

УДК 621.396

Оценка точности восстановления высоты рельефа бистатистическим РСА Р-диапазона для двух вариантов съёмки

Горячкин Олег Валериевич

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретических основ радиотехники и связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ)¹.
E-mail: oleg.goryachkin@gmail.com.

Маслов Иван Владимирович

аспирант кафедры теоретических основ радиотехники и связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ)¹, инженер-конструктор АО «Ракетно-космический центр «Прогресс» (АО «РКЦ «Прогресс»)².
E-mail: macloff@mail.ru.

¹Адрес: 443010, г. Самара, ул. Л.Толстого, д. 23.

²Адрес: 443009, г. Самара, ул. Земеца, 18.

Аннотация: Получение высотных моделей рельефа является одной из важнейших задач развития современных средств дистанционного зондирования Земли. В настоящее время достаточно активно развиваются радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны, как для получения радиолокационных изображений с высоким пространственным разрешением, так и для получения интерферометрической пары изображения для построения рельефа местности. В статье рассматривается возможность применения интерферометрической бистатистической съёмки в Р-диапазоне при конфигурации малый космический аппарат – наземный пункт приёма. Оценивается ошибка определения высоты цели при воздействии аддитивного шума на интерферометрическую разность фаз, без учёта влияния атмосферы (ионосферы), при двух вариантах съёмки: однопроходной и двухпроходной. Дается количественное сравнение ошибки определения высоты для двух вариантов съёмки при различном удалении цели от наземного пункта приёма. Проводится оценка временной декорреляции при горизонтальном смещении цели. Полученные результаты показывают возможность использования двухпроходной интерферометрической бистатистической съёмки в Р-диапазоне при пролёте малого космического аппарата по близким виткам с приемлемой погрешностью.

Ключевые слова: радиолокация, радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА), радиолокационное изображение, интерферометрия, цифровая модель местности.

Введение

В настоящее время космические радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны являются (РСА) важным и достаточно эффективным инструментом дистанционного зондирования Земли. Одно из главных преимуществ использования радиолокационных систем, по сравнению с оптическими системами, является возможность применения интерферометрической обработки пары радиолокационных изображений, которая наряду с возможностью построения цифровых моделей рельефа (ЦМР) позволяет количественно оценивать важные био- и геофизические параметры Земли. Используя интерферометрическую разность фаз, пары совмещённых когерентных радиолокационных изображений, мож-

но измерить относительную высоту поверхности с высокой точностью.

Сегодня космические радиолокационные системы используют X, C, S и L-диапазоны частот. Повышается интерес к использованию космических радиолокаторов с синтезированной апертурой Р-диапазона для наблюдения подповерхностных, укрытых или замаскированных растительностью объектов, геологического картографирования, измерения биомассы растительности и других приложений. В ближайшие годы (срок запуска 2020 г.) планируется запуск космического РСА Р-диапазона BIOMASS (Европейское космическое агентство) [1].

Одним из вариантов получения радиолокационных изображений может выступать биста-

тический РСА, у которого передатчик расположен на космическом аппарате (КА), а приёмник стационарно на господствующей высоте [2-7].

Бистатический радиолокационный комплекс (БиРЛК) малого космического аппарата «Аист-2Д» (Россия) является первым в истории космического ДЗЗ радиолокационным комплексом, работающим в Р диапазоне частот.

Бортовая аппаратура БиРЛК представляет собой многорежимный импульсный передатчик, обеспечивающий широкую гамму стабильных сигналов на несущей частоте 435 МГц, в полосе до 6 (30) МГц с возможностью перестройки от 1 до 30 МГц. Типы используемых зондирующих сигналов: последовательность прямоугольных импульсов, последовательность ЛЧМ-импульсов, последовательность фазоманипулированных сигналов, кодируемых М-последовательностью.

Бортовая передающая антенна, рис. 1, пред-

ставляет собой антенну Уда-Яги, поляризация – линейная, коэффициент усиления 5 дБ. Наземная стационарная аппаратура представляет собой двухканальный приёмник прямого усиления (до 110 дБ) с цифровой регистрацией квадратурных компонент на частоте до 200 МГц и последующей цифровой обработкой сигналов.

Наземная приёмная антенна «отражённого» канала представляет собой «стек» из двух антенн Уда-Яги, поляризация антенны – круговая, коэффициент усиления антенны отражённого канала 18–20 дБ, прямого – 9 дБ. На рис. 2 и 3 представлены наземные антенны отражённого и прямого каналов, соответственно.

При данных параметрах системы на расстоянии до 20 км в прямой видимости от приёмной позиции обеспечивается чувствительность БиРЛК (σ_0) не хуже минус 20 дБ.

Помимо обычной радиолокационной съёмки местности в БиРЛК возможны различные вари-



Рис. 1. Внешний вид КА «АИСТ-2Д» с антенной БиРЛК



Рис. 2. Внешний вид наземной антенны отражённого канала БиРЛК МКА «АИСТ-2Д», установленной на здании ПГУТИ



Рис. 3. Внешний вид наземной антенны прямого канала БиРЛК МКА «АИСТ-2Д», установленной на здании ПГУТИ

анты интерферометрической съёмки с целью построения и контроля рельефа местности.

В данной работе предпринята попытка количественного сравнения двух вариантов съёмки для получения интерферограммы в Р-диапазоне без учёта влияния ионосферы.

1. Интерферометрическая разность фаз

При бистатической съёмке фазу можно представить в виде двух составляющих, зависящих от пройденного пути, соответственно, от передатчика до цели R_{T_i} и от цели до приёмного пункта R_{R_i} :

$$\varphi_i = \frac{2\pi}{\lambda} (R_{T_i} + R_{R_i}),$$

где λ – длина волны.

В общем случае при интерферометрической съёмке разность фаз:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} (R_{T_1} - R_{T_2}) + \frac{2\pi}{\lambda} (R_{R_1} - R_{R_2}).$$

Таким образом, возможны два частных случая формирования базы:

1. За счёт изменения траектории полета КА с передатчиком, при этом разность фаз:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} (R_{T_1} - R_{T_2}).$$

2. За счёт применения двух приёмных антенн, при этом разность фаз:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} (R_{R_1} - R_{R_2}).$$

Таким образом, с практической точки зрения, реализуемыми являются два варианта проведения интерферометрических экспериментов с применением наземного стационарного пункта приёма БиРЛК:

1. Двухпроходная интерферометрическая съёмка, при которой используется одна стационарная приёмная антенна, а необходимая база для получения разности хода сигнала обеспечивается за счёт пролёта космического аппарата (КА) по близким виткам.

2. Однопроходная интерферометрическая съёмка, т.е. классический вариант применения двух приёмных антенн расположенных с некоторой базой и обеспечивающих одновременный приём отражённого сигнала.

С одной стороны второй вариант выглядит более логичным, т.к. случайные флуктуации траекторной фазы за счёт распространения в атмосфере (ионосфере) Земли будут практически полностью компенсировать друг друга. С другой стороны, первый более предпочтителен из-за применения более простого наземного приёмного оборудования и отсутствия необходимости расположения второй антенны с некоторой базой, что уже снимает ряд технических проблем.

Дальнейший анализ будем вести для ширины полосы частот сигнала 6 МГц и 30 МГц, т.к. в ближайшее время МСЭ, возможно, будет рассмотрен вопрос расширения разрешённой полосы частот в Р-диапазоне.

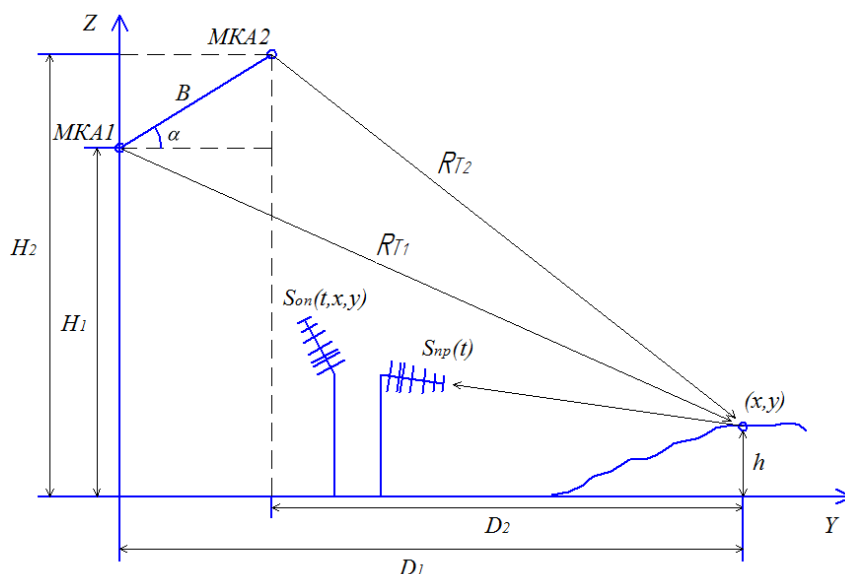


Рис. 4. Схематичное изображение геометрии двухпроходной бистатической интерферометрической съёмки

2. Двухпроходная интерферометрическая съёмка.

На рис. 4 схематично показана геометрия проведения эксперимента при двухпроходной интерферометрической съёмке. Один или два МКА, на борту которых находится радиопередатчик Р-диапазона, последовательно занимают положения МКА1 и МКА2, разнесенные на базу B .

При интерферометрическом способе измерения высоты интерферометрическая разность фаз $\Delta\varphi$ пропорциональна разности расстояний ΔR сигнала прошедшего от двух положений МКА до цели:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} [R_{T_2} - R_{T_1}] = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R. \quad (1)$$

Из рис. 4 найдём R_{T_1} и R_{T_2} :

$$R_{T_1} = \sqrt{D_1^2 + (H_1 - h)^2}; \quad (2)$$

$$R_{T_2} = \sqrt{D_2^2 + (H_2 - h)^2}. \quad (3)$$

Так же из рис. 4 найдем

$$D_2 = D_1 - B \cdot \cos\alpha. \quad (4)$$

Теперь запишем ΔR как функцию от высоты искомой точки (цели):

$$\Delta R = R_2 - R_1 = \sqrt{(D_1 - B \cdot \cos\alpha)^2 + (H_2 - h)^2} - \sqrt{D_1^2 + (H_1 - h)^2} = f(h). \quad (5)$$

Подставляя (5) в (1), получим:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} f(h). \quad (6)$$

Необходимо оценить ошибку определения высоты δh цели при малых изменениях интерферометрической разности фаз $\delta\Delta\varphi$, связанную только с геометрией интерферометра без учёта атмосферы. Для этого запишем:

$$\delta\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} f'(h)|_{h=0} \delta h, \quad (7)$$

где $f'(h)|_{h=0}$ - производная функции $f(h)$ при высоте цели h равной нулю.

Таким образом, из (7) можно вычислить ошибку определения высоты $\sqrt{\mathbf{D}\{\delta h\}}$:

$$\delta h = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\sqrt{\mathbf{D}\{\delta\Delta\varphi\}}}{|f'(h)|_{h=0}}, \quad (8)$$

где

$$f'(h)|_{h=0} = \frac{-2(H_2 - h)}{2\sqrt{(D_1 - B \cdot \cos\alpha)^2 + (H_2 - h)^2}} \Big|_{h=0} - \frac{-2(H_1 - h)}{2\sqrt{D_1^2 + (H_1 - h)^2}} \Big|_{h=0} = -\frac{H_2}{\sqrt{(D_1 - B \cdot \cos\alpha)^2 + H_2^2}} + \frac{H_1}{\sqrt{D_1^2 + H_1^2}}.$$

В этом выражении дисперсия интерферометрической фазы является следствием наличия аддитивного шума на РЛИ, и определяется в соответствии с [8]

$$D\{\delta\Delta\varphi\} = 2q^{-1}, \quad (10)$$

где q - отношение С/Ш на РЛИ. Данное выражение применимо, если $q \geq 10\text{дБ}$.

Теперь используя [9], с учётом бистатической схемы съёмки, определим размер критической базы при которой происходит полная декорреляция двух радиолокационных изображений по следующей формуле:

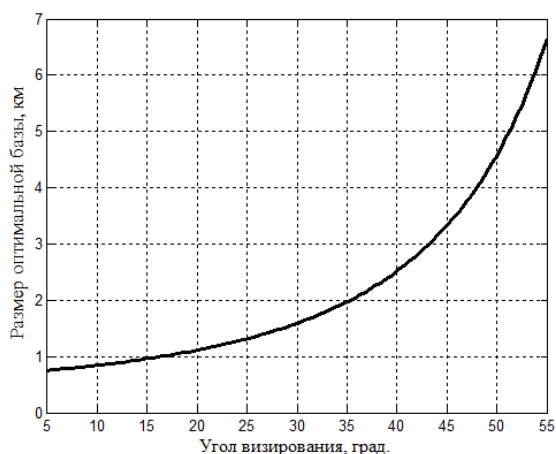
$$B_{crit} = \frac{\lambda R}{\Delta r \cdot \cos^2(\vartheta)}, \quad (11)$$

где R - наклонная дальность; Δr - разрешение

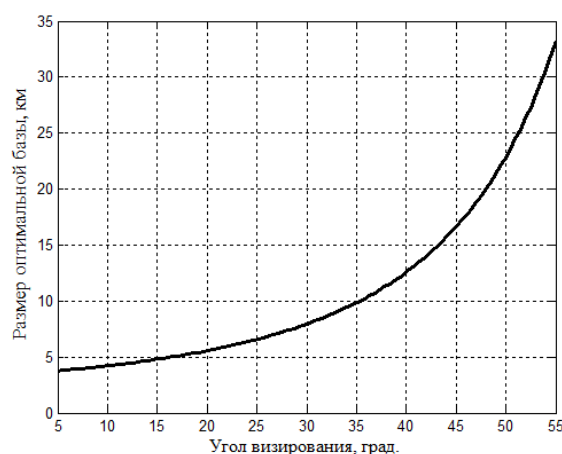
по дальности, зависящее от ширины полосы частот сигнала; ϑ - угол падения.

Оптимальной базой можно считать $B_{optim} = 0,1B_{crit}$ [10], т.е. коэффициент когерентности двух изображений будет равен 0,9.

На рис. 5 представлены графики зависимости оптимальной базы от угла визирования (от 5 до 55 градусов, т.е. по горизонтальной дальности от КА до цели от 43 до 714 км) для двухпроходной интерферометрической съёмки для полосы частот 6 МГц и 30 МГц. Так же из сравнения рис. 5 (а) и 5 (б) видно, что при расширении полосы частот сигнала величина оптимальной базы увеличивается, что, соответственно, приводит к уменьшению ошибки интерферометра.

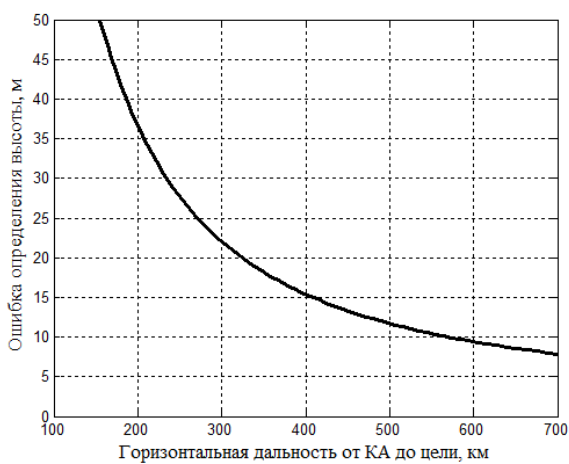


а)

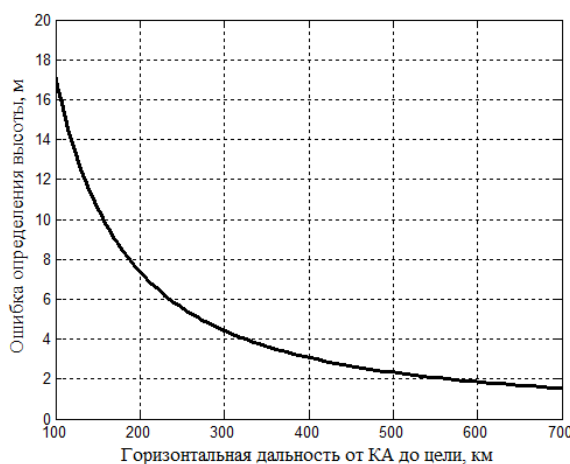


б)

Рис. 5. Размер оптимальной базы в км в зависимости от угла визирования, при ширине полосы частот 6 МГц (а) и 30 МГц (б), соответственно.



а)



б)

Рис. 6. Зависимость ошибки определения высоты от горизонтальной дальности от КА до цели, с учётом оптимальной базы, при ширине полосы частот 6 МГц (а) и 30 МГц (б), соответственно.

На рис. 6 представлен график зависимости ошибки определения высоты от горизонтальной дальности от КА до цели с учётом оптимальной базы, для каждого значения горизонтальной дальности.

Стоит отметить, что ошибка определения высоты, при этой схеме съёмки, не зависит от расстояния между наземным пунктом и целью.

3. Однопроходная интерферометрическая съёмка.

На рис. 7 схематично показана геометрия проведения эксперимента при однопроходной интерферометрической съёмке. В данном варианте необходимая база B обеспечивается размещением двух приёмных антенн на наземном пункте приёма.

Производя аналогичные вычисления по формулам (1)-(7), как в предыдущем разделе, и учитывая что $D_1 = D_2 = D$, получим:

$$\delta h = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\sqrt{D\{\delta\Delta\varphi\}}}{f'(h)|_{h=0}}, \quad (9)$$

где

$$f'(h)|_{h=0} = -\frac{(H_1 + B)}{\sqrt{D^2 + (H_1 + B)^2}} + \frac{H_1}{\sqrt{D^2 + H_1^2}}.$$

Теперь построим зависимость ошибки определения высоты, для разных значений расстояния от наземного пункта приёма (НПП) до цели – 2500, 5000, 10000, 20000 м, от размера вертикальной базы, образованной за счёт применения двух разнесённых антенн на приёмном пункте, рис. 8. Стоит отметить, что в данном варианте съёмки размер базы на НПП не зависит от полосы частот сигнала, а в основном определяется практической реализуемостью.

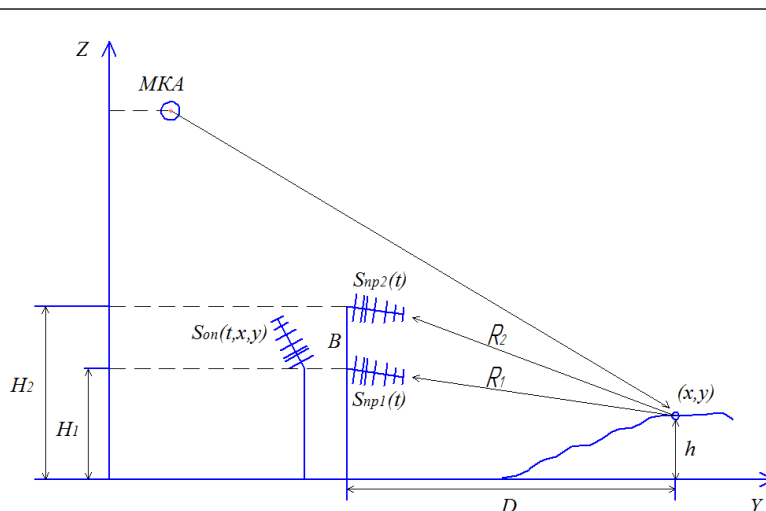


Рис. 7. Схематичное изображение геометрии однопроходной бистатической интерферометрической съёмки

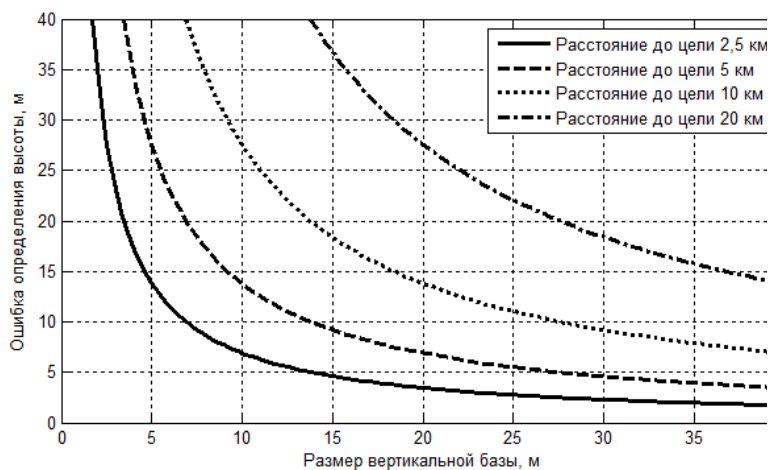
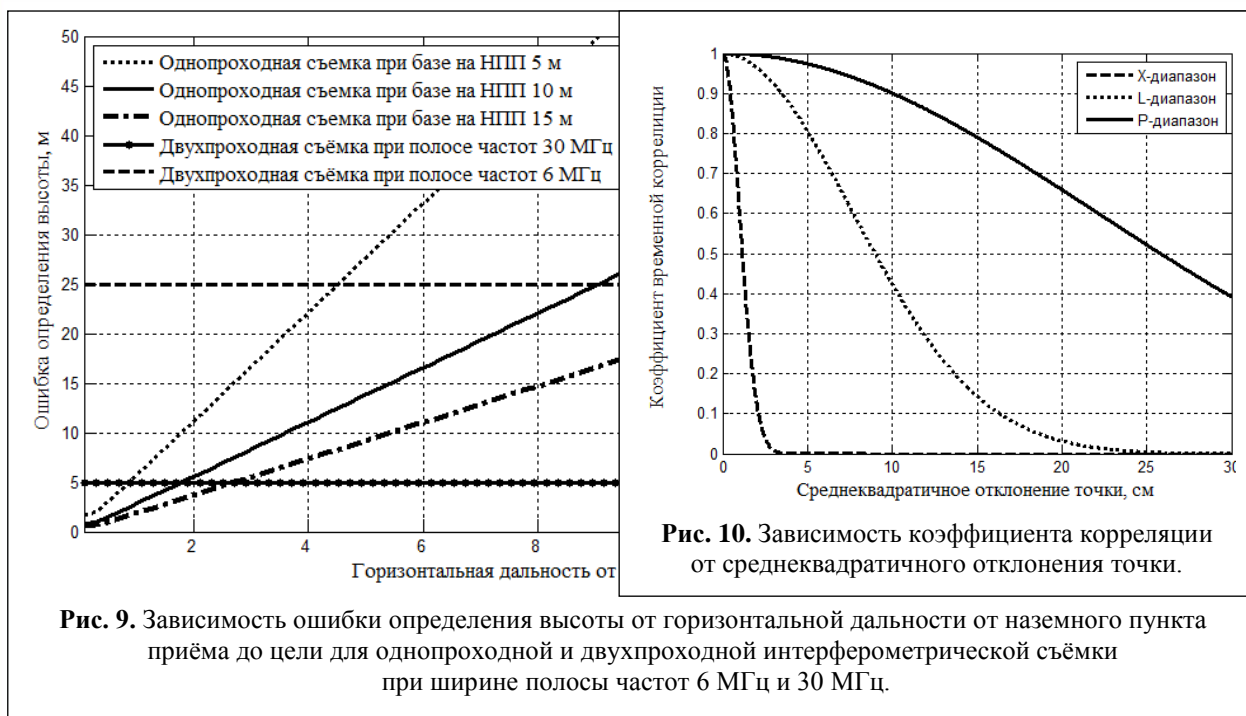


Рис. 8. Зависимость ошибки определения высоты от размера вертикальной базы на НПП

4. Анализ двух вариантов съёмки

При ширине полосы частот 6 МГц.

Из анализа рис. 6 (а) и 8 при одинаковом отношении сигнал/шум $q = 15 \text{ дБ}$, можно сделать следующий вывод, что при двухпроходной схеме съёмки ошибка по высоте от 25 до 12 метров может быть достигнута при удалении цели от КА на 260 км (угол визирования от 27 градусов до 45 градусов), при оптимальной базе. При применении двух антенн в НПП, для той же точности, на удалении цели на 2,5 км достаточно вертикальной базы 3-6 метра, на удалении 5 км – 5,5-12 метров, на удалении 10 км – 11-22 метров, на удалении 20 км – 22,5-38 метров.

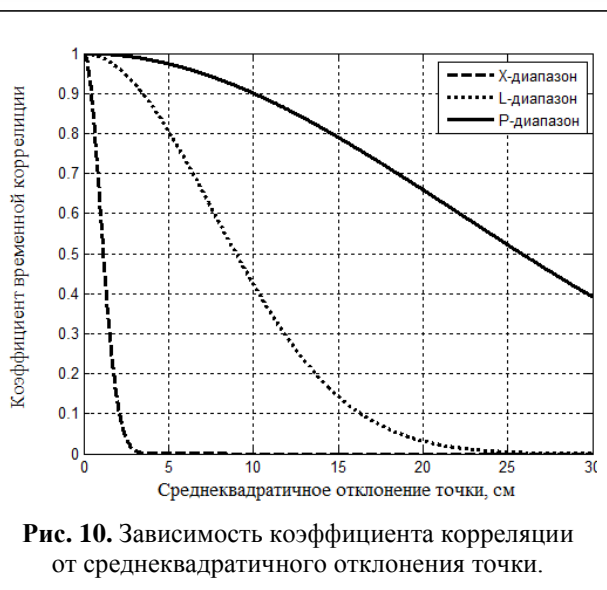


Таким образом, использование НПП с двумя антеннами возможно при максимальном удалении цели на 10 км, где база должна составлять не менее 11 метров, что ещё может быть практически реализовано, например, на высоком здании (вторая антенна поднимается на высокой мачте), либо, что технически значительно сложнее, расположить антенны на близко расположенных зданиях разной высоты.

При ширине полосы частот 30 МГц.

Из анализа рис. 6 (б) и 8 при одинаковом отношении сигнал/шум $q = 15 \text{ дБ}$, можно сделать вывод, что при двухпроходной схеме съёмки ошибка по высоте от 5 до 2,5 метров, может быть достигнута при удалении цели от КА на 260 км (угол визирования от 27 градусов до 45 градусов), при оптимальной базе. При применении двух антенн в НПП на удалении цели на 2,5 км достаточно вертикальной базы 14-27 метров, на удалении 5 км – не менее 28 метров, на большем удалении размер базы выходит за рамки технически реализуемых.

Таким образом, использование НПП с двумя антеннами возможно при максимальном удалении цели 2,5 км, где база должна составлять не менее 14 метров, что ещё может быть практически реализовано.



Наибольший интерес представляет величина максимального удаления цели от НПП, при которой величина ошибки определения высоты находится в допустимых пределах. В случае с однопроходной съёмкой ошибка определения высоты возрастает с увеличением расстояния от НПП до цели, а при двухпроходной не зависит от расстояния от НПП до цели, и определяется только удалением МКА от области интереса, рис. 9. В данном случае ограничение по дальности в 20 км продиктовано максимальной зоной фокусировки бистатического изображения [11].

Так же для более полного сравнения оценим временную декорреляцию, которая характерна только для двухпроходной интерферометрии. Найдём коэффициент временной корреляции используя следующее выражение [8], с учётом бистатической геометрии:

$$P_{temporal} = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (\sigma_y^2 \sin^2 \theta)\right\},$$

где σ_y - среднеквадратичное отклонение точки по горизонтали; θ - угол визирования. На рис. 10 представлен график зависимости коэффициента корреляции от среднеквадратичного смещения точки для Р-диапазонов при угле визирования 30 градусов. По графику можно сделать

вывод, что приемлемое значение коэффициента корреляции 0,9 может быть достигнуто при смещении точки на 10 см. Для примера, на рис. 10 показаны графики для X- и L-диапазонов, из которых видно, что при сопоставимом коэффициенте корреляции 0,9 смещение точки должно составлять не более 4 мм и 3,5 см, соответственно.

Заключение

Таким образом, существенным преимуществом применения двухпроходной съёмки является:

1. Возможность «переложить» создание необходимой интерферометрической базы на космический сегмент системы наблюдения, т.к. обустройство необходимой базы для получения схожих целевых характеристик на Земле является серьезным техническим ограничением (иногда не выполнимым), особенно при развёртывании НПП в полевых условиях.

2. Необходимо всего два приёмных канала (и две антенны), против трёх при наземной интерферометрической базе.

3. Неизменность ошибки определения высоты от расстояния от НПП до цели.

Конечно, есть и ряд недостатков, влияние которых необходимо учитывать:

1. При двухпроходной схеме съёмки, одним аппаратом или двумя, двигающимися с разнесением по орбите, требуется время, за которое КА вернется на ту же трассу полёта, сдвинутую на необходимую оптимальную базу. Но здесь следует отметить, что R-диапазон в меньшей степени подвержен временной декорреляции в сравнении с более высокочастотными (рис. 8).

2. При использовании двух КА, летящих в тандеме, сложно организовать полёт для обеспечения оптимальной базы в заданных районах съёмки. Например, для двух КА TerraSAR-X/TanDEM-X использовалась достаточно сложная конфигурация совместного полёта на орбите типа «Helix» (спираль), плюс дополнительная бортовая аппаратура, исключая столкновение на орбите [10].

3. Необходимо применять специальные алгоритмы, компенсирующие влияние ионосферы на принятый сигнал.

Литература

1. BIOMASS. – Режим доступа: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/The_Living_Planet_Programme/Earth_Explorers/Future_missions/Biomass.
2. Wang R., Loffeld O., Nies H., Ortiz A.M., Walterscheid I., Espeter T., Klare J., Ender J. Focusing results and analysis of advanced bistatic SAR experiments in spaceborne or airborne /airborne or stationary configurations EUSAR 2010. Pp. 1042-1045
3. Nies H., Behner F., Reuter S., Loffeld O., Wang R. SAR Experiments in a Bistatic Hybrid Configuration for Generating PolInSAR Data with TerraSAR-X Illumination EUSAR. 2010. Pp. 994-997.
4. Duque S., López-Dekker P., Mallorqui J. Single-Pass Bistatic SAR Interferometry Using Fixed-Receiver Configurations: Theory and Experimental Validation. IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 48, NO. 6. JUNE, 2010. Pp. 2740-2749.
5. Antoniou M., Zeng Z., Feifeng L., Cherniakov M. Experimental Demonstration of Passive BSAR Imaging Using Navigation Satellites and a Fixed Receiver IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS. VOL. 9, NO. 3. May, 2012. Pp. 477-481.
6. Florian Behner, Simon Reuter. HITCHHIKER Hybrid Bistatic High Resolution SAR Experiment using a Stationary Receiver and TerraSAR-X Transmitter EUSAR. 2010. Pp. 1030–1033.
7. Кирилин А.Н., Ахметов Р.Н., Шахматов Е.В., Ткаченко С.И., Бакланов А.И., Салмин В.В., Семкин Н.Д., Ткаченко И.С., Горячкин О.В. Опытнo-технологический малый космический аппарат "АИСТ-2Д". – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2017. – 324 с.
8. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.
9. Zebker H.A., Villasenor J. Decorrelation in interferometric radar echoes IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 30, NO. 5. September, 1992. Pp. 950-959.
10. Krieger G., Hajnsek I., Panagiotis Papatthanassiou K., Younis M., Moreira A. Interferometric Synthetic Aperture Radar (SAR) Missions Employing Formation Flying Proceedings of the IEEE, VOL. 98, NO. 5. May, 2010. Pp. 816-843.
11. Женгуров Б.Г. Разработка алгоритмов получения изображений в радиотехнических системах с синтезированной апертурой, паразитирующих на сигналах других систем. Дис. канд. тех. наук. – Самара: 2016. – 116 с.

Поступила 13 октября 2017 г.

English

Estimated accuracy of terrain height recovery with bistatic P-band SAR for two options of imaging

Oleg Valeriyevich Goryachkin – Department Head, Theoretical Basics of Radio Engineering and Communication (TBRC), Doctor of Engineering. The Volga Region State University of Telecommunications and Information Science (VRSUTI)¹.

E-mail: oleg.goryachkin@gmail.com.

Ivan Vladimirovich Maslov – Post-Graduate Student. Department of Theoretical Basics of Radio Engineering and Communication (TBRC). The Volga Region State University of Telecommunications and Information Science (VRSUTI)¹.

Design Engineer, JSC “Missile Space Center “Progress” (JSC “MSC “Progress”)².

E-mail: macloff@mail.ru.

¹*Address:* 443010, Samara, L. Tolstoy St., 23.

²*Address:* 443009, Samara, Zemets St., 18.

Abstract: Nowadays there is a greater interest towards the application of space-based P-band synthetic aperture radars for observation of the objects that are subterranean, covered or disguised by vegetation, as well as for geological mapping, for vegetation biomass measurement and for other applications. One of options to obtain radar images is with the bistatic synthetic aperture radar the transmitter of which is spaceborne in the space vehicle, and the receiver is stationary positioned on the highest surface elevation. An attempt was made to quantitatively compare the error of height determination for two options of imaging with varying distance between the target and the ground receiving station not considering the ionosphere.

1. Two-pass interferometric imaging when one stationary receiving antenna is used and the necessary base to obtain the signal propagation difference of the course is provided due to space vehicle (SV) flying in close orbit revolutions.

2. Single-pass interferometric imaging, i.e. classical option of using of two receiving antennas located with some base and providing simultaneous reception of the reflected signal.

The following conclusions are made as the result of the performed analysis that using two-pass imaging has the following advantages:

1. The possibility "to shift" making the necessary interferometric base onto the space segment of the observation system.

2. Only two reception channels are necessary (and two antennas).

3. The error permanency of height determination within distance from ground receiving station to the target.

Further some drawbacks were noted the effect of which needs to be considered:

1. In case of two-pass imaging the time is required during which SV will return to the same flight route that was shifted onto optimum base.

2. When using two SV flying in tandem it is difficult to arrange the flight for ensuring optimum base in preset areas of imaging.

3. It is necessary to apply the special algorithms compensating the ionosphere effect on the received signal.

Keywords: radar detection, synthetic aperture radar (SAR), radar image, interferometry, digital terrain model.

References

1. BIOMASS. – Режим доступа: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/The_Living_Planet_Programme/Earth_Explorers/Future_missions/Biomass.

2. Wang R., Loffeld O., Nies H., Ortiz A.M., Walterscheid I., Espeter T., Klare J., Ender J. Focusing results and analysis of advanced bistatic SAR experiments in spaceborne or airborne /airborne or stationary configurations EUSAR 2010. Pp. 1042-1045.

3. Nies H., Behner F., Reuter S., Loffeld O., Wang R. SAR Experiments in a Bistatic Hybrid Configuration for Generating PolInSAR Data with TerraSAR-X Illumination EUSAR 2010. Pp. 994-997

4. Duque S., López-Dekker P., Mallorqui J. Single-Pass Bistatic SAR Interferometry Using Fixed-Receiver Configurations: Theory and Experimental Validation IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 48, NO. 6, JUNE 2010. Pp. 2740-2749.

5. Antoniou M., Zeng Z., Feifeng L., Cherniakov M. Experimental Demonstration of Passive BSAR Imaging Using Navigation Satellites and a Fixed Receiver IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS, VOL. 9, NO. 3, May, 2012. Pp. 477-481.
6. Florian Behner, Simon Reuter. HITCHHIKER Hybrid Bistatic High Resolution SAR Experiment using a Stationary Receiver and TerraSAR-X Transmitter EUSAR2010. Pp. 1030–1033.
7. Kirilin A.N., Akhmetov R.N., Shakhmatov E.V., Tkachenko S.I., Baklanov A.I., Salmin V.V., Semkin N.D., Tkachenko I.S., Goryachkin O.V. Experiment based technical small-sized AIST-2D space vehicle. Samara: SAMNTS RAS publishing house, 2017. 324 p.
8. Levin B.R. Theoretical fundamentals of statistical radio engineering. – M.: Sov. radio, 1969. – 656 p.
9. Zebker H.A., Villasenor J. Decorrelation in interferometric radar echoes IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 30, NO. 5, September 1992. Pp. 950-959.
10. Krieger G., Hajnsek I., Panagiotis Papathanassiou K., Younis M., Moreira A. Interferometric Synthetic Aperture Radar (SAR) Missions Employing Formation Flying Proceedings of the IEEE. VOL. 98, NO. 5, May 2010. Pp. 816-843.
11. Zhengurov B.G. Algorithms elaboration to obtain images in synthetic aperture radio engineering systems, parasitizing on signals of other systems: thesis of Cand.Tech.Sci. Samara, 2016. 116 p.