

DOI: 10.17725/rensit.2023.15.243

Формирование трехмерного изображения рельефа земной поверхности в режиме синтезирования апертуры при вращении фазового центра приёмной антенны и разнесении приемо-передающего модуля

¹Татарский Б.Г., ²Панас А.И., ¹Нажжар Таммам

¹Московский авиационный институт, <http://www.mai.ru/>
Москва 125993, Российская Федерация

²НПП "Исток" им. А.И. Шокина, <http://www.istokmw.ru/>
Фрязино 141190, Московская обл., Российская Федерация

E-mail: boris-tatarsky@inbox.ru, aipanas@istokmw.ru, tnajjar23551@gmail.com

Поступила 05.06.2023, рецензирована 12.06.2023, принята 19.06.2023

Аннотация: Рассмотрены особенности формирования трехмерных радиолокационных изображений при синтезе искусственной апертуры за счет вращения фазового центра приёмной антенны и стационарном разнесённом местоположении приемо-передающего модуля при интерферометрической интерпретации поступающих данных. Приведены основные математические соотношения, связанные с определением высоты рельефа, представлены алгоритм обработки траекторного сигнала на основе интерферометрического подхода, а также результаты оценки работоспособности предложенного алгоритма, полученные путем компьютерного моделирования.

Ключевые слова: радиолокационная система, синтезирование апертуры антенны, фазовый центр антенны, база интерферометра, интерферометрическая обработка, радиолокационное изображение, точечная цель, вращение фазового центра антенны, приемо-передающий модуль, приёмный модуль, распределённая радиолокационная система

УДК 621.396.9

Для цитирования: Татарский Б.Г., Панас А.И., Нажжар Таммам. Формирование трехмерного изображения рельефа земной поверхности в режиме синтезирования апертуры при вращении фазового центра приёмной антенны и разнесении приемо-передающего модуля. РЭНСИТ: Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, 2023, 15(3):243-252. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.243.

3D image formation of the earth surface relief in the aperture synthesis mode when rotating the receiving antenna phase center and the transceiver module diversion

Boris G. Tatarsky, Nazhzhazh Tammam

Moscow Aviation Institute, <http://www.mai.ru/>
Moscow 125993, Russian Federation

E-mail: boris-tatarsky@inbox.ru, tnajjar23551@gmail.com

Andrey I. Panas

Shokin Research and Production Center "Istok", <http://www.istokmw.ru/>
Fryazino 141190, Moscow region, Russian Federation

E-mail: aipanas@istokmw.ru

Received June 05, 2023, peer-reviewed June 12, 2023, accepted June 19, 2023

Abstract: The features of 3D radar image formation during the synthesis of an artificial aperture due to rotation of the phase center of the receiving antenna and stationary diversified transceiver module have been considered during the interferometric interpretation of incoming data. The main mathematical relations, associated with determination of the relief height are given, the algorithm for processing the trajectory signal based on the interferometric approach, as well as the results of evaluating the efficiency of the proposed algorithm, obtained by computer simulation, are presented.

Keywords: radar system, antenna aperture synthesis, antenna phase center, interferometer base, interferometric processing, radar image, point target, antenna phase center rotation, transceiving module, receiving module, distributed radar system

UDC 621.396.9

For citation: Boris G. Tatarsky, Andrey I. Panas, Nazhzhar Tamam. 3D image formation of the earth surface relief in the aperture synthesis mode when rotating the receiving antenna phase center and the transceiver module diversion. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2023, 15(3):243-252e. DOI: 10.17725/rensit.2023.15.243.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (244)
2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ (244)
3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТЫ ОБЪЕКТА РАДИОЛОКАЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ (245)
4. УСЛОВИЯ ОДНОЗНАЧНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ ОБЪЕКТА НАБЛЮДЕНИЯ (247)
5. АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ РЕЛЬЕФА НАБЛЮДАЕМОЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ (249)
6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (251)

ЛИТЕРАТУРА (251)

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие теоретических основ и технических возможностей по созданию радиолокационных систем с синтезированной апертурой (РСА) позволяет получать радиолокационные изображения (РЛИ) наблюдаемых объектов с разрешением порядка единиц метров и менее [1-4]. В то же время при решении ряда практических задач от бортовых РАС требуются большие информационные возможности, которые могут быть обеспечены только при получении трёхмерных РЛИ. В частности, полученные трёхмерные РЛИ наблюдаемой поверхности позволяют уменьшить ошибки в определении координат наблюдаемых наземных объектов, обусловленные их высотой, а, следовательно, повысить точность определения местоположения носителя РАС относительно наземных радиолокационно-контрастных ориентиров при использовании данных изображений. Кроме того, формирование трёхмерных РЛИ

позволяет получить информацию о рельефе наблюдаемой местности в любых метеоусловиях и времени суток, что позволяет носителю РАС решать задачи следования рельефу местности в условиях плохой оптической видимости. Вопросы формирования трёхмерных РЛИ ранее рассматривались в научно-технической литературе [5-6]. Так в [5] рассмотрение формирования трёхмерных РЛИ ведётся при поступательном движении носителя (фазового центра антенны (ФЦА) РАС), а в [6] показана возможность формирования трёхмерных РЛИ при вращении ФЦА приёмно-передающего модуля РАС.

Целью статьи является рассмотрение особенностей формирования трёхмерных РЛИ в распределённой радиолокационной системе, состоящей из приёмного (RM – receiving module) модуля, фазовый центр антенны (ФЦА) которого вращается по окружности, и стационарного приёмно-передающего (RTM – receiving-transmitting module) модуля.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть имеется распределённая РАС, в которой фазовые центры антенн RM и RTM модулей разнесены в пространстве. Фазовый центр (phase center PC) антенны RTM модуля РАС находится в точке А (**Рис. 1**) и имеет координаты $x_{pc} = 0$, $y_{pc} = 0$, $z_{pc} = H$. А PC антенны приёмного модуля находится в точке В, который вращается строго по окружности радиусом r с постоянной угловой скоростью ω_r в плоскости (M, X', Y') относительно

углового положения Ω РС приемной антенны относительно оси X .

Исходя из геометрии на Рис. 1, фазу $\psi_z(t)$ сигнала на выходе интерферометра можно представить в виде:

$$\psi_z(t) = \frac{2\pi}{\lambda}(R_1(t) - R_0), \quad (8)$$

где $R_1(t)$ – расстояние от ФЦА антенны RM модуля до РС, λ – длина волны зондирующего колебания, R_0 – дальность от РТ до РС приёмно-передающей антенны.

Опираясь на $\Delta T AC$ (см. Рис. 1), можно записать

$$(R_2(t))^2 = R_0^2 + (\|AC\|(t))^2 - 2R_0\|AC\|(t)\cos(\beta(t)). \quad (9)$$

Из уравнения (9), следует, что угол β можно представить как

$$\beta(t) = \arccos\left(\frac{R_0^2 + \|AC\|^2(t) - R_2(t)^2}{2R_0\|AC\|(t)}\right). \quad (10)$$

Тогда из прямоугольного треугольника ΔBCM получим

$$\begin{aligned} R_2(t)^2 &= R_1(t)^2 - B_{\perp}(t)^2 = \\ &= \left(\frac{\lambda\psi_z(t)}{2\pi} + R_0\right)^2 - B_{\perp}(t)^2, \end{aligned} \quad (11)$$

где $B_{\perp} = \|\overline{CB}\|$ – расстояние от ФЦА RM модуля до плоскости MOT . Поскольку $\|AC\|^2 = d^2 + B_{\parallel}^2$, $I^2 = B_{\perp}(t)^2 + \|AC\|^2(t)$, можно записать

$$\beta(t) = \arccos\left(\frac{I^2 - \left(\left(\frac{\lambda\psi_z(t)}{2\pi}\right)^2 + \frac{\lambda\psi_z(t)}{\pi}R_0\right)}{2R_0\sqrt{d^2 + B_{\parallel}(t)^2}}\right), \quad (12)$$

где $B_{\parallel} = \|\overline{MC}\|$ – проекция точки местоположения ФЦА RM модуля на плоскость MOT , равная

$$B_{\parallel}(t) = r \cos(\phi(t)), \quad (13)$$

$\phi(t)$ – угол между направлениями \overline{MB} и \overline{MC} , который можно представить в виде

$$\phi(t) = \omega_r t - \theta. \quad (14)$$

Тогда, учитывая выражение (14) и (13), можно записать

$$B_{\parallel} = r \cos(\omega_r t - \theta). \quad (15)$$

Из выражения (15) следует, что значение угла β можно определить как

$$\beta(t) = \arccos\left(\frac{I^2 - \left(\left(\frac{\lambda\psi_z(t)}{2\pi}\right)^2 + \frac{\lambda\psi_z(t)}{\pi}R_0\right)}{2R_0\sqrt{d^2 + (r \cos(\omega_r t - \theta))^2}}\right). \quad (16)$$

В свою очередь, из Рис. 1 (см. ΔMAC) следует, что угол γ равен

$$\gamma(t) = \arctan\left(\frac{B_{\parallel}(t)}{d}\right) = \arctan\left(\frac{r \cos(\omega_r t - \theta)}{d}\right). \quad (17)$$

Опираясь на (16) и (17), выражение (7), определяющее высоту точечной цели Z_t , можно представить в виде:

$$\begin{aligned} Z_t &= H + R_0 \cos\left(\arccos\left(\frac{I^2 - \left(\left(\frac{\lambda\psi_z(t)}{2\pi}\right)^2 + \frac{\lambda\psi_z(t)}{\pi}R_0\right)}{2R_0\sqrt{d^2 + (r \cos(\omega_r t - \theta))^2}}\right)\right) + \\ &+ \arctan\left(\frac{r \cos(\omega_r t - \theta)}{d}\right). \end{aligned} \quad (18)$$

Выражение (18) позволяет определить высоту точечной цели при разных ее положениях, определяемых углом θ .

На Рис. 2 приведены результаты моделирования характера изменения углов α , β

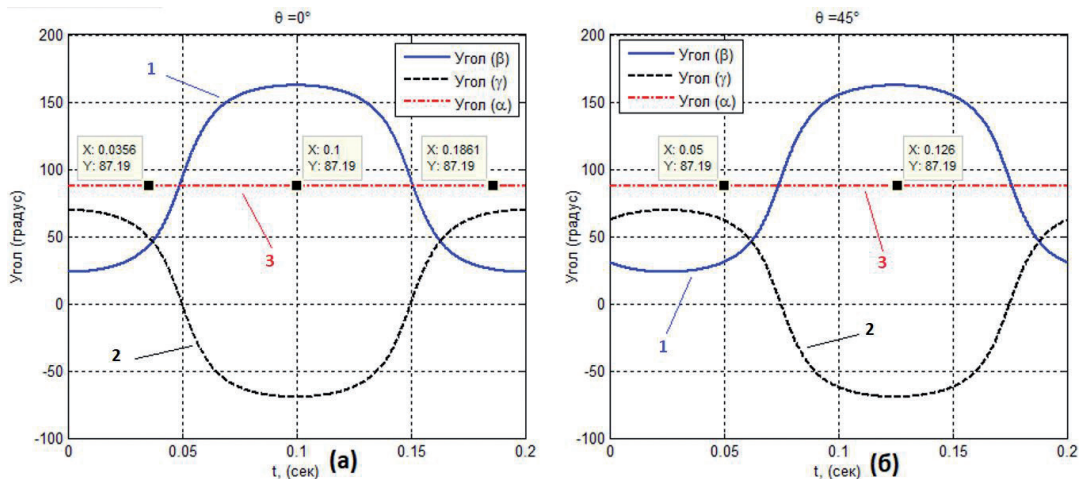


Рис. 2. Характер изменения углов β (кривая 1), γ (кривая 2) и α (кривая 3) при вращении ФЦА RM модуля.

и γ . Моделирование проводилось в следующих условиях: $d = 3$ м, $r = 8$ м, $\lambda = 3$ см, $D = 10$ км, $H = 500$ м, $\omega_r = 10 \pi$ рад/сек, $\varphi_0 = 0$, $Z_t = 10$ м, $\theta = 0^\circ$ (Рис. 2а); $\theta = 45^\circ$ (Рис. 2б).

Предоставленные результаты показывают, что углы β и γ меняются во времени при вращении РС реальной РМ антенны. В то же время угол визирования точечной цели α , равный $[\pi - (\beta + \gamma)]$, остается во времени неизменным. Также результаты показывают, что характер изменения углов β , γ не зависит от местоположения РТ и параметров d , r , λ , H и R_0 .

4. УСЛОВИЯ ОДНОЗНАЧНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ ОБЪЕКТА НАБЛЮДЕНИЯ

При использовании интерферометрической обработки для определения высоты рельефа возникает проблема неоднозначности, которая обусловлена тем, что фаза выходного сигнала фазового детектора, осуществляющего сравнения фаз принимаемых сигналов, изменяется в диапазоне от $-\pi$ до π : $\psi(t) \in [-\pi, \pi]$. Это обстоятельство необходимо учитывать при определении высоты цели, опираясь на изменение фазы выходного сигнала интерферометра.

Проведем определение условий, при которых будет обеспечиваться однозначность измерения высоты РТ. Для этого рассмотрим, как изменяется фаза $\psi(t)$ при заданном максимальном значении высоты $\psi_h(t)$ и при высоте, соответствующей нулевому уровню $\psi_0(t)$, и найдем их разность:

$$\psi_h(t) - \psi_0(t) = \frac{2\pi}{\lambda} (\Delta R_h(t) - \Delta R_0(t)), \quad (19)$$

где $\Delta R_0(t) = R_{1,0} - R_{2,0}(t)$; $\Delta R_h(t) = R_{1,h_{uniq}} - R_{2,h_{uniq}}(t)$; $R_{1,0}$ – расстояние от РТ приемно-передающей антенны до РТ₀, РТ₀ – точечная цель, высота которой считается равной нулю; $R_{2,0}$ – расстояние от РС приемной антенны до РТ₀; $R_{1,h_{uniq}}$ – расстояние от РС приемно-передающей антенны до РТ_{h_{uniq}}, РТ_{h_{uniq}} – точечная цель, высота которой задана в пределах диапазона однозначности измерения; $R_{2,h_{uniq}}$ – расстояние от РС приемной антенны до РС_{h_{uniq}} (см. Рис. 3). Выражение (19) можно переписать следующим образом

$$\Delta \psi_h(t) - \Delta \psi_0(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \left[(R_{1,h_{uniq}} - R_{1,0}) + (R_{2,0}(t) - R_{2,h_{uniq}}(t)) \right]. \quad (20)$$

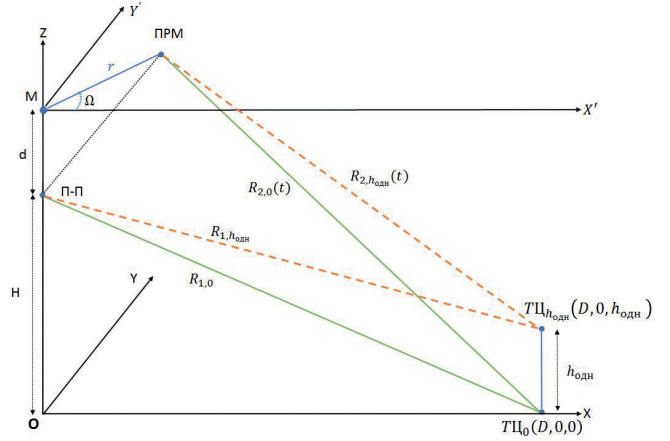


Рис. 3. Геометрические положения РС антенны и РТ с нулевой высотой и высотой, соответствующей максимальному значению в пределах однозначного измерения

Учитывая разложение $\sqrt{1+x} = 1 + \frac{1}{2}x - \frac{1}{8}x^2 \dots$ [7] и то, что $H, d, r \ll D$; $\varphi_0 = 0^\circ$, а $R_{1,0} = \sqrt{D^2 + H^2}$, получим

$$R_{1,h_{uniq}} - R_{1,0} \cong \frac{h_{uniq}^2}{2R_{1,0}} - \frac{Hh_{uniq}}{R_{1,0}} - \frac{(h_{uniq}^2 - 2Hh_{uniq})^2}{8R_{1,0}^3}, \quad (21)$$

$$R_{2,0}(t) - R_{2,h_{uniq}}(t) \cong \frac{h_{uniq}^2 - 2(H+d)h_{uniq}}{2R_{1,0}} - \frac{r \cos(\omega_r t) [h_{uniq}^2 - 2(H+d)h_{uniq}] \sqrt{R_{1,0}^2 - H^2}}{2R_{1,0}^3}. \quad (22)$$

В то же время, учитывая, что $h_{uniq}^4 \ll 8R_{1,0}^3$ и опираясь на (20)-(22), выражение (19) можно представить в виде

$$\psi_h(t) - \psi_0(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{dh_{uniq}}{R_{1,0}} + \frac{(H+d) \left(\sqrt{R_{1,0}^2 - H^2} \right) r \cos(\omega_r t) h_{uniq}}{R_{1,0}^3} \right]. \quad (23)$$

Для обеспечения однозначности измерения высоты, разность фаз выходного сигнала интерферометрической системы обработки должна удовлетворить условию $[\psi_h(t) - \psi_0(t) \leq \pi]$. При решении (23) получаем измеренное значение однозначной высоты наблюдаемой цели. Из выражения (23) следует, что однозначная измеренная высота связана с вращением РС приемной антенны. При этом однозначная высота зависит от переменных λ , r , H , d , ω_r и $R_{1,0}$ следующим образом

$$h_{uniq}(t) \cong \frac{\lambda R_{1,0}^3}{2 \left[dR_{1,0}^2 + r(H+d) \cos(\omega_r t) \sqrt{R_{1,0}^2 - H^2} \right]}. \quad (24)$$

Характер изменения $h_{\text{uniq}}(t)$ при варьировании переменных d, r, H приведен на Рис. 4-6.

Из результатов, представленных на Рис. 4-6 видно, что однозначная измеренная высота изменяется по периодическому закону. Причем наибольшее влияние на результат оценивания

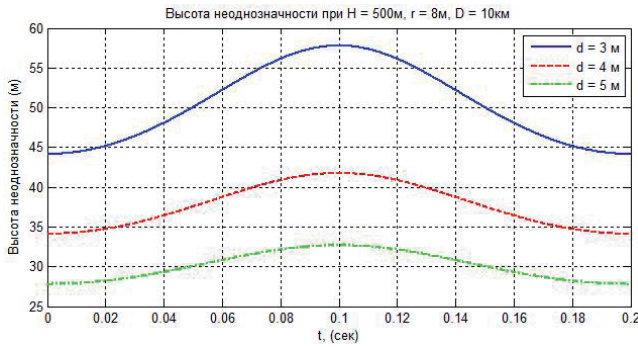


Рис. 4. Изменение однозначно измеряемой высоты в процессе вращения при $H = 500 \text{ м}, r = 8 \text{ м}, D = 10 \text{ км}$ и варьировании вертикального расстояния между РС реальных антенн: $d = 3, 4, 5 \text{ м}$.

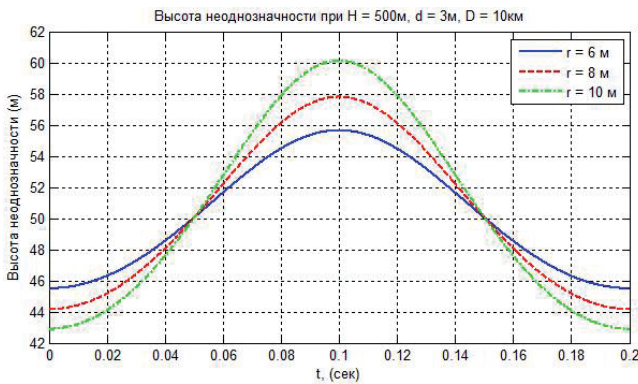


Рис. 5. Изменение однозначно измеряемой высоты в процессе вращения при $H = 500 \text{ м}, d = 3 \text{ м}, D = 10 \text{ км}$ и варьировании величины радиуса вращения РС приемной антенны.

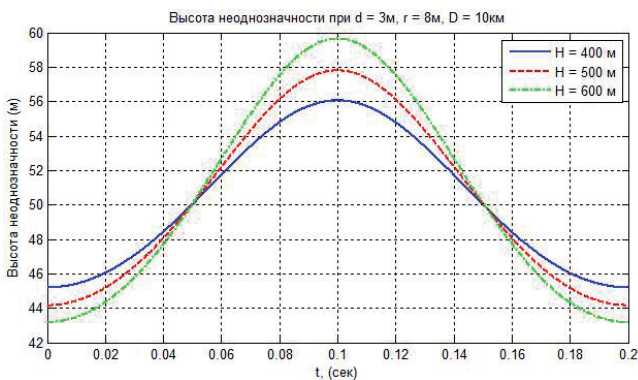


Рис. 6. Изменение однозначно измеряемой высоты в процессе вращения при $d = 3 \text{ м}, r = 8 \text{ м}, D = 10 \text{ км}$ и варьировании высоты носителя РАС: $H = 400, 500, 600 \text{ м}$.

высоты оказывает база интерферометра – вертикальное расстояние между РС реальных RM и RTM антенн. При этом максимальное значение величины $h_{\text{uniq}}(t)$ достигается при $t = 0.5 T$, где T – время, соответствующее одному обороту вращения ФЦА RM модуля, при котором угол между направлением на РС и положением приёмной антенны равен $\pi \text{ rad}$. В этой ситуации расстояние от РГ до РС RM антенны будет максимально возможным и, соответственно, разность $[\psi_h(t) - \psi_0(t)]$ – минимальной.

Так же из Рис. 5 и 6 видно, что максимальное значение $h_{\text{uniq}}(t)$ достигается при $t = 0.5 T$, когда $\omega_r t = \pi$. При значениях $\omega_r t = \pi/2$ и $\omega_r t = 3\pi/2$ (т.е. когда угол между РГ и RM антенной равен $\pi/2$ и $-\pi/2$ соответственно), высота однозначного измерения определяется одной и той же величиной, что позволяет констатировать: радиус вращения r и высота H носителя РАС не оказывают влияния на $h_{\text{uniq}}(t)$ при $t = 0.25 T$ и $0.75 T$.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что для устранения фазового набега, обусловленного вращением РС RM антенны, необходимо выбрать $t = 0.25 T$. В этом случае выражение (24) можно представить в виде

$$h_{\text{uniq}} \cong \frac{\lambda}{2d} R_{1,0}. \quad (25)$$

Выражение (25) показывает, что высота однозначного измерения обратно пропорционально величине d – вертикальному расстоянию между РС реальных антенн и прямо пропорционально длине волны зондирующего сигнала λ и дальности до цели $R_{1,0}$. В частности, при $\lambda = 3 \text{ см}, d = 3 \text{ м}, D = 10 \text{ км}, H = 500 \text{ м}$ получим $h_{\text{uniq}} \approx 50 \text{ м}$.

В дальнейшем будем полагать, что отчет высоты ведется при $t = 0.25 T$ или $\omega_r t = \pi/2 \text{ рад}$. В этом случае выражение (18) можно переписать в виде

$$Z_c = H - \frac{\left(\left(\frac{\lambda \psi_z(T_1)}{2\pi} \right)^2 + \frac{\lambda \psi_z(T_1)}{\pi} R_0 \right) - I^2}{2d}, \quad (26)$$

где $T_1 = 0.25 T$. Из выражения (26) непосредственно следует: какой информацией необходимо обладать для того, чтобы можно было определить высоту наземного объекта наблюдения.

5. АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ РЕЛЬЕФА НАБЛЮДАЕМОЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Из полученных результатов, следует, что для определения высоты H рельефа наблюдаемой поверхности необходимо выполнить следующие шаги:

1. Определить разность фаз $\psi_h(m, n)$ принятых сигналов от наблюдаемого объекта (рельефа) на выходе системы обработки (на выходе фазового детектора (PD)) в каждом элементе разрешения по азимуту и дальности, где m, n – текущие номера элементов разрешения по дальности и азимуту, соответственно. Поскольку $\psi_h(m, n) = \varphi \pm 2\pi N$ является периодической, что необходимо определить количество целых периодов обращения фазы N .
2. Определить разность фаз $\psi_0(m, n)$ сигналов на выходе, соответствующую нулевой высоте для каждого элемента разрешения.

$$\psi_0(m, n) = \frac{2\pi}{\lambda} (R_{1,0}(m, n) - R_{2,0}(m, n)).$$

В виду того, что расстояние $R_{1,0}(m, n)$ на практике неизвестно, проводим его вычисления, используя $R_{1,h}(m, n)$, в результате получаем

$$\psi_0(m, n) \cong \frac{\pi}{\lambda} \left(\frac{I^2 + 2dH}{R_{1,h}(m, n)} \right), \quad (27)$$

где I – база интерферометра. Данная фаза также является периодической функцией, поэтому необходимо оценить количество целых периодов обращения фазы.

3. Определить высоту рельефа $h(m, n)$, опираясь на (26) в предположении, что $\omega_f t = \pi/2$ и $\theta = 0$ градусов, получим

$$h(m, n) = z_h(m, n) - z_0(m, n), \quad (28)$$

$$h(m, n) \cong \frac{\lambda^2}{8\pi^2 d} (\psi_0^2(m, n) - \psi_h^2(m, n)) + \frac{\lambda}{2\pi d} (\psi_0(m, n) - \psi_h(m, n)) R_{1,h}(m, n), \quad (29)$$

$$h(m, n) \cong \frac{\lambda}{2\pi d} (\psi_0(m, n) - \psi_h(m, n)) R_{1,h}(m, n). \quad (30)$$

Выражение (30) собственно и содержит всю информацию, необходимую для определения высоты рельефа при вращении РС приемной

антенны и разнесении антенны приемо-передающего модуля, а именно: дальность до цели $R_{1,h}(m, n)$, разность фаз $\psi_h(m, n)$ принимаемых сигналов на выходе системы обработки и параметры r, d, H, λ , определяющие условия наблюдения.

Определение однозначной фазы (раскрытие разности фаз) выполняется с помощью алгоритма, представленного в [8], суть которого сводится к интегрированию разницы фаз между двумя соседними элементами разрешения при условии, что данная разность не превосходит значение π , а также отсутствуют резкие перепады высот рельефа. В противном случае возникает большое число оборотов фазы. Более подробно с данным алгоритмом можно познакомиться в [9].

Проверка работоспособности алгоритма осуществлялась путем компьютерного моделирования. Первоначально в среде моделирования был сформирован рельеф участка земной поверхности, который представлен на **Рис. 7**. Рельеф имеет скачки высоты от 0 м до 50 м в пределах шкалы дальности от 10 км до 15 км с шагом по дальности 50 м. Диапазон измерения высоты соответствует половине однозначного ее измерения.

При моделировании полагалось, что $d = 3$ м, $H = 500$, $r = 8$ м, $\lambda = 3$ см, затем в соответствии с описанным ранее алгоритмом было проведено формирование РЛИ наблюдаемого рельефа.

На первом шаге алгоритма проводилось определение разности фаз $\psi_h(m, n)$ принимаемых сигналов в пределах каждого элемента разрешения (**Рис. 8а**), а затем выполнялось определение однозначной фазы с помощью

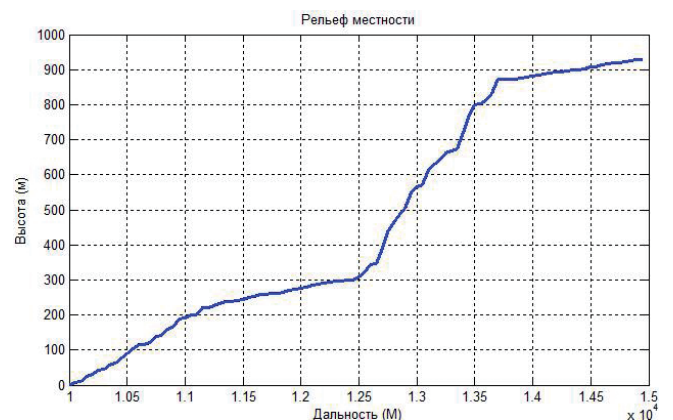


Рис. 7. Смоделированный рельеф земной поверхности.

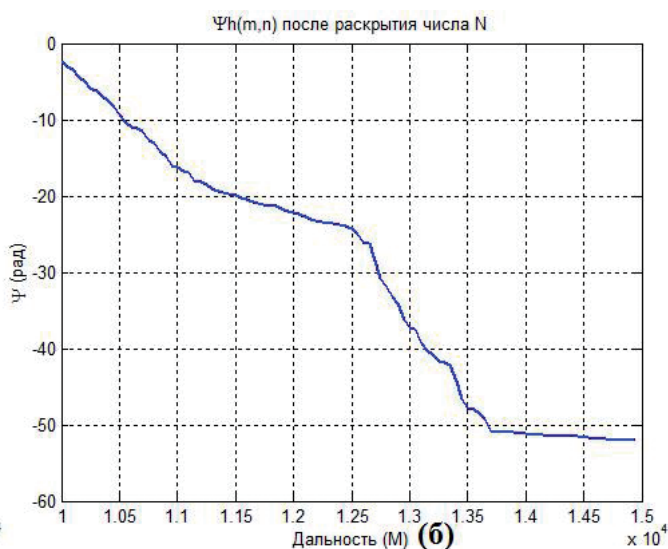
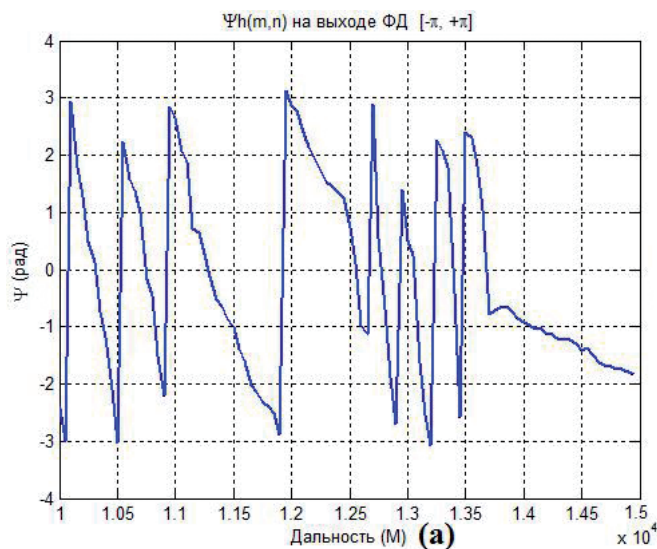


Рис. 8. Разность фаз $\psi_h(m,n)$ принимаемых сигналов на выходе PD до (а) и после(б) обработки.

алгоритма, представленного в [8]. Результаты обработки показаны на Рис 8б.

На втором шаге проводилось определение разности фаз для плоской поверхности Земли в каждом элементе разрешения на заданной дальности на основе выражения (27) и определение однозначной фазы $\psi_0(m,n)$. Результаты работы алгоритма на втором шаге проведены на Рис. 9.

На третьем шаге, опираясь на выражение (18), выполнялось определение высоты рельефа как разность высот $z_h(m,n)$ и $z_0(m,n)$ в пределах элементов разрешения по дальности и азимуту. При этом полагалась, что момент времени $t = 0.25 T$ (т.е. $\omega t = \pi/2$). В этом случае выражение для $z_h(m,n)$ и $z_0(m,n)$ можно представить в виде $z_h(m,n) =$

$$= H - \left(\frac{\left(\left(\frac{\lambda \psi_h(m,n)}{2\pi} \right)^2 + \frac{\lambda \psi_h(m,n)}{\pi} R_{1,h}(m,n) \right) - I^2}{2d} \right) \quad (31)$$

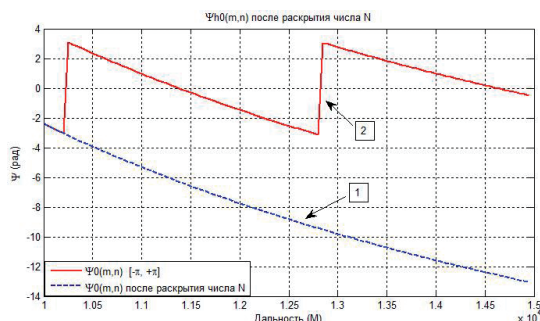


Рис. 9. Разность фаз $\psi_0(m,n)$ отраженных сигналов, соответствующая плоской поверхности Земли до (кривая 1) и после (кривая 2) обработки.

$$z_0(m,n) =$$

$$= H - \left(\frac{\left(\left(\frac{\lambda \psi_0(m,n)}{2\pi} \right)^2 + \frac{\lambda \psi_0(m,n)}{\pi} R_{1,h}(m,n) \right) - I^2}{2d} \right) \quad (32)$$

На Рис. 10 представлены результаты вычисления $z_h(m,n)$ (кривая 1) и $z_0(m,n)$ (кривая 2) в пределах фиксированного элемента разрешения по азимуту.

На Рис. 11 приведено 3-х мерное изображение наблюдаемого рельефа местности, сформированное в режиме синтеза апертур антенны при вращении приемной антенны и фиксированном положении ФЦ антенны RTM модуля при использовании рассмотренного алгоритма.

Для оценки точности формирования рельефа разработанным алгоритмом проводилось

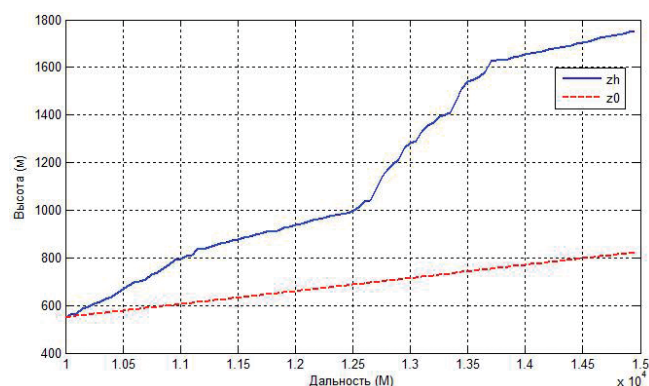


Рис. 10. Рельеф местности $z_h(m,n)$ (1) и составляющая $z_0(m,n)$, соответствующая нулевой высоте поверхности Земли (2), вдоль шкалы дальности от 10 км до 15 км для одного элемента разрешения по азимуту.

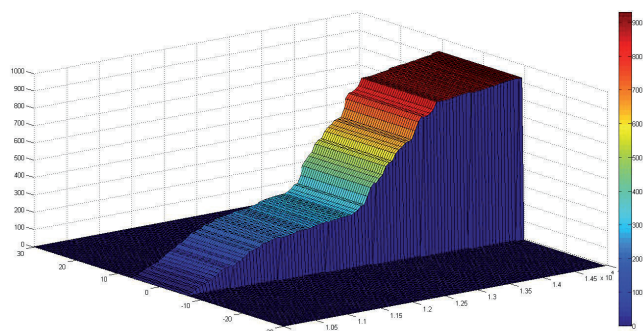


Рис. 11. Трехмерное изображение смоделированного рельефа местности.

определение погрешности в вычислении высоты рельефа по отношению к используемой его модели. Результаты определения погрешности формирования рельефа представлены на Рис. 12, на котором представлен характер изменения данной погрешности по шкале дальности в пределах вариации высоты модельного рельефа.

Из Рис. 12 видно, что погрешность восстановления высоты рельефа соответствует тысячным долям метра, что позволяет утверждать: разработанный алгоритм адекватно восстанавливает рельеф наблюдаемой поверхности. В тоже время необходимо отметить, что полученные результаты соответствуют ситуации, при которой не учитывались шумы наблюдения и возможные ошибки в определении параметров r , d и H .

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представленные в статье результаты показывают, что при синтезировании апертуры антенны за счет вращения РС антенны приёмного модуля и разнесенном, но стационарном положении антенны RTM модуля, возможно формирование трехмерных

изображений наблюдаемой земной поверхности. Формирование трехмерных изображений обеспечивается за счет интерферометрической обработки принимаемых сигналов в двух разнесенных относительно друг друга точках приема. При этом ошибки в восстановлении рельефа соответствуют тысячным долям метра. Исследование влияния параметров r , H и d на однозначность измерения высоты, а также результаты моделирования показали, что наибольшее влияние на процесс восстановления рельефа наблюдаемой поверхности оказывает вертикальное расстояние d между РС приемопередающей антенны и плоскостью вращения РС приемной антенны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондратенков ГС, Фролов АЮ. *Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли*. М., Радиотехника, 2006, 368 с., ISBN 588070-071-2.
2. Антипов В Н, Викентьев Ф Ю, Колтышев ЕЕ, Кондратенков ГС, Лавров АА, Фролов АЮ, Янковский ВТ. *Авиационные системы радиовидения*. М., Радиотехника, 2015, 648 с., ISBN 978-5-93108-105-2.
3. Верба ВС, Татарский БГ, Майстренко ЕВ. Новые технологии радиолокационного мониторинга земной поверхности для носителей вертолетного типа. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал], 2018, №2. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb18/4/text/pdf>.
4. Кошелев ВИ, Кирдяшкин ВВ, Сычев МИ, Ясенцев ДА. *Актуальные вопросы радиолокации*. М., МАИ, 2016, 215 с. ISBN 978-5-4316-0353-2.
5. Шимкин ПЕ. Однопроходный бортовой интерферометрический радиолокатор с синтезированной апертурой антенны переднебокового обзора для оценки рельефа подстилающей поверхности. *Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук*. М., НИУ МЭИ, 2018.
6. Верба ВС, Татарский БГ (eds.) *Комплексы с беспилотными летательными аппаратами в 2-х кн.: Кн. 1. Принципы построения и особенности применения комплексов с БЛА*. М., Радиотехника, 2016, 502 с. ISBN 978-5-93108-135-9.

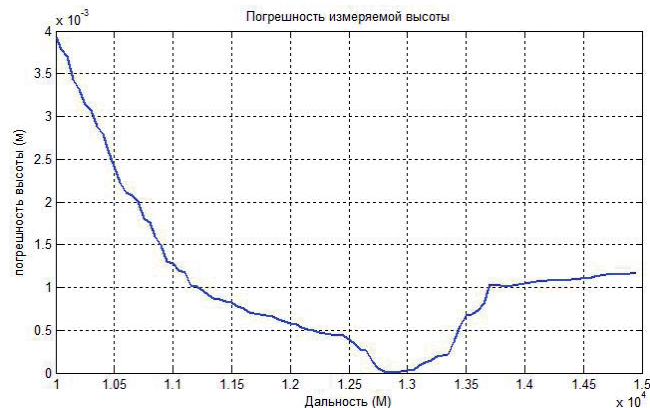


Рис. 12. Изменения погрешности формирования рельефа вдоль шкалы дальности от 10 км до 15 км.

7. Двайт ГБ. *Таблицы интегралов и другие математические формулы*. М., Наука, Физматлит, 1983, 228 с.
8. Goldstein RM, Zebker HA, Werner CL. Satellite radar interferometry: Two-Dimensional Phase Unwrapping. *Radio Science*, 1988, 23(4):713-720. DOI: 10.1029/RS023i004p00713.
9. Ian Hertzberg, Marcus Poggi, Thibaut Vidal. Two-Dimensional Phase Unwrapping via Balanced Spanning Forests. *Infors Journal on Computing*, 2019, 31(3):527-543. DOI: 10.1287/ijoc.2018.0832.

Татарский Борис Григорьевич

д.т.н., проф.

Московский авиационный институт

4, Волоколамское ш., Москва 125993, Россия

E-mail: boris-tatarsky@inbox.ru

Панас Андрей Иванович

д.ф.м.н., проф.

НПП "Исток" им. А.И. Шокина

2а, ул. Вокзальная, Фрязино 141190, Московская обл., Россия

E-mail: aipanas@istokmw.ru

Нажжар Таммам

аспирант

Московский авиационный институт

4, Волоколамское ш., Москва 125993, Россия

E-mail: tnajjar23551@gmail.com.