности построения и основные характеристики интерферометра бистатического и однопроходного со скошенным обзором с одновременным формированием парных сигналов.
3. Обоснована достижимая точность, проведена оптимизация базовых параметров, обоснованы требования к информационному обеспечению, отмечены достоинства и недостатки РСА интерферометров.

Литература

1. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений: учебник для курсантов ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского. / Под ред. Л.А. Школьного. М.: изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. 530 с.
2. TerraSAR-X Ground Segment. Cluster Applied Remote Sensing. Basic Product Specification Document // DLR, Germany. 2008. TX-GS-DD-3302_Basic-Product-Specification-Document_1.5.pdf.
3. TerraSAR-X Ground Segment. Cluster Applied Remote Sensing. Level 1b Product Format Spec-

ification // DLR, Germany. 2008. TX-GS-DD-3307.030201_Level-1b Product Format Specification.pdf.

4. Zin M., Krieger G., Fiedler H., Moreira A. The TanDEM-X Mission Concept // Proc. of EU-SAR'2008, Friedrichshafen, Germany. June 2–5, 2008. Vol.4. Pp. 31–34.
5. Rodriguez-Cassola M., Prats P., Schulze D., et al. First Bistatic Spaceborne SAR Experiments With TanDEM-X // IEEE Geoscience and remote sensing letters. 2012. Vol. 9. No. 1. Pp. 33–37.
6. Бабокин М.И. Оценка топографического рельефа местности в РСА при переднебоковом обзоре // Цифровая обработка сигналов в РСА / Под ред. Е.Ф. Толстова. Смоленск: ВА ВПВО ВС РФ, 2005. С. 171–181.
7. Бабокин М.И. Алгоритмы оценки относительного рельефа местности в многопозиционных комплексах РСА // Радиотехника. 2009. №7. С. 51–58.
8. Бабокин М.И. Точность измерения относительного рельефа земной поверхности в многопозиционных комплексах РСА // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. № 10. С. 65–72.
9. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Карпов О.А., Тутов М.П. Однопроходный интерферометр при переднебоковом обзоре // Радиотехника. 2014. №7. С. 16–20.
10. Calabrese D. Acquisition of SAR images for computing a height or digital elevation model by interferometric processing. EP2535735A1, 19.12.2012 Bulletin 2012/51. 28 p.
11. Min-Ho Ka, Shimkin P.E., Baskakov A.I., Babokin M.I. A new Single-Pass SAR Interferometer Technique with a Single-Antenna for Terrain Height Measurements // Remote Sens. 2019 11(9), 1070; doi:10.3390/rs 11091070.
12. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Зайцев С.Э., Карпов О.А., Савосин Г.В., Тутов М.П., Толстов Е.Ф., Турук В.Э., Цветков О.Е. Космический аппарат «Кондор-Э» и его возможности // Исследование Земли из космоса. 2017. №3. С. 85–95.
13. Бабокин М.И., Ефимов А.В., Костюк Е.А., Ракутин А.В. Перспективы интерферометрической оценки рельефа местности космическим комплексом «Кондор-ФКА» // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2017. № 3 (27). С. 4–16.
14. Бадак Л.А., Костюк Е.А., Бабокин М.И. Оптимальная оценка высоты рельефа местности по критерию максимального правдоподобия с помощью однопроходного РСА-интерферометра скошенного обзора // XIII Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» (25-27 ноября 2019 г., Москва). Сборник трудов. М.: ИПЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2019. С. 113–117.

Поступила 14 ноября 2021 г.

English

SPACE SAR INTERFEROMETERS FOR DETAILED TERRAIN ASSESSMENT WITH SIMULTANEOUS GENERATION OF PAIRED SIGNALS

Mikhail Ivanovich Babokin — Grand Dr. in Engineering, Leading Research Associate, JSC “RIIE named after V.V. Tikhomirov”¹.

E-mail: m.baboki57@mail.ru

Evgeny Alexandrovich Kostyuk — PhD, Head of the Department of the Scientific Center for Operational Monitoring of the Earth, JSC «Russian Space Systems»².

E-mail: kostiuk@inbox.ru

Lyubava Alexandrovna Badak — Head of the Sector of the Scientific Center for Operational Monitoring of the Earth, JSC «Russian Space Systems»².

E-mail: badak_la@ntsomz.ru

Vitaly Georgievich Stepin — Senior Engineer, JSC “RIIE named after V.V. Tikhomirov”¹.

E-mail: vitalii.stepin@mail.ru

¹Address: 140180, Russian Federation, Moscow region, Zhukovsky, Gagarin st., 3.

²Address: 127490, Russian Federation, Moscow, Dekabristov st., estate 51, building 25.

Abstract: Operational or long-term interferometric shooting using SAR (synthesized antenna aperture radar) enables to obtain detailed DTM (digital terrain models) and yet currently vastly used methods for multi-pass interferometry with a single space vehicle or single-pass interferometry with multiple space vehicles are subject to temporal decorrelation of interferometers' paired signals, which drastically reduces their efficiency. Thus it is advisable to ensure simultaneous generation of interferometer paired signals. The best investigated and promising method of terrain evaluation is the bistatic one, which enables simultaneous reception of reflected signal by two spaced-apart independent antennas. Another way to construct a simultaneous SAR interferometer is performed via multisession shooting using a single space vehicle with SAR in squint survey. The paper is aimed at comparative analysis of two methods for constructing space SAR interferometers with simultaneous generation of paired signals that have maximum efficient response and noise immunity. To solve the problem there were thoroughly reviewed bistatic and squint single-pass survey modes; there were obtained relations to calculate the mean square error for measuring relative terrain height and there was performed improvement for selecting interferometer base in regard to enhance measurement accuracy. An example for calculation of 500 km orbit altitude of space vehicle and SAR operating in X-band with spatial resolution of 2...4 m is considered. Optimal values were defined for the base: they are in the range of 1.5...3 km for lateral bistatic interferometer, and they are in the range of 13...20 km in case of single-pass interferometer in squint survey mode. Calculation results have also demonstrated that potential terrain evaluation accuracy depends on viewing angle and may be up to 1...2 m when using two SAR in bistatic mode and up to 3...8 m when using one SAR in squint mode. The analysis made it clear that squint single-pass survey mode comes short of DTM measurement accuracy compared to bistatic survey mode. Implementation simplicity, low-level requirements for navigational support, possibility to resume repetitive measurements during the same pass are among advantages of single-pass SAR interferometer in squint survey.

Keywords: synthetic aperture radar, SAR, interferometric processing, ground surface, local topography, reflected signal.

References

1. Radar systems of aerial reconnaissance, decoding of radar images: a textbook for cadets of the VVIA named after Professor N.Ye. Zhukovsky. *L.A. Shkolny*, et al. Moscow: VVIA named after Professor N.Ye. Zhukovsky, 2008. 530 p.
2. TerraSAR-X Ground Segment. Cluster Applied Remote Sensing. Basic Product Specification Document. DLR, Germany. 2008. TX-GS-DD-3302_Basic-Product-Specification-Document_1.5.pdf.
3. TerraSAR-X Ground Segment. Cluster Applied Remote Sensing. Level 1b Product Format Specification. DLR, Germany. 2008. TX-GS-DD-3307. 030201_Level-1b Product Format Specification.pdf.

4. *Zin M., Krieger G., Fiedler H., Moreira A.* The TanDEM-X Mission Concept. Proc. of EUSAR'2008, Friedrichshafen, Germany. June 2-5, 2008. Vol.4. Pp. 31–34.
5. *Rodriguez-Cassola M., Prats P., Schulze D., et al.* First Bistatic Spaceborne SAR Experiments With TanDEM-X. IEEE Geoscience and remote sensing letters. 2012. Vol. 9. No. 1. Pp. 33–37.
6. *Babokin M.I.* Estimation of the topographic relief of the terrain in SAR with anterolateral view. Digital signal processing in SAR / Ed. by *E.F. Tolstov*. Smolensk: Publisher MA MAD AF RF, 2005. Pp. 171–181.
7. *Babokin M.I.* Algorithms for estimation of the relative topography in multi-position SAR complexes. Moscow: Radioengineering, 2009. No.7. Pp. 51–58.
8. *Babokin M.I.* Accuracy of measuring the relative relief of the earth's surface in multi-position SAR complexes. Information-measuring and control systems. 2009. No. 10. Pp. 65–72.
9. *Babokin M.I., Efimov A.V., Karpov O.A., Titov M.P.* Single-pass interferometer for anterolateral view. Radioengineering. 2014. No. 7. Pp. 16–20.
10. *Calabrese D.* Acquisition of SAR images for computing a height or digital elevation model by interferometric processing. – EP2535735A1, 19.12.2012 Bulletin 2012/51. 28 p.
11. *Min-Ho Ka, Shimkin P.E., Baskakov A.I., Babokin M.I.* A new Single-Pass SAR Interferometer Technique with a Single-Antenna for Terrain Height Measurements. Remote Sens. 2019 11(9), 1070; doi:10.3390/rs 11091070.
12. *Babokin M.I., Efimov A.V., Zaitsev S.E., Karpov O.A., Savosin G.V., Titov M.P., Tolstov E.F., Turuk V.E., Tsvetkov O.E.* Spacecraft "Kondor-E" and its capabilities. Exploration of the Earth from space. 2017. No. 3. Pp. 85–95.
13. *Babokin M.I., Efimov A.V., Kostyuk E.A., Rakitin A.V.* Prospects for interferometric assessment of the terrain by the space complex "Kondor-FKA". Radio and telecommunication systems. 2017. No. 3 (27). Pp. 4–16.
14. *Badak L.A., Kostyuk E.A., Babokin M.I.* Optimal estimation of the height of the terrain by the maximum likelihood method using a single-pass SAR-interferometer in squint mode // Proc. of XIII All-Russian Scientific and Technical Conference "Radar and Radio Communication" (25-27 November 2019, Moscow). Moscow: IRE named after V.A. Kotelnikov RAS, 2019. Pp. 113–117.