

Моделирование спутниковых СВЧ-радиоинтерферометрических измерений для дистанционного зондирования Земли

М. Т. Смирнов

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН, Фрязино, 141190, Московская область, Россия
E-mail: smirnov@ire.rssi.ru*

Одна из проблем СВЧ-радиометрического дистанционного зондирования Земли со спутников заключается в сравнительно низком пространственном разрешении приборов, для повышения которого требуется создание больших антенн. Настоящая работа посвящена одному из возможных направлений решения проблемы путём использования методов радиоинтерферометрии или пассивного синтеза апертуры. В работе рассмотрена теоретическая модель радиоинтерферометрических измерений применительно к решению задач дистанционного зондирования Земли. Анализируются методы восстановления радиояркой температуры Земли по радиоинтерферометрическим измерениям. Описан разработанный программный комплекс моделирования измерений, позволяющий интерактивно задавать область наблюдения Земли и характеристики антенной системы. В качестве тестового радиотеплового поля использовалась матрица яркой температуры реального радиотеплового поля Земли. Оценены ошибки восстановления углового распределения поля радиояркой температуры природных объектов в зависимости от погрешности измерений функции видности. Оценка ошибок измерений осуществляется путём добавления нормально распределённой шумовой составляющей с заданным среднеквадратическим отклонением к вычисленной функции видности с последующим восстановлением поля радиояркой температуры. Анализируются пути повышения точности радиоинтерферометрического метода. В частности, рассмотрена возможность совмещения радиоинтерферометрических измерений с высоким пространственным разрешением с панорамными измерениями, обладающими более низким разрешением, но высокой точностью измерений радиояркой температуры.

Ключевые слова: радиоинтерферометр, дистанционное зондирование Земли, численное моделирование

Одобрена к печати: 25.03.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-23-31

Введение

Одна из проблем СВЧ-радиометрического дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) со спутников состоит в сравнительно низком пространственном разрешении приборов. Для его повышения требуется увеличение размеров антенн. Создание больших антенн и выведение на орбиту связано с большими техническими сложностями. Одним из путей решения проблемы представляется использование методов радиоинтерферометрии или пассивного синтеза апертуры.

Первые эксперименты по использованию радиоинтерферометрических измерений для решения задач ДЗЗ были проведены с самолёта в 1993 г. (Le Vine et al., 1994) с целью оценки влажности почв. В последнее время интерес к этим методам в задачах дистанционного зондирования Земли значительно возрос в связи с развитием систем спутниковых наблюдений. Одним из успешных проектов, реализовавшим методы интерферометрии, является интерферометрический радиометр L-диапазона MIRAS (*англ.* Microwave Imaging Radiometer Using Aperture Synthesis) проекта SMOS (*англ.* Soil Moisture and Ocean Salinity) (Font et al., 2010), предназначенный для картирования полей солёности океанов и влажности почв. Наиболее перспективными представляются работы по созданию СВЧ-радиометрических систем на базе радиоинтерферометрии для регулярного обзора глобальных полей влажности атмосферы Земли с геостационарных спутников (Lambbrigtsen et al., 2010; Zhang et al., 2015).

Основная сложность задачи состоит в том, что при пассивном синтезе апертуры измерения радиояркой температуры излучения природных объектов проводятся косвенным образом по корреляционным функциям сигналов от нескольких пар антенн, что требует специальной обработки сигналов. Для разработки таких сложных приборов требуется тщательная проработка всех элементов, особенно антенных систем. Численное моделирование позволяет лучше понять особенности задачи и реализовать оптимальные технические решения.

Теоретическая модель измерений

Геометрическая схема задачи представлена на рис. 1. Система элементарных антенн размещена в плоскости x, y на космическом аппарате, находящемся на высоте h . Поля зрения антенн пересекаются, чтобы иметь возможность измерять взаимную корреляцию поступающих от них сигналов.

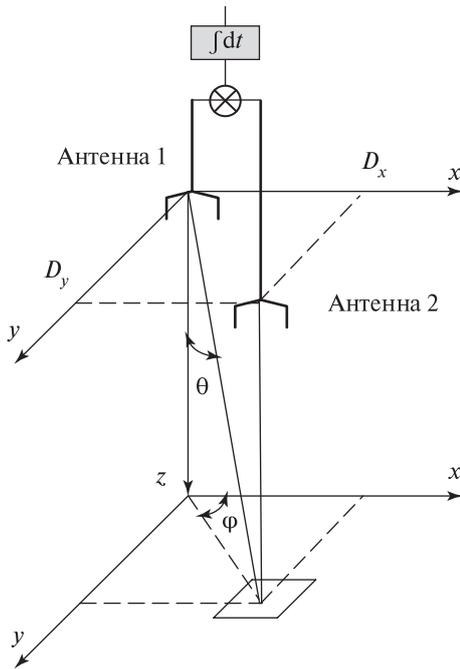


Рис. 1. Схема интерферометрических измерений применительно к ДЗЗ

Тепловое излучение природного объекта принимается антеннами и поступает на комплексный коррелятор, состоящий из перемножителей сигналов каждой пары антенн и соответствующих интеграторов.

В результате измерений на выходе радиоинтерферометрической системы измеряется набор сигналов, пропорциональных корреляционной функции измеряемого поля или, как принято в теории радиоинтерферометрии, функции видности v_{ij} . Индексы i, j относятся к координатам, определяющим расстояние между антеннами.

Вопросы теоретического описания получаемых сигналов для такой системы подробно рассмотрены в работах (Corbella et al., 2004, 2009). Согласно этим исследованиям функцию видности можно представить в следующем виде:

$$V_{ij}(u, v) = \iint_{\xi^2 + \eta^2 \leq 1} T'_{ij}(\xi, \eta) \cdot e^{-j2\pi(u\xi + v\eta)} d\xi d\eta, \quad (1)$$

где T'_{ij} — функция, которая описывает измеряемое угловое распределение принимаемого излучения, или обобщённая радиояркая температура:

$$T'_{ij}(\xi, \eta) = (T_b(\xi, \eta) - T_r) AP_{ij}(\xi, \eta) \tilde{r}_{ij} \left[-\frac{u\xi + v\eta}{f_0} \right], \quad (2)$$

$$AP_{ni}(\xi, \eta) = \frac{F_{ni}(\xi, \eta) F_{nj}^*(\xi, \eta)}{\sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2} \cdot \sqrt{\Omega_i \Omega_j}}, \quad (3)$$

где $T_b(\xi, \eta)$ — угловое распределение радиояркой температуры исследуемого объекта; T_r — температура приёмника; $F_{ni}(\xi, \eta)$ — нормированные диаграммы направленности элементарных антенн; Ω_i — телесный угол диаграммы направленности элементарной антенны; \tilde{r}_{ij} — функция размытия интерференционных лепестков (англ. fringe washing function).

Уравнения для функции видности записаны в сферических координатах через направляющие косинусы $\xi = \sin \theta \cdot \cos \varphi$, $\eta = \sin \theta \cdot \sin \varphi$ и в безразмерных величинах расстояния между антеннами:

$$u = \frac{x_1 - x_2}{\lambda}, \quad v = \frac{y_1 - y_2}{\lambda},$$

где λ — длина волны принимаемого излучения. Линейные координаты при этом преобразуются в пространство (ξ, η) по формулам:

$$x = \frac{h\xi}{\sqrt{1-\xi^2-\eta^2}}, \quad y = \frac{h\eta}{\sqrt{1-\xi^2-\eta^2}},$$

где h — высота приёмника над уровнем Земли.

Функция размытия интерференционных лепестков описывает декорреляцию измеряемых сигналов за счёт разности фаз на разных частотах в пределах полосы пропускания приёмника:

$$\tilde{r}_{ij}(\tau) = \frac{e^{-j2\pi f_0 \tau}}{\sqrt{B_i B_j} \cdot \sqrt{G_i G_j}} \int_0^\infty H_i(f) H_j^*(f) \cdot e^{j2\pi f \tau} df, \quad (4)$$

где $H_i(f)$ — комплексная передаточная функция приёмника; B_i — ширина полосы пропускания; G_i — коэффициент усиления; f_0 — центральная частота. При использовании прямоугольного фильтра на входе приёмника она аппроксимируется функцией $\sin c$, пропорциональной $\sin \tau / \tau \cdot \sin c(\tau)$.

Восстановление поля радиотеплового излучения по функции видности

Уравнение (1) выступает основным для моделирования радиоинтерферометрических измерений. Угловое распределение радиояростной температуры можно получить обратным преобразованием Фурье этого уравнения (Corbella et al., 2009):

$$T'_b(\xi, \eta) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} V(u, v) \cdot e^{j2\pi(u\xi + v\eta)} du dv. \quad (5)$$

Переменные u, v могут быть интерпретированы как пространственные частоты углового распределения радиотеплового изображения. В этом случае пространственное разрешение системы в угловых координатах определяется максимальной базой интерферометра $\Delta\theta \approx \lambda/D$. Размер общего поля зрения (кадра) определяется минимальной базой и шириной диаграммы направленности элементарных антенн $\Delta\theta_{max} \approx \lambda/d$. Некоторое ухудшение пространственного разрешения вносит функция размытия интерференционных лепестков $\tilde{r}_{ij}(\tau)$, определяемая шириной полосы пропускания приёмника. Набор значений u, v определяет качество восстановления радиотеплового поля.

В связи с ограниченностью выборки значений (u, v) , определяемой количеством антенн интерферометра, для корректной оценки $T'_b(\xi, \eta)$ при преобразовании Фурье необходимо использовать сглаживающие окна. Процедура восстановления зависит от геометрического расположения антенн и исследуемого объекта (степени контрастности элементов изображения).

Альтернативный метод G-матрицы основан на матричном представлении функции видности. В этом случае уравнение (1) может быть записано в виде:

$$V(u, v) = \iint_{\xi^2 + \eta^2 \leq 1} T_b(\xi, \eta) G(\xi, \eta, u, v) d\xi d\eta, \quad (6)$$

где $G(\xi, \eta, u, v)$ — эмпирическая функция комплексного вида, включающая подынтегральные функции (2)–(4).

Интеграл уравнения (5) может быть записан в виде двойной суммы в дискретном или матричном виде:

$$\mathbf{V} = \mathbf{GT}, \quad (7)$$

где \mathbf{V} — вектор M отсчётов функции видности; $\mathbf{T} = (T_b(\xi, \eta) - T_r)$ — вектор N пикселей изображения, при этом $N \geq M$, \mathbf{G} — матрица преобразования.

Поскольку размерности векторов \mathbf{T} и \mathbf{V} могут не совпадать, то в простейшем случае решение задачи может быть получено путём минимизации среднеквадратической разницы \mathbf{V} и \mathbf{GT} (Anterrieu, Khazaal, 2008):

$$\min \|\mathbf{V} - \mathbf{GT}\|^2. \quad (8)$$

Для минимизации выражения (8) необходимо использовать современные математические методы, позволяющие учитывать особенности задачи. В данной работе использовалась одна из самых больших и полных математических библиотек `alglib` (<https://www.alglib.net/docs.php>).

Моделирование измерений

Для моделирования спутниковых радиоинтерференционных измерений нами разработана специальная программа, позволяющая вычислять функцию видности для измерений над выбранной областью пространства и восстанавливать по ней поле радиояркостной температуры. Интерфейс программы представлен на *рис. 2*. При восстановлении поля радиотеплового излучения Земли использован главным образом метод G -матрицы (уравнения (5), (6)). Для понимания основных особенностей использования радиоинтерферометрической системы использовалась наиболее простая конфигурация антенной системы в виде U -образно расположенных элементарных антенн, имеющих одинаковые диаграммы направленности. Расстояние между элементарными антеннами одинаково во всех плечах.

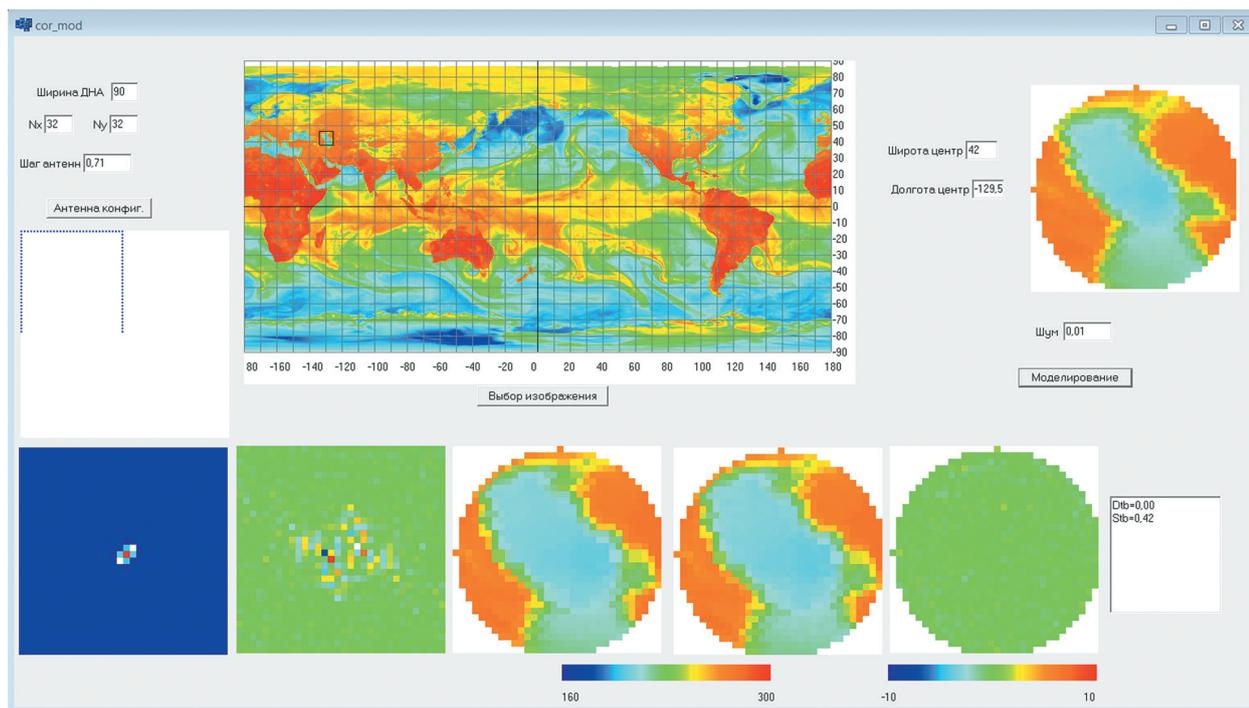


Рис. 2. Интерфейс программы моделирования

Матрица яркостной температуры реального радиотеплового поля Земли, изображение которой выводится в левом верхнем углу интерфейса, сформирована на основе измерений приборов SSMIS (*англ.* Special Sensor Microwave Imager/Sounder), SSM/I (*англ.* Special Sensor Microwave/Imager) на частоте 22 ГГц. Были использованы данные со спутников серии DMSP (*англ.* Defence Ministry Satellite Program) (DMSP f16, f17, f18, f15), приведённые к регулярной прямоугольной координатной сетке с шагом $0,25^\circ$ (источник данных: <https://www.ncei.noaa.gov/data/ssmis-brightness-temperature-csu/access/ICDR-GRID/2021/>).

Область наблюдения для моделирования измерений выбирается интерактивно. На экране компьютера справа вверху выводится увеличенный фрагмент выбранной области, ограниченный шириной диаграммы направленности элементарной антенны Δ_θ . Слева внизу (слева направо) отображаются действительная и мнимая части функции видности, исходное и восстановленное угловое распределение (в координатах ξ, η) радиояркой температуры и ошибки восстановления, обусловленные погрешностями измерений.

Диаграммы направленности элементарных антенн моделировались функцией $\sin c$:

$$\begin{cases} \frac{\sin(\pi\theta/\Delta_\theta)}{\pi\theta/\Delta_\theta} & \text{при } \theta < \frac{\Delta_\theta}{2}, \\ 0 & \text{при } \theta \geq \frac{\Delta_\theta}{2}. \end{cases}$$

Программа позволяет задавать параметры антенной системы:

- количество отсчётов функции видности N по обеим координатам;
- ширину диаграммы направленности антенн Δ_θ ;
- безразмерное расстояние между антеннами.

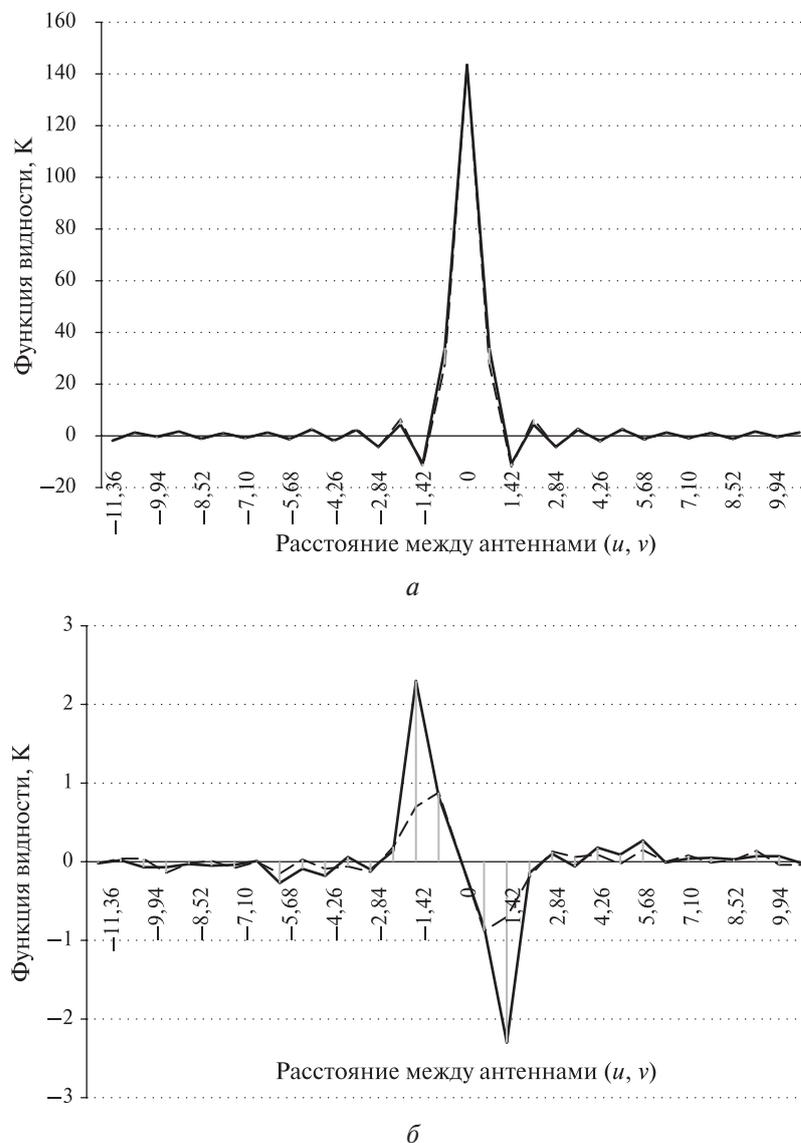


Рис. 3. Вертикальные и горизонтальные разрезы типичной функции видности: $V(u, 0)$ — сплошная линия и $V(0, v)$ — пунктир; $N = 32$ (а — действительная часть; б — мнимая часть)

Пространственное разрешение и качество восстановления углового распределения радиояркостной температуры интерферометрической системы зависит от количества и расположения антенн.

Для получения качественного углового распределения радиояркостной температуры оптимальный шаг между антеннами определяется шириной диаграммы направленности. Если интерпретировать u и v в уравнении (5) как пространственные частоты, то шаг между антеннами должен быть $\Delta u = \Delta v = 1/2 \sin(\Delta_\theta/2)$.

Пространственное разрешение системы определяется максимальной базой интерферометра. Так, для получения пространственного разрешения 10 км при высоте наблюдения 500 км и ширине диаграммы направленности 60° требуется 58 отсчётов функции видности по каждой из координат. Для этого количество антенн при их оптимальном распределении несколько меньше, но порядок величин такой же.

На рис. 3 (см. с. 27) представлены вертикальные и горизонтальные разрезы типичной функции видности $V(u, 0)$ и $V(0, v)$ для $\Delta_\theta = 90^\circ$ и $N = 32$. Из рисунка видно, что амплитуда значений действительной части функции видности существенно больше, чем мнимой части. Величина её довольно быстро падает при увеличении расстояния между антеннами.

Оценка ошибок измерений осуществляется путём добавления нормально распределённой шумовой составляющей с заданным среднеквадратическим отклонением σ_v к вычисленной функции видности с последующим восстановлением поля радиояркостной температуры. В качестве оценки ошибки восстановления используется среднеквадратическое отклонение исходных и восстановленных значений радиояркостной температуры по всем пикселям изображения в пределах поля зрения, определяемого диаграммой направленности элементарной антенны.

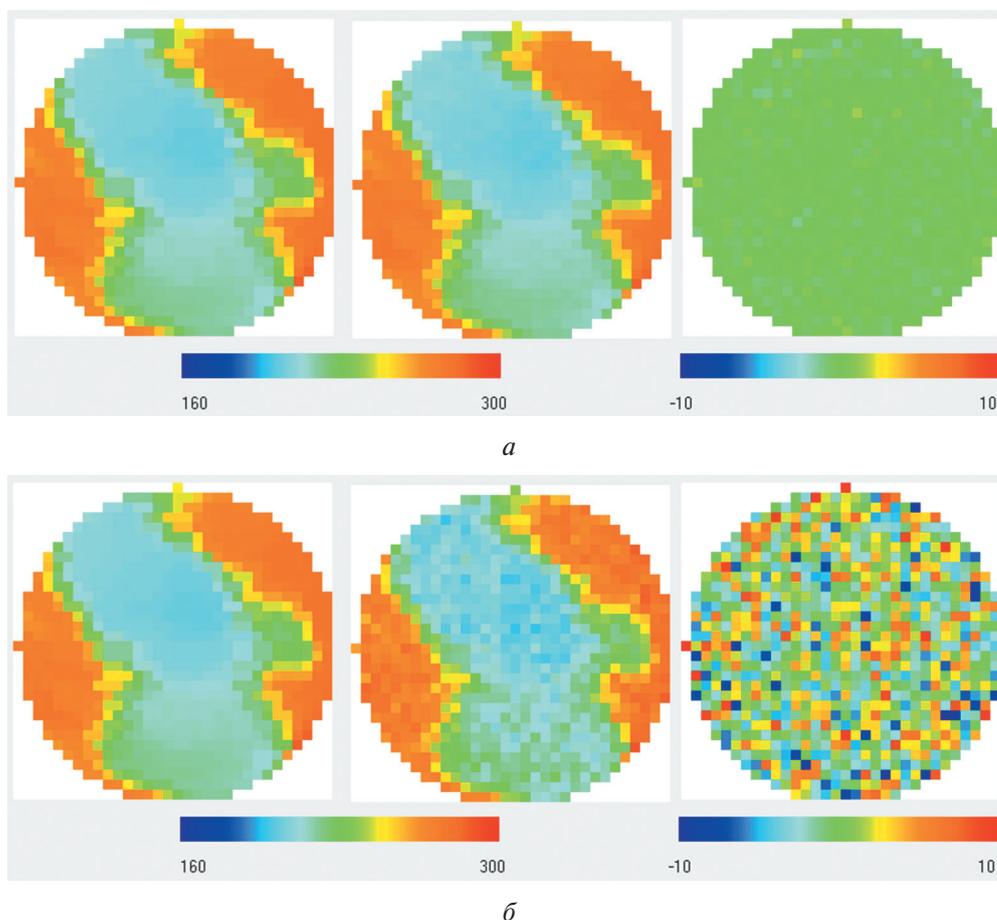


Рис. 4. Зависимость ошибок восстановления радиояркостной температуры от ошибок измерений; $a - \sigma_v = 0,01$ К; $b - \sigma_v = 0,1$ К

На *рис. 4* (см. с. 28) приведён пример, иллюстрирующий зависимость ошибок восстановления поля радиояркостной температуры от погрешности измерений функции видности. На нём (слева направо) представлены:

- исходное угловое распределения радиояркостной температуры области Каспийского моря;
- восстановленное поле с учётом погрешностей измерений;
- угловое распределение ошибок восстановления для двух значений шумов измерений σ_V .

На рисунке видно, что ошибки восстановления радиояркостной температуры распределены достаточно равномерно и носят шумовой характер. Это обстоятельство должно позволить использовать некоторые способы регуляризации решения задачи. Ошибки восстановления слабо зависят от выбранной области интереса.

На *рис. 5* приведена зависимость ошибок восстановления радиояркостной температуры от погрешности измерений функции видности. Из рисунка видно, что ошибки восстановления растут практически линейно при увеличении погрешности измерений. Расчёты показали, что при увеличении количества антенн ошибки восстановления тоже возрастают, что объясняется увеличением пространственного разрешения системы и усилением роли больших пространственных частот.

Для повышения точности измерений можно увеличивать количество антенн и усреднять значения функции видности для одинаковых расстояний между антеннами. По этому пути пошли разработчики перспективной радиоинтерферометрической системы GeoSTAR для регулярного обзора глобальных полей влажности атмосферы Земли с геостационарных спутников. Первоначально в приборе было заложено по одному ряду антенн в каждом плече антенной системы (Corbella et al., 2009). В дальнейшем при совершенствовании прибора в системе GeoSTAR III стало по три ряда антенн (Lambrigtsen et al., 2016). Этот путь представляется очень сложным технически.

Можно также повысить точность измерений накоплением сигналов по времени. Возможности этого метода ограничены условиями измерений. При расположении интерферометра на низкоорбитальном космическом аппарате время определяется скоростью движения носителя и требуемым пространственным разрешением. При расположении на геостационарном спутнике оно может быть существенно больше, но ограничивается естественной временной изменчивостью исследуемого объекта.

Альтернативный путь — это совмещение радиоинтерферометрических измерений с высоким пространственным разрешением с панорамными измерениями, обладающими более низким разрешением, но высокой точностью измерений радиояркостной температуры. Знание точных значений радиотеплового поля на низких пространственных частотах должно позволить регуляризовать решение задачи его восстановления по интерферометрическим данным. Простейшим методом оценки этого эффекта при моделировании представляется уменьшение погрешности измерений на низких пространственных частотах. Выполненное моделирование показало, что уменьшение погрешности измерений на низких частотах позволяет уменьшить ошибки восстановления радиояркостной температуры примерно на 20 %. Эти оценки являются предварительными, и данный вопрос требует отдельного, более тщательного рассмотрения.

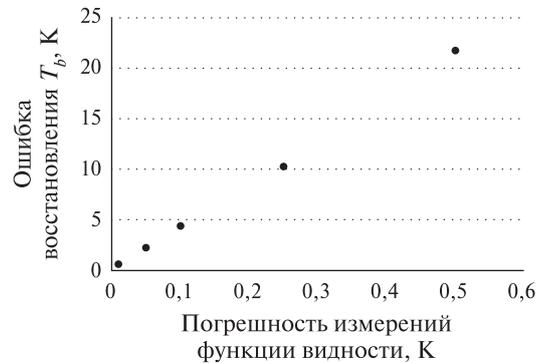


Рис. 5. Зависимость ошибок восстановления радиояркостной температуры от погрешности измерений

Заключение

Существующие модели радиоинтерферометрических измерений применительно к решению задач ДЗЗ позволяют понять основные особенности как прямой задачи получения оценок функции видности, так и обратной — восстановления измеряемого поля радиотеплового излучения.

Разработанная программа моделирования является инструментом анализа возможностей перспективных радиоинтерферометрических систем для решения задач ДЗЗ. Она позволяет оценить потенциальные погрешности измерений радиотеплового поля Земли при использовании радиоинтерферометрического метода измерений.

Оценены погрешности восстановления поля радиояркостной температуры в зависимости от характеристик антенной системы и погрешности измерений функции видности. Вопрос повышения точности измерений требует отдельного, более тщательного рассмотрения

Работа выполнена в рамках государственного задания и частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 20-07-00200а). Автор благодарит Ермакова Д. М. за подготовку матрицы яркостной температуры реального радиотеплового поля Земли, использованную при моделировании.

Литература

1. *Anterrieu E., Khazaal A.* Brightness Temperature Map Reconstruction from Dual-Polarimetric Visibilities in Synthetic Aperture Imaging Radiometry // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2008. V. 46. No. 3. P. 606–612. DOI: 10.1109/TGRS.2007.914799.
2. *Corbella I., Duffo N., Vall-llossera M., Camps A., Torres F.* The visibility function in interferometric aperture synthesis radiometry // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2004. V. 42. No. 8. P. 1677–1682. DOI: 10.1109/TGRS.2004.830641.
3. *Corbella I., Torres F., Camps A., Duffo N., Vall-llossera M.* Brightness-Temperature Retrieval Methods in Synthetic Aperture Radiometers // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2009. V. 47. No. 1. P. 285–294. DOI: 10.1109/TGRS.2008.2002911.
4. *Font J., Camps A., Borges A., Martín-Neira M., Boutin J., Reul N., Kerr Y., Hahne A., Mecklenburg S.* SMOS: The Challenging Sea Surface Salinity Measurement from Space // *Proc. IEEE*. 2010. V. 98. No. 5. P. 649–665. DOI: 10.1109/JPROC.2009.2033096.
5. *Lambrigtsen B., Brown S. T., Gaier T., Herrell L., Kangaslahti P., Tanner A.* Monitoring the Hydrologic Cycle with the PATH Mission // *Proc. IEEE*. 2010. V. 98. No. 5. P. 862–877. DOI: 10.1109/JPROC.2009.2031444.
6. *Lambrigtsen B., Gaier T., Kangaslahti P., Lim B., Tanner A., Ruf C.* Enabling the NASA decadal-survey “PATH” mission // *Proc. IGARSS’16. Beijing, 2016*. P. 3949–3951. DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7730026.
7. *Le Vine D., Griffis A., Swift C., Jackson T.* ESTAR: a synthetic aperture microwave radiometer for remote sensing applications // *Proc. IEEE*. 1994. V. 82. No. 12. P. 1787–1801. DOI: 10.1109/5.338071.
8. *Zhang Ch., Liu H., Wu Ji, Zhang Sh., Yan J., Niu L., Sun W., Li H.* Imaging Analysis and First Results of the Geostationary Interferometric Microwave Sounder Demonstrator // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2015. V. 53. No. 1. P. 207–218. DOI: 10.1109/TGRS.2014.2320983.

Simulation of satellite microwave radio interferometric measurements for Earth remote sensing applications

M. T. Smirnov

*Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS,
Fryazino Branch, Fryazino 141190, Moscow region, Russia
E-mail: smirnov@ire.rssi.ru*

One of the problems in microwave radiometric remote sensing of the Earth from satellites is the relatively low spatial resolution of the devices, due to the need for large antennas. This work is devoted to one of the possible ways to solve the problem by using methods of radio interferometry (RI) or passive aperture synthesis. The paper considers a theoretical model of RI measurements applied to solving problems of the Earth remote sensing. Methods to retrieve microwave brightness temperature of the Earth using RI measurements are analyzed. The developed software package for measurement simulation allows interactive defining the Earth observation area and the characteristics of the antenna system. As a test field, a matrix of microwave brightness temperatures of the real emission field of the Earth was used. The errors of reconstruction of the angular distribution of the microwave brightness temperatures field of natural objects depending on the measurement errors of the visibility function are estimated. Measurement errors are estimated by adding a normally distributed noise component with a given standard deviation to the calculated visibility function, followed by the restoration of the microwave brightness temperature field. The ways of increasing the accuracy of the RI method are analyzed. In particular, the possibility of combining high spatial resolution RI measurements with panoramic measurements with lower resolution but high accuracy of measurements of microwave brightness temperatures is considered.

Keywords: radio interferometer, remote sensing of the Earth, numerical simulation

Accepted: 25.03.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-23-31

References

1. Anterrieu E., Khazaal A., Brightness Temperature Map Reconstruction from Dual-Polarimetric Visibilities in Synthetic Aperture Imaging Radiometry, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2008, Vol. 46, No. 3, pp. 606–612, DOI: 10.1109/TGRS.2007.914799.
2. Corbella I., Duffo N., Vall-llossera M., Camps A., Torres F., The visibility function in interferometric aperture synthesis radiometry, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2004, Vol. 42, No. 8, pp. 1677–1682, DOI: 10.1109/TGRS.2004.830641.
3. Corbella I., Torres F., Camps A., Duffo N., Vall-llossera M., Brightness-Temperature Retrieval Methods in Synthetic Aperture Radiometers, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2009, Vol. 47, No. 1, pp. 285–294, DOI: 10.1109/TGRS.2008.2002911.
4. Font J., Camps A., Borges A., Martín-Neira M., Boutin J., Reul N., Kerr Y., Hahne A., Mecklenburg S., SMOS: The Challenging Sea Surface Salinity Measurement from Space, *Proc. IEEE*, 2010, Vol. 98, No. 5, pp. 649–665, DOI: 10.1109/JPROC.2009.2033096.
5. Lambrigtsen B., Brown S. T., Gaier T., Herrell L., Kangaslahti P., Tanner A., Monitoring the Hydrologic Cycle with the PATH Mission, *Proc. IEEE*, 2010, Vol. 98, No. 5, pp. 862–877, DOI: 10.1109/JPROC.2009.2031444.
6. Lambrigtsen B., Gaier T., Kangaslahti P., Lim B., Tanner A., Ruf C., Enabling the NASA decadal-survey “PATH” mission, *Proc. IGARSS’16*, Beijing, 2016, pp. 3949–3951, DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7730026.
7. Le Vine D., Griffis A., Swift C., Jackson T., ESTAR: a synthetic aperture microwave radiometer for remote sensing applications, *Proc. IEEE*, 1994, Vol. 82, No. 12, pp. 1787–1801, DOI: 10.1109/5.338071.
8. Zhang Ch., Liu H., Wu Ji, Zhang Sh., Yan J., Niu L., Sun W., Li H., Imaging Analysis and First Results of the Geostationary Interferometric Microwave Sounder Demonstrator, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2015, Vol. 53, No. 1, pp. 207–218, DOI: 10.1109/TGRS.2014.2320983.