

Восстановление высоты местности с учетом статистической связи интерферометрической пары радиолокационных изображений

О.В. Горячкин¹, И.В. Маслов²

¹Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

²Ракетно-космический центр «Прогресс», Земеца 18, Самара, Россия, 443009

Аннотация. Предлагается алгоритм восстановления высоты, позволяющий, на основе статистической связи интерферометрической пары радиолокационных изображений, возникающей вследствие влияния атмосферы Земли, уточнить высоту рельефа местности. Приводятся результаты численного моделирования с исходными данными, соответствующими параметрам бортовой аппаратуры бистатистического радиолокационного комплекса Р-диапазона, установленного на малом космическом аппарате «Аист-2Д». Полученные результаты подтверждают целесообразность учета статистических данных о состоянии ионосферы в алгоритме радиолокационной интерферометрии.

1. Введение

В настоящее время космические аппараты оснащенные радиолокаторами с синтезированной апертурой (РСА) позволяют получать радиолокационные (амплитудные) изображения с высоким пространственным разрешением. Однако РСА позволяют получать также информацию о фазе от отражающих объектов и использовать ее для восстановления третьего измерения, т.е. топографической высоты местности. Наиболее освоенными частотными диапазонами являются X-, C-, S- и L-диапазоны. Запуск ближайшего КА с РСА Р-диапазона Biomass Европейского Космического Агентства запланирован на 2022 год. Основным отличием Р-диапазона от остальных используемых, является высокая проникающая способность и стабильность отражений. Различают две основные схемы съемки изображений с помощью РСА моностатическую, когда передатчик и приемник совмещены в пространстве, и бистатическую, когда передатчик и приемник разнесены в пространстве. Размещение моностатических РСА Р-диапазона затруднено известными техническими проблемами [1-4]: деструктивное влияние ионосферы, ограничения регламента радиосвязи, необходимость использования больших по площади раскрыва антенн, значительная импульсная мощность передатчика. Так, например, основные проектные параметры космического аппарата BIOMASS с моностатическим РСА Р-диапазона, предполагают достижение пространственного разрешения не лучше 50 м, при использовании зеркальной антенны диаметром 12 метров [5]. В [6-9] показано, что технологии мультистатического (в частности бистатического, когда передатчик размещен на борту космического аппарата, а приемная часть на Земле) радиолокационного наблюдения открывают возможности по созданию космической аппаратуры радиолокационного зондирования в Р-

диапазонах частот высокого разрешения. Необходимость наличия наземной стационарной или мобильной приемной станции на относительно небольшом расстоянии до наблюдаемого объекта, ограничивает области применения подобных систем ДЗЗ. Тем не менее можно указать некоторые области применения, в которых предлагаемые технологии имеют преимущества: контроль изменения ландшафта; контроль ледовой обстановки вокруг морских нефти- и газодобывающих платформ; точное земледелие; тактическая разведка; мониторинг лесных ресурсов и т.п. Первым в истории космического ДЗЗ радиолокационным комплексом, работающим в Р-диапазоне частот является бистатический РСА установленный на малом КА «Аист-2Д». Используя технологию многопроходной интерферометрической съемки можно восстановить высоту рельефа местности в окрестности наземного приемного пункта, и в дальнейшем контролировать ее изменение. Необходимая интерферометрическая база может быть сформирована за счет специального баллистического построения орбиты космического аппарата.

2. Вывод алгоритма восстановления высоты, учитывающего статистику атмосферы

Рассмотрим основные этапы обработки и получения цифровой модели рельефа для интерферометрического режима съемки в радиолокаторе с синтезированной апертурой (РСА):

1. Точное совмещение двух изображений (интерферометрической пары) полученных при одинаковых условиях, но с «небольшим» разнесением в пространстве.
2. Нахождение интерферометрической разности фаз двух изображений.
3. Фильтрация полученной интерферограммы для уменьшения влияния спекл-шума.
4. Устранение линейного набега фазы по дальности.
5. Устранение 2π неоднозначности интерферометрической разности фаз, которая обусловлена влиянием рельефа местности.
6. Пересчет интерферометрической фазы в высоту рельефа местности.
7. Процедура геокодирования.

Два изображения могут быть представлены в виде:

$$\dot{I}_1 = f_1(h)I_{10} + \dot{n}_1 \quad \text{и} \quad \dot{I}_2 = f_2(h)I_{20} + \dot{n}_2, \quad (1)$$

где $f_1(h) = \exp(-j\omega_0\tau'_{12}(0, x_0, y_0, 0)h)$ и $f_2(h) = \exp(-j\omega_0\tau'_{22}(0, x_0, y_0, 0)h)$ - функции описывающие зависимость высоты цели, $\tau'_{12}(0, x_0, y_0, 0)$ и $\tau'_{22}(0, x_0, y_0, 0)$ - регулярная составляющая задержка сигнала, h - высота, $\dot{I}_{10} = \sum_k \exp(-j\omega_0\delta_1(t_k))$ и $\dot{I}_{20} = \sum_k \exp(-j\omega_0\delta_2(t_k))$, $\delta_1(t_k)$ и $\delta_2(t_k)$ - случайная составляющая задержки сигнала, возникающая в процессе распространения сигнала в атмосфере Земли, \dot{n}_1 и \dot{n}_2 - независимые аддитивные комплексные шумы в каналах РСА.

Оценка максимального правдоподобия искомой высоты в условиях известной статистики флуктуаций времени прихода сигнала в атмосфере Земли может быть записана:

$$h = \max_h p(\dot{I}_1, \dot{I}_2 | h) = \max_h \iint_G p(\dot{I}_1, \dot{I}_2 | I_{10}, I_{20}, h) p(I_{10}, I_{20}) dI_{10} dI_{20}, \quad (2)$$

где G - область интегрирования на комплексной плоскости,

$$p(\dot{I}_1, \dot{I}_2 | I_{10}, I_{20}, h) = \frac{1}{2\pi\sigma_{n1}^2} \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{(\operatorname{Re}[\dot{I}_1] - \operatorname{Re}[f_1(h)I_{10}])^2}{\sigma_{n1}^2} - \frac{1}{2} \frac{(\operatorname{Im}[\dot{I}_1] - \operatorname{Im}[f_1(h)I_{10}])^2}{\sigma_{n1}^2} \right] \\ \times \frac{1}{2\pi\sigma_{n2}^2} \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{(\operatorname{Re}[\dot{I}_2] - \operatorname{Re}[f_2(h)I_{20}])^2}{\sigma_{n2}^2} - \frac{1}{2} \frac{(\operatorname{Im}[\dot{I}_2] - \operatorname{Im}[f_2(h)I_{20}])^2}{\sigma_{n2}^2} \right]$$

$\operatorname{Re}[\dot{I}_1]$ и $\operatorname{Im}[\dot{I}_1]$ - реальная и мнимая часть изображения \dot{I}_1 , $\operatorname{Re}[\dot{I}_2]$ и $\operatorname{Im}[\dot{I}_2]$ - реальная и мнимая часть изображения \dot{I}_2 , σ_{n1}^2 и σ_{n2}^2 - дисперсия шума первого и второго изображения.

Введем следующие обозначения: $\text{Re}(I_1) = x_1$, $\text{Im}(I_1) = y_1$; $\text{Re}(I_2) = x_2$, $\text{Im}(I_2) = y_2$;
 $\text{Re}(I_{10}) = x_{10}$, $\text{Im}(I_{10}) = y_{10}$; $\text{Re}(I_{20}) = x_{20}$, $\text{Im}(I_{20}) = y_{20}$; $\text{Re}(f_1(h)) = k_{1x}$, $\text{Im}(f_1(h)) = k_{1y}$;
 $\text{Re}(f_2(h)) = k_{2x}$, $\text{Im}(f_2(h)) = k_{2y}$.

Тогда

$$p(I_{10}, I_{20}) = p(x_{10}, y_{10}, x_{20}, y_{20}) = \frac{1}{\sigma_{\text{Re}10} \sigma_{\text{Im}10} \sigma_{\text{Re}20} \sigma_{\text{Im}20} \sqrt{(2\pi)^4 \text{Det}}} \exp \left\{ -\frac{1}{2 \text{Det}} \left[D_{11} \frac{x_{10}^2}{\sigma_{\text{Re}10}^2} + D_{12} \frac{x_{10} y_{10}}{\sigma_{\text{Re}10} \sigma_{\text{Im}10}} + D_{13} \frac{x_{10} x_{20}}{\sigma_{\text{Re}10} \sigma_{\text{Re}20}} + D_{14} \frac{x_{10} y_{20}}{\sigma_{\text{Re}10} \sigma_{\text{Im}20}} + D_{21} \frac{y_{10} x_{10}}{\sigma_{\text{Re}10} \sigma_{\text{Im}10}} + D_{22} \frac{y_{10}^2}{\sigma_{\text{Im}10}^2} + D_{23} \frac{y_{10} x_{20}}{\sigma_{\text{Im}10} \sigma_{\text{Re}20}} + D_{24} \frac{y_{10} y_{20}}{\sigma_{\text{Im}10} \sigma_{\text{Im}20}} + D_{31} \frac{x_{20} x_{10}}{\sigma_{\text{Re}20} \sigma_{\text{Re}10}} + D_{32} \frac{x_{20} y_{10}}{\sigma_{\text{Re}20} \sigma_{\text{Im}10}} + D_{33} \frac{x_{20}^2}{\sigma_{\text{Re}20}^2} + D_{34} \frac{x_{20} y_{20}}{\sigma_{\text{Re}20} \sigma_{\text{Im}20}} + D_{41} \frac{y_{20} x_{10}}{\sigma_{\text{Im}20} \sigma_{\text{Re}10}} + D_{42} \frac{y_{20} y_{10}}{\sigma_{\text{Im}20} \sigma_{\text{Im}10}} + D_{43} \frac{y_{20} x_{20}}{\sigma_{\text{Im}20} \sigma_{\text{Re}20}} + D_{44} \frac{y_{20}^2}{\sigma_{\text{Im}20}^2} \right] \right\} \quad (3)$$

где Det - детерминант матрицы корреляции $p(\text{Re}(I_{10}), \text{Im}(I_{10}), \text{Re}(I_{20}), \text{Im}(I_{20}))$, D_{ij} - алгебраическое дополнение элемента R_{ij} в определителе Det .

После упрощения, запишем многомерную плотность вероятности для величин $x_{10}, y_{10}, x_{20}, y_{20}$

$$p(I_{10}, I_{20}) = \frac{1}{4\pi^2 \sigma_{\text{Re}10} \sigma_{\text{Im}10} \sigma_{\text{Re}20} \sigma_{\text{Im}20} \sqrt{\text{Det}}} \exp \left\{ -\frac{1}{2 \text{Det}} \left[D_{11} \frac{(x_{10} - M_0)^2}{\sigma_{\text{Re}10}^2} + D_{33} \frac{(x_{20} - M_0)^2}{\sigma_{\text{Re}20}^2} + D_{22} \frac{y_{10}^2}{\sigma_{\text{Im}10}^2} + D_{44} \frac{y_{20}^2}{\sigma_{\text{Im}20}^2} + (D_{13} + D_{31}) \frac{(x_{10} - M_0)(x_{20} - M_0)}{\sigma_{\text{Re}10} \sigma_{\text{Re}20}} + (D_{24} + D_{42}) \frac{y_{20} y_{10}}{\sigma_{\text{Im}20} \sigma_{\text{Im}10}} \right] \right\} \quad (4)$$

Где $\sigma_{\text{Re}10}$, $\sigma_{\text{Im}10}$, $\sigma_{\text{Re}20}$, $\sigma_{\text{Im}20}$ - среднеквадратичные отклонения реальных и мнимых частей первого и второго изображения, соответственно, и алгебраические дополнения.

Найдем оценку высоты, проведя интегрирование аналитически.

$$h = \max_h p(I_1, I_2 | h) = \max_h \iint p(I_1, I_2 | I_{10}, I_{20}, h) p(I_{10}, I_{20}) dI_{10} dI_{20} = \max_h p(x_1, y_1, x_2, y_2 | h) = \max_h \iiint p(x_1, y_1, x_2, y_2 | x_{10}, y_{10}, x_{20}, y_{20}, h) p(x_{10}, y_{10}, x_{20}, y_{20}) dx_{10} dy_{10} dx_{20} dy_{20} \quad (5)$$

1. Упростим $p(x_1, y_1, x_2, y_2 | x_{10}, y_{10}, x_{20}, y_{20}, h)$.

$$p(I_1, I_2 | I_{10}, I_{20}, h) = \frac{1}{4\pi^2 D_n^2} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{x_1^2 + y_1^2 + x_2^2 + y_2^2}{D_n} \right] \right\} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{1}{D_n} x_{10}^2 + \frac{1}{D_n} y_{10}^2 + \frac{1}{D_n} x_{20}^2 + \frac{1}{D_n} y_{20}^2 - \frac{(2k_{1x}x_1 + 2k_{1y}y_1)}{D_n} x_{10} + \frac{(-2k_{1x}y_1 + 2k_{1y}x_1)}{D_n} y_{10} - \frac{(2k_{2x}x_2 + 2k_{2y}y_2)}{D_n} x_{20} + \frac{(-2k_{2x}y_2 + 2k_{2y}x_2)}{D_n} y_{20} \right] \right\} \quad (6)$$

где $D_n = \sigma_{n1}^2 = \sigma_{n2}^2$.

2. Упростим $p(x_{10}, y_{10}, x_{20}, y_{20})$.

$$p(x_{10}, y_{10}, x_{20}, y_{20}) = \frac{1}{\sigma_{\text{Re}10} \sigma_{\text{Im}10} \sigma_{\text{Re}20} \sigma_{\text{Im}20} 4\pi^2 \sqrt{\text{Det}}} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2 \text{Det}} \left[\frac{D_{11} M_0^2}{\sigma_{\text{Re}10}^2} + \frac{D_{33} M_0^2}{\sigma_{\text{Re}20}^2} + \frac{(D_{13} + D_{31})}{\sigma_{\text{Re}10} \sigma_{\text{Re}20}} M_0^2 \right] \right\}$$

$$\begin{aligned} & \times \exp \left\{ -\frac{1}{2 \text{Det}} \left[\frac{D_{11}}{\sigma_{\text{Re}10}^2} x_{10}^2 + \frac{D_{22}}{\sigma_{\text{Im}10}^2} y_{10}^2 + \frac{D_{33}}{\sigma_{\text{Re}20}^2} x_{20}^2 + \frac{D_{44}}{\sigma_{\text{Im}20}^2} y_{20}^2 + \frac{(D_{13} + D_{31})}{\sigma_{\text{Re}10} \sigma_{\text{Re}20}} x_{10} x_{20} \right. \right. \\ & - \left. \left. \left(\frac{2M_0 D_{11}}{\sigma_{\text{Re}10}^2} + \frac{(D_{13} + D_{31})M_0}{\sigma_{\text{Re}10} \sigma_{\text{Re}20}} \right) x_{10} - \left(\frac{2M_0 D_{33}}{\sigma_{\text{Re}20}^2} + \frac{(D_{13} + D_{31})M_0}{\sigma_{\text{Re}10} \sigma_{\text{Re}20}} \right) x_{20} \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{(D_{24} + D_{42})}{\sigma_{\text{Im}10} \sigma_{\text{Im}20}} y_{10} y_{20} \right] \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

3. Запишем $p(x_1, y_1, x_2, y_2 | h)$ с учетом проведенных выше преобразований.

$$\begin{aligned} p(x_1, y_1, x_2, y_2 | h) &= \frac{1}{16\pi^4 D_n^2 \sigma_{\text{Re}10} \sigma_{\text{Im}10} \sigma_{\text{Re}20} \sigma_{\text{Im}20} \sqrt{\text{Det}}} \\ & \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{x_1^2 + y_1^2 + x_2^2 + y_2^2}{D_n} + \frac{D_{11}M_0^2}{\sigma_{\text{Re}10}^2 \text{Det}} + \frac{D_{33}M_0^2}{\sigma_{\text{Re}20}^2 \text{Det}} + \frac{(D_{13} + D_{31})M_0^2}{\sigma_{\text{Re}10} \sigma_{\text{Re}20} \text{Det}} \right] \right\} \\ & \times \iiint \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{D_n} + \frac{D_{11}}{\sigma_{\text{Re}10}^2 \text{Det}} \right) x_{10}^2 + \left(\frac{1}{D_n} + \frac{D_{22}}{\sigma_{\text{Im}10}^2 \text{Det}} \right) y_{10}^2 + \left(\frac{1}{D_n} + \frac{D_{33}}{\sigma_{\text{Re}20}^2 \text{Det}} \right) x_{20}^2 \right. \right. \\ & + \left. \left(\frac{1}{D_n} + \frac{D_{44}}{\sigma_{\text{Im}20}^2 \text{Det}} \right) y_{20}^2 - \left(\frac{(2k_{1x}x_1 + 2k_{1y}y_1)}{D_n} + \frac{2M_0 D_{11}}{\sigma_{\text{Re}10}^2 \text{Det}} + \frac{(D_{13} + D_{31})M_0}{\sigma_{\text{Re}10} \sigma_{\text{Re}20} \text{Det}} \right) x_{10} \right. \\ & + \frac{(-2k_{1x}y_1 + 2k_{1y}x_1)}{D_n} y_{10} + \frac{(-2k_{2x}y_2 + 2k_{2y}x_2)}{D_n} y_{20} + \frac{(D_{13} + D_{31})}{\sigma_{\text{Re}10} \sigma_{\text{Re}20} \text{Det}} x_{10} x_{20} \\ & - \left. \left. \left(\frac{(2k_{2x}x_2 + 2k_{2y}y_2)}{D_n} + \frac{2M_0 D_{33}}{\sigma_{\text{Re}20}^2 \text{Det}} + \frac{(D_{13} + D_{31})M_0}{\sigma_{\text{Re}10} \sigma_{\text{Re}20} \text{Det}} \right) x_{20} \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{(D_{24} + D_{42})}{\sigma_{\text{Im}10} \sigma_{\text{Im}20} \text{Det}} y_{10} y_{20} \right] \right\} dx_{10} dy_{10} dx_{20} dy_{20} \end{aligned} \quad (8)$$

Вычислим полученный интеграл.

Как можно заметить, он представляет собой многомерную плотность вероятностей совокупности случайных величин, тогда

$$\frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n \det B^{-1}}} \int \dots \int \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\bar{x} - \bar{a})^T B (\bar{x} - \bar{a}) \right\} d\bar{x} = 1, \quad (9)$$

где $\bar{x} = \begin{bmatrix} x_{10} \\ y_{10} \\ x_{20} \\ y_{20} \end{bmatrix}$, \bar{a} - вектор средних значений, B - ковариационная матрица.

Так как матрица B симметричная, то можно записать:

$$(\bar{x} - \bar{a})^T B (\bar{x} - \bar{a}) = \bar{x}^T B \bar{x} - 2\bar{a}^T B \bar{x} + \bar{a}^T B \bar{a} = \bar{x}^T B \bar{x} - C \bar{x} + D, \quad (10)$$

где $C = 2\bar{a}^T B \Rightarrow a^T = \frac{1}{2} B^{-1} C$, тогда $D = a^T B a = \frac{1}{4} C B^{-1} B (C B^{-1})^T = \frac{1}{4} C B^{-1} C^T$.

Получим $\int \dots \int \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\bar{x}^T B \bar{x} - C \bar{x}) \right\} d\bar{x} = \sqrt{(2\pi)^n} \frac{1}{\det B} \exp \left\{ \frac{1}{2} D \right\}$.

Определим вектор C :

$$C = \begin{pmatrix} - \left(\frac{(2k_{1x}x_1 + 2k_{1y}y_1)}{D_n} + \frac{2M_0D_{11}}{\sigma_{Re10}^2 Det} + \frac{(D_{13} + D_{31})M_0}{\sigma_{Re10}\sigma_{Re20} Det} \right) \\ \frac{(-2k_{1x}y_1 + 2k_{1y}x_1)}{D_n} \\ - \left(\frac{(2k_{2x}x_2 + 2k_{2y}y_2)}{D_n} + \frac{2M_0D_{33}}{\sigma_{Re20}^2 Det} + \frac{(D_{13} + D_{31})M_0}{\sigma_{Re10}\sigma_{Re20} Det} \right) \\ \frac{(-2k_{2x}y_2 + 2k_{2y}x_2)}{D_n} \end{pmatrix} \quad (11)$$

Определим матрицу B

$$B = \begin{pmatrix} \left(\frac{1}{D_n} + \frac{D_{11}}{\sigma_{Re10}^2 Det} \right) & 0 & \frac{(D_{13} + D_{31})}{\sigma_{Re10}\sigma_{Re20} Det} & 0 \\ 0 & \left(\frac{1}{D_n} + \frac{D_{22}}{\sigma_{Im10}^2 Det} \right) & 0 & \frac{(D_{24} + D_{42})}{\sigma_{Im10}\sigma_{Im20} Det} \\ \frac{(D_{13} + D_{31})}{\sigma_{Re10}\sigma_{Re20} Det} & 0 & \left(\frac{1}{D_n} + \frac{D_{33}}{\sigma_{Re20}^2 Det} \right) & 0 \\ 0 & \frac{(D_{24} + D_{42})}{\sigma_{Im10}\sigma_{Im20} Det} & 0 & \left(\frac{1}{D_n} + \frac{D_{44}}{\sigma_{Im20}^2 Det} \right) \end{pmatrix} \quad (12)$$

Запишем

$$p(I_1, I_2 | h) = \frac{1}{16\pi^4 D_n^2 \sigma_{Re10}\sigma_{Im10}\sigma_{Re20}\sigma_{Im20} \sqrt{Det}} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{x_1^2 + y_1^2 + x_2^2 + y_2^2}{D_n} + \frac{D_{11}M_0^2}{\sigma_{Re10}^2 Det} + \frac{D_{33}M_0^2}{\sigma_{Re20}^2 Det} + \frac{(D_{13} + D_{31})M_0^2}{\sigma_{Re10}\sigma_{Re20} Det} \right] \right\} \times \iiint \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\bar{x}^T B \bar{x} - C \bar{x} \right] \right\} d\bar{x} \quad (13)$$

Окончательно получим алгоритм оценки высоты местности, учитывающий случайный характер распространения сигнала в атмосфере Земли в виде, не содержащем кратные интегралы:

$$h = \max_h p(x_1, y_1, x_2, y_2 | h) = \frac{1}{4\pi^2 D_n^2 \sigma_{Re10}\sigma_{Im10}\sigma_{Re20}\sigma_{Im20} \sqrt{Det} \sqrt{\det B}} \times \exp \left\{ \frac{1}{2} D - \frac{1}{2} \left[\frac{x_1^2 + y_1^2 + x_2^2 + y_2^2}{D_n} + \frac{D_{11}M_0^2}{\sigma_{Re10}^2 Det} + \frac{D_{33}M_0^2}{\sigma_{Re20}^2 Det} + \frac{(D_{13} + D_{31})M_0^2}{\sigma_{Re10}\sigma_{Re20} Det} \right] \right\} \quad (14)$$

Основной вопрос, возникающий в данном случае, это целесообразность учета атмосферы в алгоритме определения высоты. Будет ли заметен выигрыш правильного учета статистической модели атмосферы, относительно ошибочного учета. Для ответа на этот вопрос было проведено математическое моделирование.

3. Результаты математического моделирования

На рисунках 1-3 представлены результаты расчетов для разных значений истинного коэффициента корреляции при следующих исходных данных:

- отношении сигнал/шум 23 дБ
- интерферометрическая база 10 км.
- время синтеза 2 секунды (разрешение не хуже 50 метров).

- угол наклона базы ноль градусов.
- угол визирования 45 градусов.

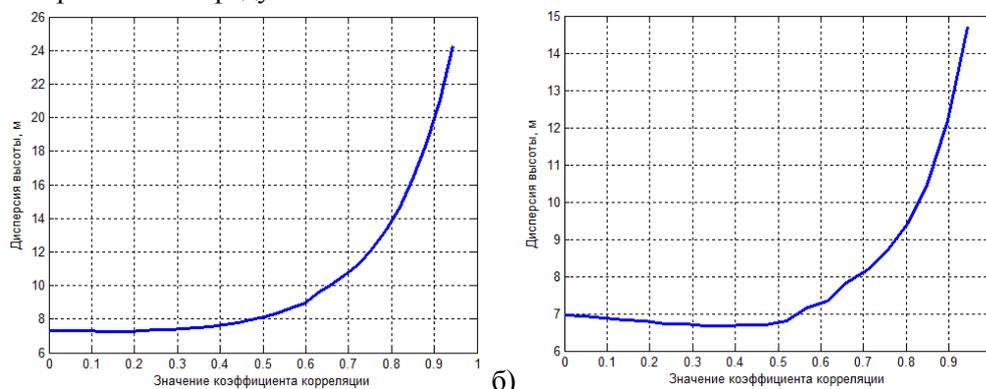


Рисунок 1. Истинное значение коэффициента корреляции 0,1 (а) и 0,5 (б), соответственно.

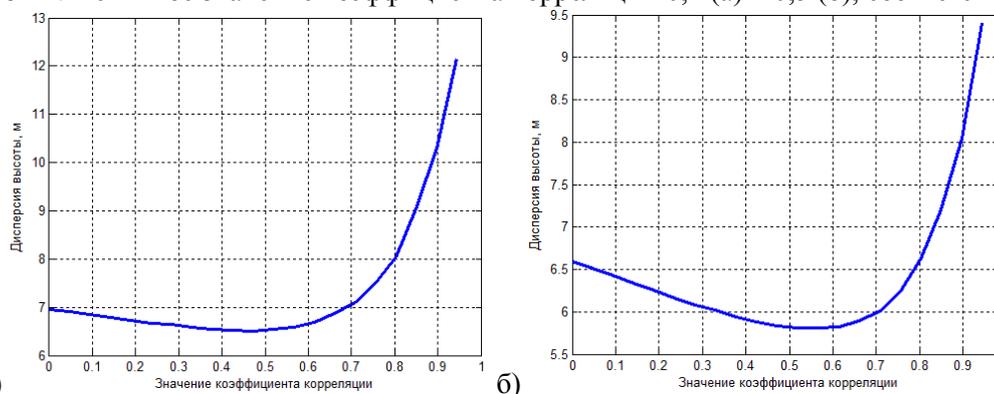


Рисунок 2. Истинное значение коэффициента корреляции 0,6 (а) и 0,7 (б), соответственно.

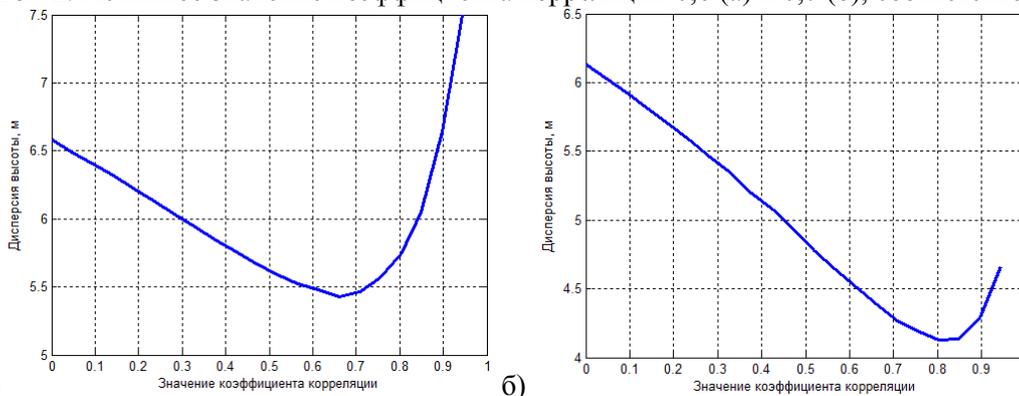


Рисунок 3. Истинное значение коэффициента корреляции 0,8 (а) и 0,9 (б), соответственно.

4. Выводы

Из полученных данных следует, что чем больше коэффициенты корреляции между реальными и мнимыми частями двух изображений (интерферометрической пары) тем больше значение выигрыша от применения предлагаемого алгоритма, учитывающего статистические данные о состоянии ионосферы.

5. Литература

- [1] Ishimaru, A. Ionospheric effects on synthetic aperture radar at 100 MHz to 2 GHz / A. Ishimaru, Y. Kuga, J. Liu // Radio Science (USA). – 1999. – Vol. 34(1). – P. 257-268.
- [2] Goriachkin, O.V. The some problems of realization spaceborne SAR's in P,UHF,VHF bands / O.V. Goriachkin, D.D. Kloovsky // Proceedings IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hamburg, Germany. – 1999. – Vol. 2. – P. 1271-1273.

- [3] Горячкин, О.В. Влияние атмосферы Земли на деградацию характеристик изображений космических радиолокационных станций с синтезированной апертурой // Компьютерная оптика. – 2002. – Т. 24. – С. 177-183.
- [4] Горячкин, О.В. Методы слепой обработки сигналов и их приложения в системах радиотехники и связи – М.: Радио и связь, 2003. – 230 с.
- [5] Ramongassie, S. P-band SAR instrument for BIOMASS / S. Ramongassie, P. Valle, G. Orlando // EUSAR. – 2014 – P. 1156-1159.
- [6] Горячкин, О.В. Пути развития радиолокационных космических систем дистанционного зондирования Земли // Вестник СГАУ. – 2010. – № 2. – С. 92-104.
- [7] Горячкин, О.В. Бистатический радиолокатор с синтезированной апертурой Р-диапазона для МКА «АИСТ-2» / О.В. Горячкин, Б.Г. Женгуров, В.Б. Бакеев, А.Ю. Барабошин, А.В. Невский, Е.Г. Скоробогатов // Электросвязь. – 2015. – № 8. – С. 34-39.
- [8] Горячкин, О.В. Формирование радиолокационных изображений в наземной бистатической РЛС с синтезированной апертурой Р-диапазона / О.В. Горячкин, А.В. Борисенков, Б.Г. Женгуров // Радиотехника. – 2017. – № 1. – С. 117-121.
- [9] Кирилин, А.Н. Опытнo-технологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д» / А.Н. Кирилин, Р.Н. Ахметов, Е.В. Шахматов, С.И. Ткаченко, А.И. Бакланов, В.В. Салмин, Н.Д. Семкин, И.С. Ткаченко, О.В. Горячкин – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2017. – 324 с.

Restoring the height of the terrain taking into account the statistical relationship of the interferometric pair of radar images

O.V. Goryachkin¹, I.V. Maslov²

¹Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

²Joint Stock Company Space Rocket Centre Progress, Zemetsa str. 18, Samara, Russia, 443009

Abstract. An algorithm for reconstructing the height is proposed, which allows, based on the statistical relationship of the interferometric pair of radar images arising from the influence of the Earth's atmosphere, to clarify the height of the terrain. The results of numerical simulation are presented with the initial data corresponding to the parameters of the on-board equipment of the P-band bistatic radar system installed on the Aist-2D small spacecraft. The results obtained confirm the advisability of taking into account the statistical data on the state of the ionosphere in the algorithm of radar interferometry.