

Векторно-координатный подход к определению геометрии визирования при учете влияния крупномасштабных неровностей поверхности суши на ее СВЧ излучательные свойства

И.В. Мателенок¹, В.В. Мелентьев^{1,2}

¹*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Россия*

E-mail: igor_matelenok@mail.ru

²*Международный центр содействия реализации программ и проектов ЮНИДО Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*

Санкт-Петербург, 195251, Россия

E-mail: vv.melentyev@mail.ru

Разработан векторно-координатный подход к определению геометрии визирования при дистанционных СВЧ радиометрических измерениях, позволяющий осуществлять расчет значений эффективного угла визирования и угла поворота плоскостей поляризации на основе координат точек на визирующем луче. Благодаря этому подход одинаково применим для учета влияния крупномасштабных неровностей поверхности суши на ее СВЧ излучательные свойства как при спутниковых, так и при авиационных измерениях. Апробация подхода проведена на тестовом участке в северо-восточной Якутии для геометрии визирования сенсора AMSR-E. Показано, что значения параметров геометрии визирования, необходимых для коррекции данных дистанционных СВЧ измерений, эффективно восстанавливаются с помощью предложенного подхода по цифровым моделям рельефа. Результаты расчетов значений эффективного угла визирования для орбиты ИСЗ Aqua полностью согласуются с результатами расчетов, выполненных с помощью традиционного векторно-углового подхода. В пределах тестового участка с диапазоном изменения высот от 0 до 527 м эффективный угол визирования принимает значения от 29,8 до 85,5° (среднее значение равно 54,2° при СКО = 6,6°), модуль угла поворота плоскостей поляризации – от 0 до 29,7° (среднее значение равно 4,4° при СКО = 4,9°).

Ключевые слова: дистанционное зондирование, радиояркостная температура, рельеф, СВЧ радиометр, угол визирования, уклон, фацеты, шероховатость, экспозиция.

Введение

Коническое сканирование, применяемое в большинстве современных спутниковых СВЧ радиометров, позволяет минимизировать изменение угла визирования при съемке участков земной поверхности, находящихся на разном удалении от трассы полета ИСЗ. Тем не менее, крупномасштабные неровности, размеры которых на несколько порядков превышают рабочую длину волны, могут оказывать существенное влияние на СВЧ излучательные свойства земной поверхности за счет изменения геометрии визирования. К основным воздействиям, оказываемым такими неровностями на параметры принимаемого спутниковым сенсором излучения, относится локальное изменение угла визирования и поворот плоскостей V- и H-поляризации, эффект «радиотени», изменение длины пути излучения в атмосфере.

Состояние проблемы

Разработка методов учета шероховатости земной поверхности при дистанционных СВЧ измерениях активно велась с применением факетной теории в 1970-е – 1980-е гг. (Марцинкевич, Мелентьев, 1975). Современные подходы к учету влияния крупномасштабных неровностей поверхности суши на ее СВЧ излучательные свойства (Matzler, Standley, 2000; Pulvirenti et al., 2008; Ying et al., 2011) основаны на описании геометрии визирования в декартовой системе координат, предложенном в классических работах (Богородский, Козлов, 1985; Schanda, 1986). Применяемые в этих случаях базисы предполагают отсчет «горизонтальных» углов от проекции визирующего луча на плоскость XOY , касательную к поверхности эллипсоида в точке пересечения оси диаграммы направленности антенны с земной поверхностью. Согласно (Matzler, Standley, 2000) эффективный (локальный) угол визирования $\theta_{эфф}$ в такой системе координат определяется следующим образом: $\cos \theta_{эфф} = \sin \theta \sin(slope) \cos \psi + \cos \theta \cos(slope)$, где θ – угол визирования, ψ – угол между проекцией нормали к элементарной площадке и проекцией визирующего луча на XOY , $slope$ – уклон элементарной площадки. Угол поворота плоскостей поляризации ξ находится из формулы $\sin \xi = \sin \psi \sin(slope) / \sin \theta_{эфф}$. Угол ψ в рамках такого «векторно-углового» подхода может быть определен в ходе дополнительных вычислений по информации об азимуте визирующего луча относительно плоскости меридиана при спутниковом СВЧ зондировании, предоставляемой организациями-операторами спутниковой съемки. При авиационных СВЧ измерениях для определения ψ требуется организация вспомогательных расчетов по данным глобального позиционирования авиаплатформы.

Цель и задачи

Целью работы является совершенствование методологии учета влияния крупномасштабных неровностей поверхности суши на ее СВЧ излучательные свойства путем разработки альтернативного векторно-координатного подхода к определению геометрии визирования. Достижение цели обеспечивается решением задач по разработке математической основы подхода и выводу выражений для вычисления значений эффективного угла визирования и угла поворота плоскостей поляризации по данным о координатах точек на визирующем луче, созданию на основе выражений методики восстановления значений параметров геометрии визирования, апробации разработанного подхода в численных экспериментах по определению геометрии визирования для типового случая зондирования тестового участка с помощью спутникового СВЧ радиометра AMSR-E.

Используемые данные и исследуемый участок

Апробация разрабатываемого подхода осуществляется на полигонном тундровом участке размером 25 * 25 км, расположенном в северо-восточной Якутии вблизи пос. Черский (координаты центра 69,00° с.ш., 161,75° в.д.). Расчет значений уклонов и экспозиций для элементарных площадок в пределах данного участка выполняется на основе цифровой модели рельефа (ЦМР) The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM30).

Вывод выражений для расчета значений эффективного угла визирования и угла поворота плоскостей поляризации

В рамках разрабатываемого подхода «глобальная» система координат определяется координатами плоскости XOY , касательной к поверхности эллипсоида Земли в точке пересечения ее с визирующим лучом (осью диаграммы направленности антенны), и координатами прямой, по которой XOY пересекается с плоскостью меридиана. Положение визирующего луча в «глобальной» системе координат задается углами α и β , при этом геометрия визирования для произвольной ориентации плоскости элементарной площадки Ω соответствует показанной на рис. 1.

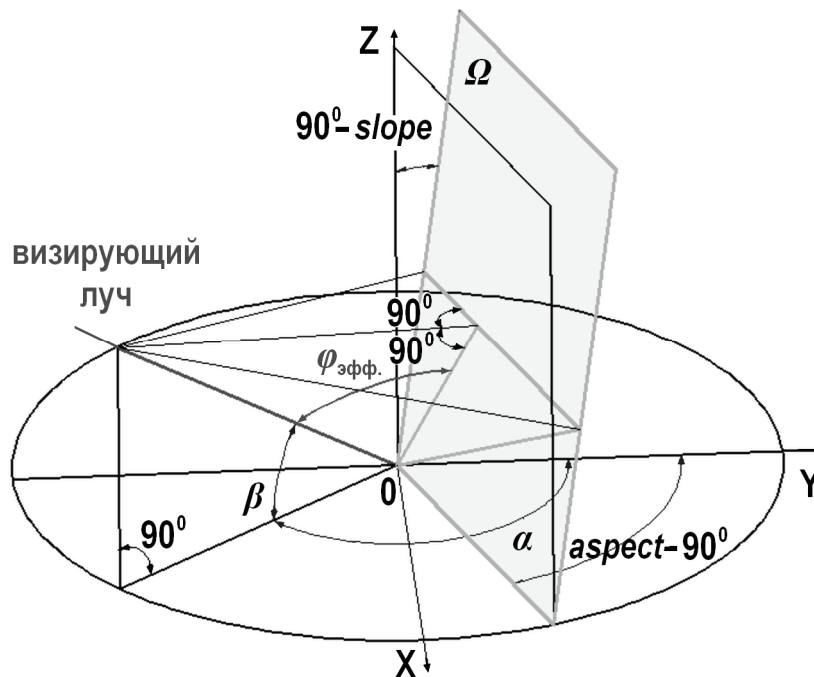


Рис. 1. Геометрия визирования для элементарной площадки подстилающей поверхности Ω , отличной от условно горизонтальной плоскости XOY ; α – угол между проекцией визирующего луча и направлением на север, β – угол, дополнительный к углу визирования СВЧ радиометра θ , aspect – экспозиция склона, выраженная в градусах, slope – уклон элементарной площадки по отношению к XOY , $\varphi_{эфф}$ – угол, дополнительный к искомому эффективному углу визирования $\theta_{эфф}$

Углы, задающие ориентацию элементарной площадки, соотносятся с ее уклоном $slope$ и экспозицией $aspect$ как $\mu = \pm slope$, $\gamma = \pm aspect$ (знаки зависят от направления отсчета углов, задающих уклон и экспозицию). Отсчет экспозиции $aspect$ ведется от меридионального направления на север, совпадающего с осью y , вокруг оси z по часовой стрелке. Отсчет уклона $slope$ ведется от XOY вокруг прямой пересечения XOY и Ω также по часовой стрелке (вокруг оси x при нулевой экспозиции). Это соответствует классическому определению названных параметров в географических науках. Используемые далее матрицы преобразований координат задают повороты вокруг осей x и z согласно правилу «правой руки», принятому в математике. Поэтому $\mu = -slope$, $\gamma = -aspect$.

Результирующая матрица поворотов вокруг осей x , y и z :

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \mu & \sin \mu \\ 0 & -\sin \mu & \cos \mu \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\cos \mu \sin \gamma & \cos \mu \cos \gamma & \sin \mu \\ \sin \mu \sin \gamma & -\sin \mu \cos \gamma & \cos \mu \end{bmatrix}.$$

Преобразования координат $[x \ y \ z]$ трех априорно выбранных точек исходной плоскости XOY записываются следующим образом: $[0 \ 0 \ 0] * [T] = [0 \ 0 \ 0]$, $[0 \ 1 \ 0] * [T] = [-\cos \mu \sin \gamma \ \cos \mu \cos \gamma \ \sin \mu]$, $[1 \ 0 \ 0] * [T] = [\cos \gamma \ \sin \gamma \ 0]$.

Уравнение плоскости, заданной тремя точками с указанными координатами:

$$\begin{vmatrix} x & -\cos \mu \sin \gamma & \cos \gamma \\ y & \cos \mu \cos \gamma & \sin \gamma \\ z & \sin \mu & 0 \end{vmatrix} = (-\sin \mu \sin \gamma) * x + (\sin \mu \cos \gamma) * y + (-\cos \mu) * z = 0.$$

Проверка выведенного уравнения выполняется подстановкой в него координат точек-решений. Для всех трех точек в результате получено равенство $0=0$. Следовательно, коэффициенты уравнения плоскости $Ax + By + Cz + D = 0$ равны: $A = -\sin \mu \sin \gamma$, $B = \sin \mu \cos \gamma$, $C = -\cos \mu$, $D = 0$ (т.к. плоскость проходит через начало координат).

Искомый эффективный угол визирования $\theta_{эфф} = 90^\circ - \varphi_{эфф}$, отсчитываемый от нормали к элементарной площадке:

$$\theta_{эфф} = 90^\circ - \arcsin\left(\frac{|(-\sin \mu \sin \gamma)m + (\sin \mu \cos \gamma)n + (-\cos \mu)p|}{\sqrt{(-\sin \mu \sin \gamma)^2 + (\sin \mu \cos \gamma)^2 + (-\cos \mu)^2} * \sqrt{m^2 + n^2 + p^2}}\right), \quad (1)$$

где m , n и p – координаты направляющего вектора визирующего луча.

Для вычисления угла поворота плоскостей поляризации необходимо определить координаты прямой, перпендикулярной проекции визирующего луча на XOY . Точки, принадлежащие проекции визирующего луча l_1 , имеют координаты $[0 \ 0 \ 0]$, $[m \ n \ 0]$.

Матрица поворота на 90° в плоскости XOY : $T_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$.

Координаты x и y для точки, принадлежащей прямой l_2 , перпендикулярной проекции визирующего луча: $[m \ n] * T_3 = [-n \ m]$. Следовательно, плоскость V , проходящая через ось z и содержащая прямую l_2 , задается в пространстве тремя точками: $[0 \ 0 \ 0]$, $[-n \ m \ 0]$, $[0 \ 0 \ 1]$.

Уравнение плоскости V , заданной тремя точками, находится по формуле:

$$\begin{vmatrix} x & -n & 0 \\ y & m & 0 \\ z & 0 & 1 \end{vmatrix} = m * x + n * y = 0.$$

Следовательно, коэффициенты уравнения плоскости $Ax + By + Cz + D = 0$ равны: $A = m$, $B = n$, $C = 0$ (т.к. плоскость проходит через ось z), $D = 0$ (т.к. плоскость проходит через начало координат). Направляющий вектор прямой l_3 , по которой пересекаются плоскости V и Ω , находится через векторное произведение нормалей к этим плоскостям:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ m & n & 0 \\ -\sin \mu \sin \gamma & \sin \mu \cos \gamma & -\cos \mu \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & n \\ 0 & 0 & -m \\ -n & m & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -\sin \mu \sin \gamma \\ \sin \mu \cos \gamma \\ -\cos \mu \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} -n \cos \mu \\ m \cos \mu \\ m \sin \mu \cos \gamma + n \sin \mu \sin \gamma \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Угол ξ между прямыми l_2 и l_3 , равный углу поворота плоскостей поляризации, определяется по формуле:

$$\xi = \pm \arccos \left(\frac{|(m^2 + n^2) \cos \mu|}{\sqrt{m^2 + n^2} \sqrt{(m^2 + n^2) \cos^2 \mu + (m \cos \gamma + n \sin \gamma)^2 \sin^2 \mu}} \right). \quad (2)$$

Определение геометрии визирования для спутниковых СВЧ радиометров AMSR-E и AMSR-2

Задача определения геометрии визирования в целях коррекции данных спутникового СВЧ зондирования для произвольного участка суши и выбранной орбиты ИСЗ на основе предлагаемого подхода решается в два этапа:

- 1) определение по ЦМР значений уклона и экспозиции элементарных площадок размером $3 * 3$ элемента разрешения ЦМР в пределах мгновенных областей обзора СВЧ радиометра;
- 2) определение с помощью разработанного подхода значений эффективного угла визирования и угла поворота плоскостей поляризации для каждой элементарной площадки на заданном витке орбиты ИСЗ.

Координаты двух точек, принадлежащих визирующему лучу, при расчетах $\theta_{эфф}$ и ξ принимаются равными $[0 \ 0 \ 0]$, $[m \ n \ p]$. При самолетных СВЧ радиометрических измерениях в качестве координат точек на визирующем луче используются координаты авиаплатформы и координаты центра мгновенной области обзора сенсора. При спутниковых измерениях, в частности, с применением СВЧ радиометров AMSR-E (ИСЗ Aqua) и AMSR-2 (ИСЗ JCOM-W) координаты направляющего вектора визирующего угла вычисляются следующим образом. При угле визирования 55° и единичной длине отрезка, соединяющего точки $[0 \ 0 \ 0]$ и $[m \ n \ p]$, можно считать $p = 0,57$, следовательно, для восходящего витка орбиты ИСЗ Aqua ($90^\circ < \alpha < 180^\circ$)

$$n = -\sqrt{\frac{0,6751 \cdot \operatorname{tg}^2(\alpha - 90^\circ)}{1 + \operatorname{tg}^2(\alpha - 90^\circ)}}, \quad (3)$$

$$m = \sqrt{0,6751 - \frac{0,6751 \cdot \operatorname{tg}^2(\alpha - 90^\circ)}{1 + \operatorname{tg}^2(\alpha - 90^\circ)}}, \quad (4)$$

для нисходящего витка орбиты ($0^\circ < \alpha < 90^\circ$)

$$n = \sqrt{\frac{0,6751}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}}, \quad (5)$$

$$m = \sqrt{0,6751 - \frac{0,6751}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}}. \quad (6)$$

Значения α для конкретных мгновенных областей обзора сенсора, необходимые для выполнения расчетов, могут быть импортированы из файлов данных СВЧ радиометрии уровня L2A – калиброванных отсчетов радиояркостной температуры с присоединенной информацией о геопривязке и параметрах орбиты ИСЗ.

Апробация векторно-координатного подхода

В рамках испытаний разработанного подхода были выполнены численные эксперименты по определению зависимости эффективного угла визирования $\theta_{эфф}$ и угла поворота плоскостей поляризации ξ для СВЧ радиометра AMSR-E на типичном восходящем витке ИСЗ Aqua от уклона и экспозиции условной элементарной площадки земной поверхности в пределах тестового участка. В рассматриваемом случае $\theta = 55^\circ$, $\alpha \approx 140^\circ$. Из выражений 3 и 4 в выбранной системе координат $m = 0,53$, $n = -0,63$, $p = 0,57$. На основе этих данных по формулам 1 и 2 рассчитаны эффективные углы визирования и углы поворота плоскостей поляризации.

Согласно результатам расчетов, представленным на *рис. 2*, на восходящем витке орбиты ИСЗ Aqua максимальный поворот плоскостей поляризации наблюдается при экспозиции склона в направлении, перпендикулярном к проекции визирующего луча на условную горизонтальную плоскость, и максимальном уклоне. В случае экспозиции склона в направлении визирующего луча вращение плоскостей поляризации не фиксируется. Значения эффективного угла визирования $\theta_{эфф}$ максимально отклоняются от исходного угла визирования в глобальной системе координат, равного 55° , при экспозиции склонов в направлении, совпадающем с проекцией визирующего луча на условную горизонтальную плоскость.

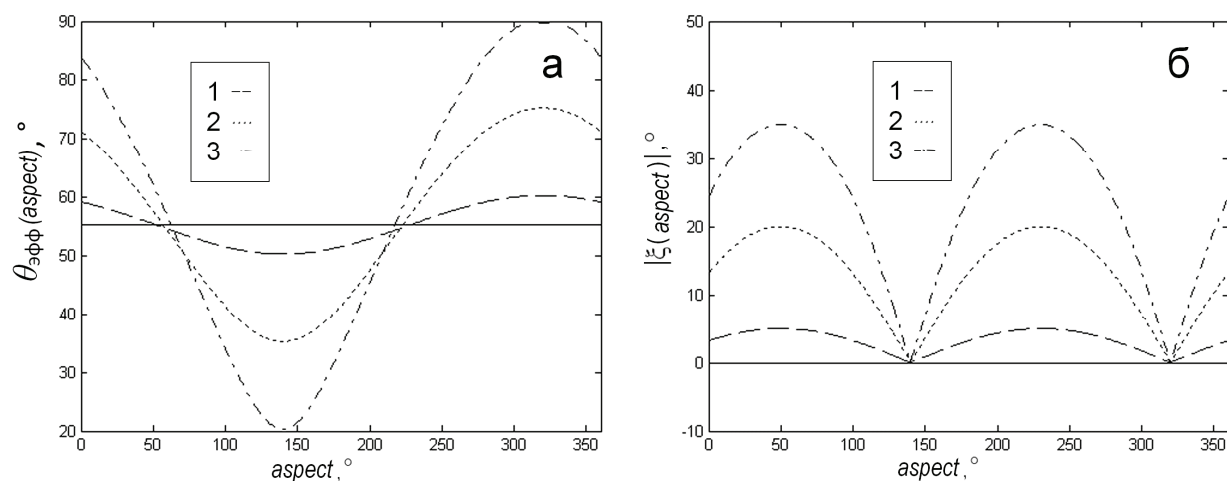


Рис. 2. Изменение локального угла визирования $\theta_{эфф}$ и модуля угла поворота плоскостей поляризации ξ при изменении экспозиции склона $aspect$ для тестового участка при разных значениях уклона элементарной площадки $slope$ (1 – 5° , 2 – 20° , 3 – 35°)

Расчет эффективных углов визирования для всей площади тестового участка позволил построить карту пространственного распределения эффективных углов визирования (*рис. 3, а*). Как видно из представленного изображения, $\theta_{эфф}$ в пределах полигона

меняется от $29,8$ до $85,5^\circ$ при изменении высот H от 0 до 527 м (рис. 3, б). Среднее значение $\theta_{эфф}$ равно $54,2^\circ$ при СКО = $6,6^\circ$. Рассчитанные значения модуля ξ при этом попадают в диапазон $0 - 29,7^\circ$ (среднее значение равно $4,4^\circ$, СКО = $4,9^\circ$).

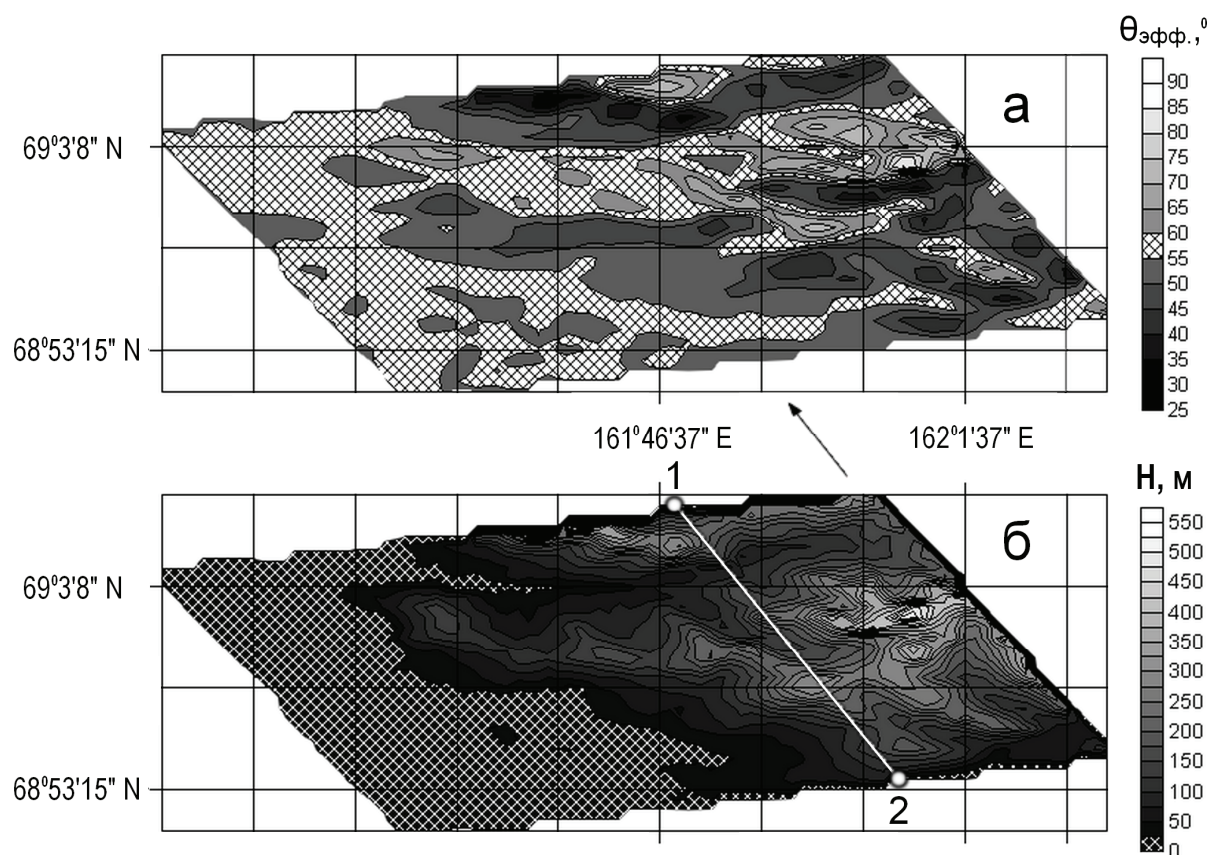


Рис. 3. Карта распределения эффективных углов визирования $\theta_{эфф}$ в пределах тестового участка для СВЧ радиометра AMSR-E на восходящем витке ИСЗ Aqua (а) и карта высот H по данным ЦМР SRTM30 (б); стрелкой обозначена проекция визирующего луча, 1-2 – трансект для оценки корреляции между H и $\theta_{эфф}$

Оценка корреляции между высотой H и $\theta_{эфф}$ выполнена для трансекта 1-2, параллельного проекции визирующего луча, т.к. для данного направления ожидается наибольшая степень согласованности изменений этих двух параметров. Изменчивость $\theta_{эфф}$ вдоль трансекта адекватно отражает вариации высотных отметок: при визировании в направлении от точки 2 к точке 1 $\theta_{эфф}$ уменьшается на обращенных к СВЧ радиометру склонах и увеличивается на противоположных им (рис. 4, а). Этим обусловлен и характер связи между H и $\theta_{эфф}$: данные параметры слабо коррелированы между собой при нулевом относительном сдвиге, однако при отрицательном сдвиге ряда H на 2-3 ширины элементарной площадки наблюдается максимум взаимной корреляционной функции CCF. В ходе дополнительных вычислений было установлено, что полученные результаты расчета $\theta_{эфф}$

полностью согласуются с результатами расчетов, выполненных с помощью традиционного подхода (Matzler, Standley, 2000), при условии преобразований системы координат в последнем случае. Это подтверждает работоспособность предлагаемого подхода к определению геометрии визирования.

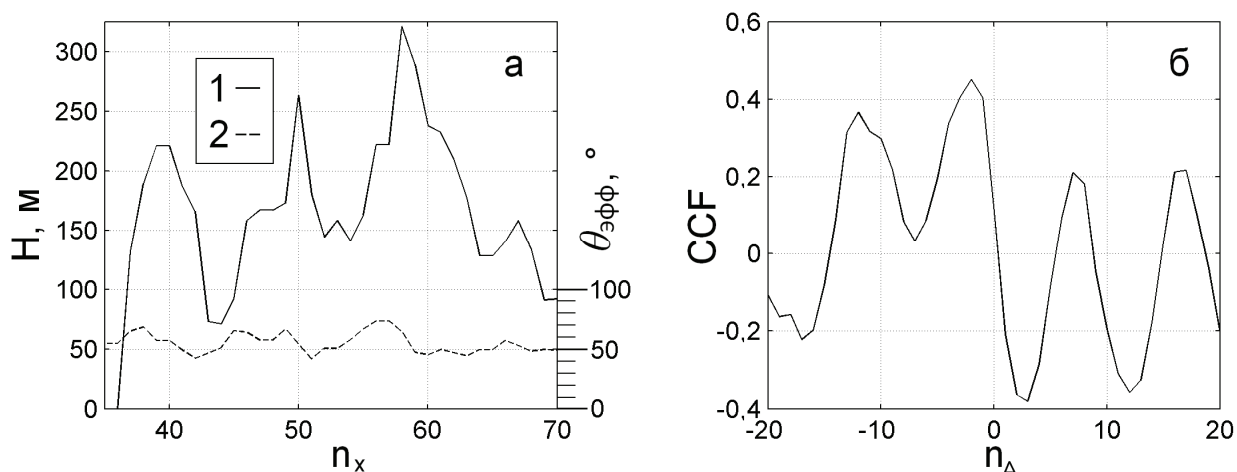


Рис. 4. Изменчивость высоты H и эффективного угла визирования $\theta_{эфф}$ вдоль обозначенного на рис. 3 трансекта 1-2 (а) и полученная для него взаимная корреляционная функция H и $\theta_{эфф}$ CCF (б); 1 – H , 2 – $\theta_{эфф}$, n_x – порядковый номер элементарной площадки (при отсчете в направлении от точки 1 к 2), n_Δ – относительный сдвиг рядов H и $\theta_{эфф}$

Заключение

Разработанный векторно-координатный подход к определению геометрии визирования при СВЧ радиометрических измерениях является альтернативой традиционному «векторно-угловому» подходу. Полученные аналитические выражения обеспечивают возможность расчета значений эффективного угла визирования и угла поворота плоскости поляризации по координатам точек на визирующем луче, что делает подход одинаково применимым для спутниковых и авиационных СВЧ измерений и позволяет сократить объем вспомогательных расчетов. Работоспособность предложенного подхода подтверждена в ходе апробации на тестовом участке, расположенном в северо-восточной Якутии вблизи г. Родинка. В результате эффективно решена задача восстановления значений параметров геометрии визирования, необходимых для радиометрической коррекции дистанционных СВЧ данных с учетом влияния крупномасштабных неровностей поверхности суши.

Литература

1. Богородский В.В., Козлов А.И. Микроволновая радиометрия земных покровов. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 272 с.
2. Марцинкевич Л.М., Мелентьев В.В. Модельные расчеты теплового радиоизлучения поверхности моря при установившемся и полностью развитом волнении // Труды ГГО. 1975. №. 331. С. 73-85.
3. Matzler C., Standley A. Relief effects for passive microwave remote sensing // *Int. J. Remote Sens.* 2000. Vol. 21. P. 2403–2412.
4. Pulvirenti L., Pierdicca N., Marzano F.S. Topographic effects on the surface emissivity of a mountainous area observed by a spaceborne microwave radiometer // *Sensors*. 2008. Vol. 8(3). P. 1459-1474.
5. Schanda E. *Physical fundamentals of remote sensing*. Berlin and New York: Springer-Verlag, 1986. Vol. 1. 194 p.
6. Ying G., Jiancheng S., Jinyang D., Xiuli F. Evaluation of terrain effect on microwave radiometer measurement and its correction // *Int. J. Remote Sens.* 2011. Vol. 32:24. P. 8899-8913.

Vector-coordinate approach to determination of viewing geometry for accounting the impact of large-scale roughness of land surface on its microwave emissivity

I.V. Matelenok¹, V.V. Melentyev^{1,2}

¹*State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg 190000, Russia*

E-mail: igor_matelenok@mail.ru

²*International Centre for the Promotion of UNIDO Programmes and Projects of State Polytechnic University, Saint-Petersburg 195251, Russia*

E-mail: vv.melentyev@mail.ru

A new vector-coordinate approach to determination of viewing geometry for passive microwave remote sensing was designed. The approach allows to retrieve values of effective incidence angle and polarization rotation angle from the coordinates of points on the viewing beam thereby being applicable to accounting the impact of large-scale roughness of land surface on its microwave emissivity in case of satellite as well as aerial sounding. The approach was tested on the site in North-Eastern Yakutiya for AMSR-E viewing geometry. It is shown that the parameters of viewing geometry required for correction of microwave remote sensing data are effectively retrieved from digital elevation models using the proposed approach. For typical ascending orbit of Aqua satellite, results of calculations of the effective incidence angle completely agree with results of calculations obtained by a traditional vector approach. In the test site with elevations of 0 – 527 m, the effective incidence angle varies from 29,8 to 85,5° (mean value is 54,2°, standard deviation is 6,6°), the absolute value of the polarization rotation angle ranges between 0 and 29,7° (mean value is 4,4°, standard deviation is 4,9°).

Keywords: aspect, brightness temperature, facet, incidence angle, microwave radiometer, relief, remote sensing, roughness, slope.

References

1. Bogorodskii V.V., Kozlov A.I., *Mikrovolnovaya radiometriya zemnykh pokrovov* (Microwave radiometry of land covers), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985, 272 p.
2. Martsinkevich L.M., Melentyev V.V., Model'nye raschety teplovogo radioizlucheniya poverkhnosti morya pri ustanovivshemsya i polnost'yu razvitom volnenii (Model calculations of microwave emission of sea surface with stationary and fully developed heaving), *Trudy GGO*, 1975, No. 331, pp. 73-85.
3. Matzler C., Standley A., Relief effects for passive microwave remote sensing, *Int. J. Remote Sens.*, 2000, Vol. 21, pp. 2403–2412.
4. Pulvirenti L., Pierdicca N., Marzano F.S., Topographic effects on the surface emissivity of a mountainous area observed by a spaceborne microwave radiometer, *Sensors*, 2008, Vol. 8(3), pp. 1459-1474.
5. Schanda E., *Physical fundamentals of remote sensing*, Berlin and New York: Springer-Verlag, 1986, Vol. 1, 194 p.
6. Ying G., Jiancheng S., Jinyang D., Xiuli F., Evaluation of terrain effect on microwave radiometer measurement and its correction, *Int. J. Remote Sens.*, 2011, Vol. 32:24, pp. 8899-8913.