



УДК 621.396.96

© 2008

Член-корреспондент НАН України Д. М. Ваврив,
А. А. Безвесильный, В. В. Виноградов, Е. В. Духопельникова

**Нахождение рельефа поверхности Земли
по высокоточным измерениям доплеровского центроида
с помощью самолетного радиолокатора
с синтезированной апертурой**

A novel method is proposed for retrieving the Earth surface topography by using a squint-mode airborne synthetic aperture radar with a single antenna. The idea of the method is based on the fact that the spatial location of a resolution cell on the ground can be found as the intersection of the range sphere, the Doppler cone, and the elevation plane of the antenna pattern. The method requires high-accuracy Doppler centroid measurements for each resolution cell by the backscattered signal, as well as accurate measurements of the antenna beam orientation angles.

1. Для нахождения рельефа поверхности Земли обычно применяются стереоскопические [1, 2] или интерферометрические [3–5] методы, в которых информация о пространственном положении участка местности извлекается из разности расстояний от двух антенн до этого участка. В данной работе предлагается новый метод нахождения рельефа местности с помощью самолетного радиолокатора с синтезированной апертурой с одной антенной, который работает в режиме переднебокового обзора. В отличие от выше названных известных методов, в предлагаемом методе информация о рельефе извлекается из средней доплеровской частоты отраженного сигнала, которая называется доплеровским центроидом. Для нахождения рельефа доплеровский центроид должен измеряться с высокой точностью для каждого элемента разрешения. Кроме того, метод требует точного измерения углов ориентации луча антенны. В работе рассмотрены теоретические основы метода и приведены результаты экспериментальной проверки метода по радиолокационным данным, которые были получены с помощью самолетного радиолокатора с синтезированной апертурой [6].

2. **Геометрическая интерпретация метода нахождения рельефа.** Как известно, радиолокационный сигнал, отраженный от поверхности Земли и принятый самолетным радиолокатором с синтезированной апертурой, обладает свойствами сигнала с приближенно линейной модуляцией по доплеровской частоте. Так происходит потому, что по мере перемещения рассеивающего элемента поверхности Земли через луч антенны меняется проекция его относительной скорости на радиальное направление, и, следовательно, меняется



Рис. 1. Геометрическая интерпретация метода нахождения рельефа

его мгновенная доплеровская частота. Доплеровский центроид обычно измеряется как средняя доплеровская частота спектра мощности отраженного радиолокационного сигнала. При этом доплеровский центроид равен мгновенной доплеровской частоте рассеивающего элемента поверхности, когда тот пересекает плоскость диаграммы направленности антенны по углу места.

Дальность до выбранного элемента разрешения на поверхности Земли всегда известна, поэтому точное измерение доплеровского центроида позволяет найти пространственное положение элемента разрешения как пересечение сферы дальности, доплеровского конуса (поверхности одинаковой доплеровской частоты) и плоскости диаграммы направленности антенны по углу места. Такова геометрическая интерпретация предлагаемого метода нахождения рельефа.

Геометрия задачи показана на рис. 1. Локальная система координат выбрана так, что ось Z направлена вертикально вверх, плоскость XY совпадает с опорной плоскостью Земли. Ось X в каждый момент времени направлена вдоль горизонтальной компоненты вектора скорости самолета, так что $\mathbf{V} = (V_X, 0, V_Z)$. Вектор наклонной дальности $\mathbf{R} = (x, y, -H + h)$ направлен от самолета, расположенного в точке $C(0, 0, H)$, до точки на поверхности Земли $P_h(x, y, h)$. Высота h описывает рельеф местности по отношению к опорной плоскости XY . Линия AB на рис. 1 показывает пересечение плоскости диаграммы направленности антенны ABC по углу места и опорной плоскости Земли.

Уравнения сферы дальности, плоскости диаграммы направленности по углу места и доплеровского конуса имеют вид, соответственно,

$$|\mathbf{R}| = R, \quad (1)$$

$$(\mathbf{N} \cdot \mathbf{R}) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{(\mathbf{R} \cdot \mathbf{V})}{|\mathbf{R}|} = \frac{\lambda}{2} F_{DC}. \quad (3)$$

Здесь R — радиус сферы дальности; λ — длина волны радиолокатора, а F_{DC} — доплеровский центроид.

Ориентация плоскости диаграммы направленности по углу места описывается вектором нормали \mathbf{N} к плоскости, который определяется углами тангажа и рыскания, обозначенными α и β , соответственно, и показанными на рис. 1. Используя матрицу вращения, для вектора нормали находим:

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \sin \alpha \cos \beta & \sin \beta \\ -\cos \alpha \sin \beta & -\sin \alpha \sin \beta & \cos \beta \\ \sin \alpha & -\cos \alpha & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta \\ -\cos \alpha \sin \beta \\ \sin \alpha \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Знаки углов тангажа и рыскания выбраны так, что положительные углы означают вынос луча антенны вперед по отношению к нормали к траектории самолета (режим переднебокового обзора).

Векторные уравнения (1)–(3) можно записать в координатной форме:

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + (H - h)^2}, \quad (5)$$

$$x \cos \beta - y \sin \beta - (H - h) \tan \alpha = 0, \quad (6)$$

$$\frac{xV_X - (H - h)V_Z}{R} = \frac{\lambda}{2}F_{DC}. \quad (7)$$

Решая систему уравнений (5)–(7), можно найти координаты точки $P_h(x, y, h)$, которая представляет собой пересечение сферы дальности, плоскости диаграммы направленности по углу места и доплеровского конуса:

$$x = (H - h) \tan \alpha \cos \beta + \sin \beta \sqrt{R^2 - \frac{(H - h)^2}{(\cos \alpha)^2}}, \quad (8)$$

$$y = -(H - h) \tan \alpha \sin \beta + \cos \beta \sqrt{R^2 - \frac{(H - h)^2}{(\cos \alpha)^2}}, \quad (9)$$

$$\frac{\lambda F_{DC}}{2} \frac{V_Z}{V_X} R = (H - h) \tan \alpha \cos \beta + \sin \beta \sqrt{R^2 - \frac{(H - h)^2}{(\cos \alpha)^2}} - (H - h) \frac{V_Z}{V_X}. \quad (10)$$

Уравнение (10) связывает доплеровский центроид F_{DC} и высоту h элемента разрешения радиолокационного изображения. Это уравнение может быть преобразовано в квадратное уравнение относительно высоты h , и два его решения имеют вид (для простоты считаем здесь $V_Z = 0$):

$$\frac{H - h_{\pm}}{R} = \frac{\left(\frac{\lambda F_{DC}}{2} \frac{V_Z}{V_X}\right) \tan \alpha \cos \beta \pm \sin \beta \sqrt{(\tan \alpha)^2 + (\sin \beta)^2 - \left(\frac{\lambda F_{DC}}{2} \frac{V_Z}{V_X}\right)^2 \frac{1}{(\cos \alpha)^2}}}{(\tan \alpha)^2 + (\sin \beta)^2}. \quad (11)$$

Как можно видеть из (11), для нахождения рельефа требуется переднебоковой обзор $\alpha \neq 0$ и/или $\beta \neq 0$.

Два решения имеют следующий геометрический смысл. Плоскость диаграммы направленности по углу места проходит через вершину доплеровского конуса, а их пересечение — это две полупрямые, которые пересекают сферу дальности в двух точках. Выбор нужного решения можно сделать, используя известную среднюю высоту полета H , которая определяет опорную плоскость Земли.

Скорость самолета \mathbf{V} , углы тангажа и рыскания α и β и средняя высота полета H измеряются, как правило, с помощью специальной навигационной системы, установленной на самолете. Доплеровский центроид должен быть измерен для каждого элемента разрешения по отраженным радиолокационным сигналам, так как именно в центроиде содержится информация о рельефе местности.

3. Нахождение рельефа по отклонениям доплеровского центроида. Наряду с геометрической интерпретацией, рассмотренной выше, есть и другая интерпретация пред-

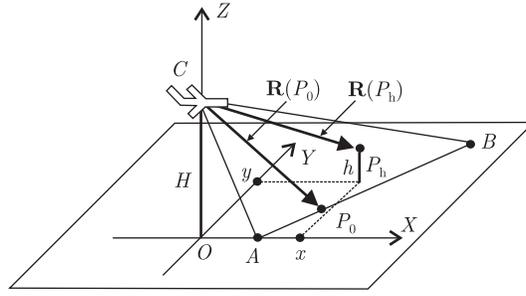


Рис. 2. Отклонения доплеровского центроида из-за рельефа местности

ложенного метода нахождения рельефа, а именно: вариации высоты местности $h \neq 0$ приводят к отклонениям $\Delta F_{DC}(h)$ измеренного доплеровского центроида $F_{DC}(H-h)$ от значений доплеровского центроида $F_{DC}(H)$, которые ожидаются для плоской поверхности $h = 0$.

Исходя из (10), для отклонений доплеровского центроида получаем:

$$\begin{aligned} \Delta F_{DC}(h) &= F_{DC}(H-h) - F_{DC}(H) = \\ &= \frac{2V_X}{\lambda R} \left[-h \tan \alpha \cos \beta + h \frac{V_Z}{V_X} + \sin \beta \left(\sqrt{R^2 - \frac{(H-h)^2}{(\cos \alpha)^2}} - \sqrt{R^2 - \frac{H^2}{(\cos \alpha)^2}} \right) \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

Появление отклонений доплеровского центроида, вызванных рельефом, поясняется на рис. 2. Радиальное направление от самолета до точки P_h , расположенной на высоте h , описывается вектором наклонной дальности $\mathbf{R}(P_h)$. Это радиальное направление отличается от направления, которое описывается вектором $\mathbf{R}(P_0)$ до точки P_0 , расположенной на опорной плоскости Земли $h = 0$, на линии AB , хотя дальность до этих точек одинаковая: $|\mathbf{R}(P_h)| = |\mathbf{R}(P_0)|$. Таким образом, в случае переднебокового обзора, две точки, расположенные в плоскости диаграммы направленности на одной дальности, но на различной высоте, имеют разный доплеровский центроид.

Если вариации высоты рельефа невелики, $h/H \ll 1$, то выражение (12) для отклонений доплеровского центроида можно приближенно записать в виде:

$$\Delta F_{DC}(h) \approx \left(\frac{2V_X}{\lambda R} \right) h \left[-\tan \alpha \cos \beta + \frac{V_Z}{V_X} + \frac{H}{(\cos \alpha)^2} \frac{\sin \beta}{\sqrt{R^2 - H^2/(\cos \alpha)^2}} \right]. \quad (13)$$

В этом приближении отклонения доплеровского центроида $\Delta F_{DC}(h)$ просто пропорциональны вариациям высоты местности h . Следует отметить, что, полагая вариации высоты h малыми, мы неявно выбираем правильное из двух решений (11).

Как уже отмечалось выше, предложенный метод нахождения рельефа работает только в случае переднебокового обзора: при установке антенны углы тангажа и рыскания должны быть выбраны так, чтобы коэффициент пропорциональности в (13) был достаточно большим. Тогда вариации высоты рельефа приводят к заметным отклонениям доплеровского центроида, которые могут быть измерены. Например, для $\lambda = 0,02$ м, $V_X = 50$ м/с, $H = 1500$ м, $\alpha = -10^\circ$, $\beta = 25^\circ$ коэффициент пропорциональности в (13) меняется от 3,6 Гц/м на дальности $R = 1650$ м до 0,8 Гц/м на дальности $R = 2800$ м. Следует отметить, что с увеличением дальности коэффициент пропорциональности в (13) убывает, и, следовательно, ослабевает зависимость отклонений доплеровского центроида от вариаций рельефа.

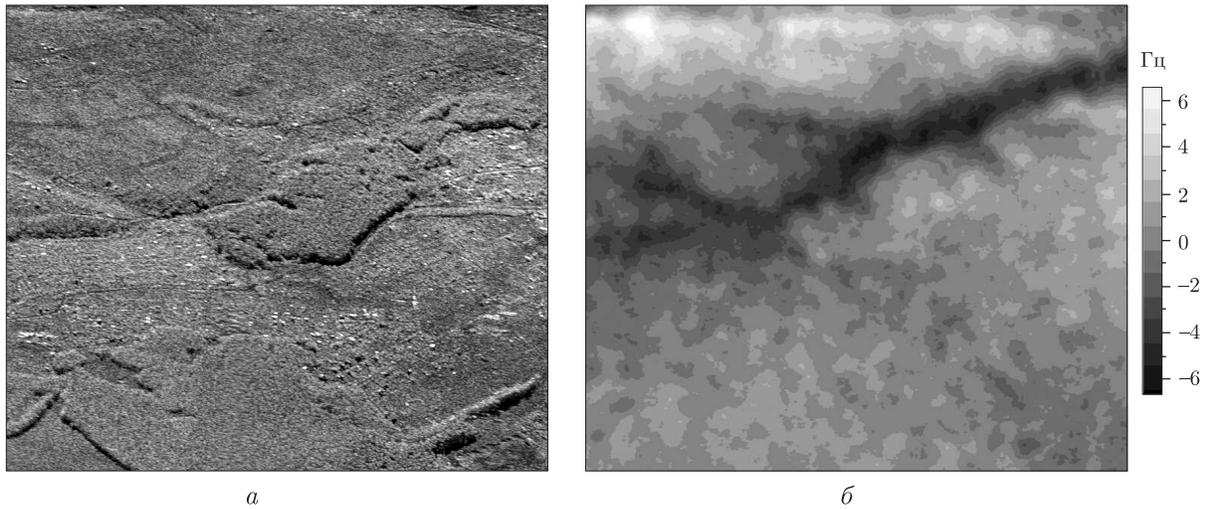


Рис. 3. Радиолокационное изображение тестового участка местности (а) и изображение измеренных отклонений доплеровского центроида (б)

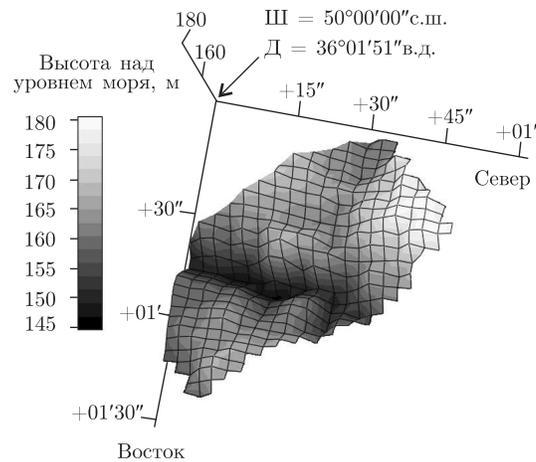


Рис. 4. Найденный рельеф местности

4. Экспериментальная проверка предложенного метода. Предложенный метод нахождения рельефа поверхности Земли был проверен экспериментально по радиолокационным данным, полученным с помощью самолетного радиолокатора с синтезированной апертурой [6]. Радиолокационное изображение тестового участка местности (размером примерно 1 км на 1 км, с разрешением 3 м на 3 м) приведено на рис. 3, а. Измеренные отклонения доплеровского центроида от значений центроида, рассчитанных для опорной плоскости Земли, показаны на рис. 3, б. Найденный рельеф местности показан на рис. 4 в географических координатах широта — долгота.

Важнейшим моментом в предложенном методе нахождения рельефа является точное измерение доплеровского центроида с высоким пространственным разрешением. Хотя существует много методов оценивания доплеровского центроида по отраженным радиолокационным сигналам [7, 8], следует отметить, что для оценивания центроида с высоким пространственным разрешением подходит не всякий метод. Например, оценивание центроида по

доплеровскому спектру отраженного сигнала здесь не применимо, поскольку такой подход дает значительные ошибки оценивания вблизи границ, ярких точек и других контрастных элементов радиолокационного изображения.

В наших экспериментах был применен метод измерения доплеровского центроида, подобный методу, описанному в работе [9], однако вместо субапертурных сигналов мы использовали отдельные изображения-“взгляды”, формируемые при многовзглядовой обработке. Такой метод обеспечил точность измерения доплеровского центроида около 0,5 Гц при разрешении по дальности и азимуту около 50 м.

Радиолокационная система, использованная в экспериментах, не была изначально спроектирована для измерения рельефа местности. Во время тестового полета углы тангажа и рыскания были всего лишь $\alpha = 2^\circ$ и $\beta = 12^\circ$. Для таких значений углов коэффициент пропорциональности в (13) принимает значения от 1,0 Гц/м до 0,14 Гц/м (на дальностях от 1650 м до 2800 м). Кроме того, радиолокационная система не была оснащена системой точного измерения углов ориентации антенны. Вместо этого углы ориентации определялись по отраженным радиолокационным сигналам [6, 10]. В результате, точность измерения высоты составила около 10 м.

Тем не менее, представленные экспериментальные результаты качественно подтверждают теоретически предсказанную возможность находить рельеф местности по высокоточным доплеровским измерениям с помощью радиолокатора с синтезированной апертурой, который работает в режиме переднебокового обзора. Использование режима переднебокового обзора со значительным выносом луча антенны вперед (например, $\alpha = -10^\circ$ и $\beta = 45^\circ$), а также применение высокоточной, калиброванной системы измерения углов ориентации луча антенны позволит находить рельеф поверхности Земли с точностью по высоте порядка 1 м.

1. *Leberl F. W.* Radargrammetric image processing. – Boston, MA: Artech House, 1990.
2. *Yocky D. A., Wahl D. E., Jakowatz C. V. Jr.* Terrain elevation mapping results from airborne spotlight-mode coherent cross-track SAR stereo // *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing.* – 2004. – **42**, No 2. – P. 301–308.
3. *Zebker H. A., Goldstein R. M.* Topographic mapping from interferometric SAR observations // *J. of Geophys. Research.* – 1986. – **91**, No B5. – P. 4993–4999.
4. *Bamler R., Hartl P.* Synthetic aperture radar interferometry // *Inverse Problems.* – 1998. – **14**, No 4. – P. R1–R54.
5. *Rosen P. A., Hensley S., Joughin I. R. et al.* Synthetic aperture radar interferometry // *Proc. of the IEEE.* – 2000. – **88**, No 3. – P. 333–382.
6. *Vavriv D. M., Vynogradov V. V., Volkov V. A. et al.* Cost-effective airborne SAR // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2006. – **11**, No 3. – С. 276–297.
7. *Li F.-K., Held D. N., Curlander J. C., Wu C.* Doppler parameter estimation for spaceborne synthetic-aperture radars // *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing.* – 1985. – **GRS-23**, No 1. – P. 47–56.
8. *Madsen S. N.* Estimating the Doppler centroid of SAR data // *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems.* – 1989. – **25**, No 2. – P. 134–140.
9. *Moreira A.* Real-time synthetic aperture radar (SAR) processing with a new subaperture approach // *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing.* – 1992. – **30**, No 4. – P. 714–722.
10. *Безвесильный А. А., Ваврив Д. М., Виноградов В. В.* Оценивание доплеровского центроида и автофокусировка в самолетном радиолокаторе бокового обзора с синтезированной апертурой // *Доп. НАН України.* – 2005. – № 9. – С. 77–83.