

**Проект СВЧ радиометрической системы для дистанционного зондирования природных сред на основе радиоинтерферометрических измерений**

М.Т. Смирнов<sup>1</sup>, С.В. Турыгин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФирЭ им. В.А. Котельникова РАН, smirnov@ire.rssi.ru,

<sup>2</sup>СКБ ИРЭ РАН, tur@sdbireras.ru

*В работе приводится теоретическое обоснование и краткое описание проекта СВЧ радиометрической системы для дистанционного зондирования природных сред на основе радиоинтерферометрических измерений. Для определения оптимальных параметров проектируемой системы проводится математическое моделирование ожидаемых результатов. Разрабатываемая система должна проводить измерения на нескольких частотах в диапазоне 16÷24 ГГц.*

*The paper presents a theoretical justification and a brief description of the microwave radiometric system project for remote sensing of natural media based on radiointerferometric measurements. To determine the optimal parameters of the designed system, mathematical simulation of the expected results is carried out. The system under development should measure microwave emission at several frequencies in the range 16÷24 GHz.*

Методы радиоинтерферометрии давно используются в радиоастрономии для повышения углового разрешения при наблюдении различных объектов [1]. В последнее время возрос интерес к этим методам и в задачах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Одним из успешных проектов, реализовавшим методы интерферометрии является радиометр MIRAS проекта SMOS [2].

Основы применения интерферометрии или двумерного синтеза апертуры применительно к задачам ДЗЗ впервые были сформулированы и доведены до практического использования в [3]. Дальнейшее развитие они получили в работах [4-8] и др.

Наибольшая сложность задачи состоит в том, что при пассивном синтезе апертуры измерения радиоярких температур излучения природных объектов производятся косвенным образом по корреляционным функциям сигналов от нескольких пар антенн. Восстановления поля излучения требует привлечения современных методов решения обратной задачи с использованием всей совокупности сопутствующей информации об объекте исследования и модели прибора.

Целью данной работы является подготовка к реализации перспективной космической системы мониторинга чрезвычайных ситуаций [9]

**Применение радиоинтерферометрических измерений в задачах ДЗЗ**

Геометрическая схема задачи применительно к задачам ДЗЗ представлена на рис. 1. Пара антенн размещена на космическом аппарате, находящемся на высоте  $h$ . Поля зрения антенн пересекаются, чтобы иметь возможность измерять взаимную корреляцию поступающих от них сигналов.

Взаимная корреляция сигналов от пары разнесенных антенн, принимающих одно и то же распределение радиоярких температур на единицу телесного угла  $T_{\Omega}(\theta, \phi)$ , дает отсчет функции видности [3]:

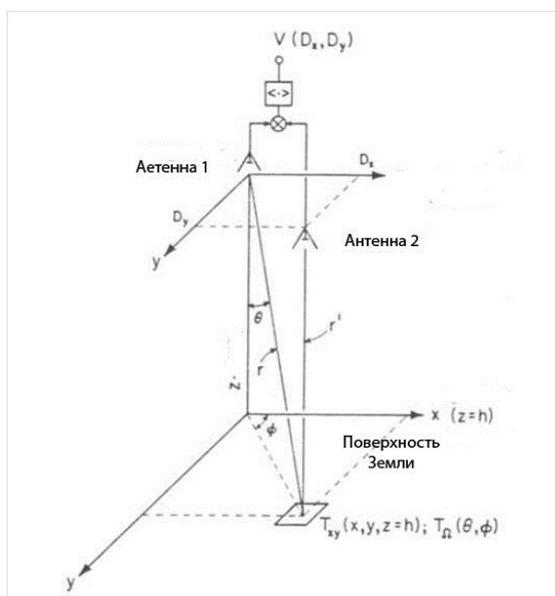
$$V(u, v) = \int_0^{2v} \int_0^v T_{\Omega}(\theta, \phi) e^{j2\pi(u \sin\theta \cos\phi + v \sin\theta \sin\phi)} \sin\theta d\theta d\phi, \quad (1)$$

где  $V(u, v)$  размерная величина в единицах К,

$D_x, D_y$  - проекции расстояний между антеннами на оси  $x$  и  $y$  (см. рис. 1),

$u = D_x / \lambda, v = D_y / \lambda$  - соответствующие волновые числа.

Формула (1) не учитывает диаграммы направленности антенн и декорреляцию измерений обусловленной полосой пропускания приемников. Данная проблема достаточно хорошо изучена [7,10].



**Рис. 1. Геометрическая схема интерферометра применительно к задачам ДЗЗ [4].**

Из формулы (1) следует, что путем обратного Фурье преобразования можно получить распределение  $T_{\Omega}(\theta, \phi)$ . Существует множество алгоритмов оптимального решения этой проблемы [11].

Основная задача интерферометрических измерений состоит в том, чтобы получить отсчеты функции видности  $V(u, v)$  достаточные для восстановления радиоярких температур. Используемые в настоящее время методы предполагают наличие решетки антенн, обеспечивающих измерение функции видности с волновыми числами, определяемыми расстояниями между парами этих антенн.

Предлагаемый нами метод основан на более полном использовании измерений интерферограмм небольшого количества пар антенн. Для понимания сути метода рассмотрим одномерный случай интерферометра с двумя антеннами. Нетрудно показать, что интерферометр измеряет функцию видности, вырезая в спектре пространственных частот исследуемого радиотеплового поля компоненты соответствующие волновым числам, определяемым базой  $D$  (рис. 2). Если в одном плече имеется временная задержка, то это эквивалентно повороту направления наблюдения. При этом базой интерферометра будет расстояние между направлениями наблюдения в плоскости перпендикулярной этим направлениям.

Если время задержки равно  $\tau$ , то эффективный угол наблюдения будет определяться из уравнения:

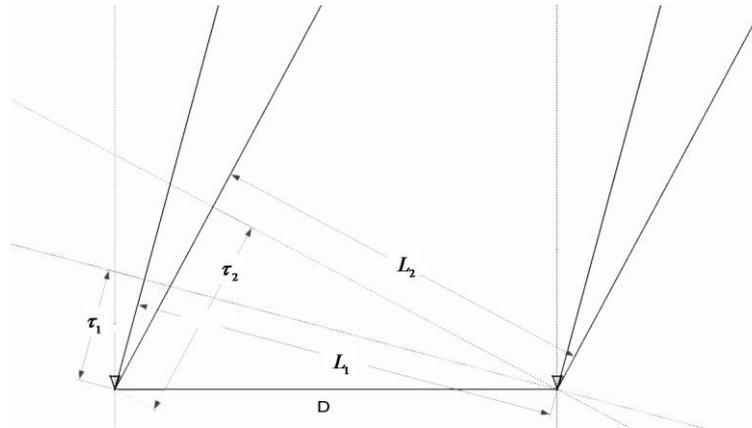
$$\sin \theta = \tau / D, \quad (2)$$

а эффективная база интерферометра будет равна

$$L = D \cos \theta. \quad (3)$$

Таким образом, вводя переменные значения задержки  $\tau$ , мы можем получить отсчеты функции видности для ряда волновых чисел. Нами предлагается использовать цифровые методы обработки сигналов для решения такой задачи. Современные

цифровые системы позволяют обрабатывать данные с большой частотой дискретизации и проводить быстрые вычисления различных характеристик измеряемых сигналов.



**Рис. 2. Геометрическая схема интерферометра с переменным углом наблюдения.**

Величина требуемой задержки мала. Так для значений  $D = 2,8$  м,  $\lambda = 1,4$  см,  $c = 299792458$  м/с оценки по формулам (2-3) показывают, что временная задержка  $\tau_1$  составит порядка  $9,3 \cdot 10^{-9}$  с. Таким образом, при частоте АЦП 1 ГГц, мы можем иметь только порядка 10 отсчетов различных по волновым числам. Для получения более полного набора волновых чисел пространственного спектра необходимо реализовать задержки быть порядка  $10^{-10}$ - $10^{-11}$  с.

### **Моделирование результатов измерений**

Для оценки потенциальных возможностей радиоинтерферометрических измерений излучения природных объектов при использовании различных конфигураций антенных систем проводится соответствующее математическое моделирование.

На рис. 3. представлен интерфейс программы математического моделирования измерений с отображением полученных результатов.

Вверху слева угловое распределение радиоярких температур тестового объекта. Внизу слева это же распределение в координатах  $\theta, \varphi$ . Вверху справа поля действительной и мнимой части функции видности  $V(u, v)$ . Внизу справа результаты восстановления углового распределения по отсчетам  $V(u, v)$  в координатах  $\theta, \varphi$ . Из рисунка видно, что функция видности подобна пространственному спектру исследуемого тестового объекта.

Для восстановления углового распределения радиоярких температур использована выборка  $V(u, v)$  размером  $64 \times 64$  и интервалом между отсчетами по  $u = v = 0,5$ . Наблюдаемые артефакты в восстановленном изображении связаны с ограниченностью выборки  $V(u, v)$  и могут быть скорректированы путем применения различных фильтров.

Программа моделирования позволяет проанализировать различные варианты расположения антенн, а также оценить влияние диаграммы направленности антенн и ширины полосы пропускания приемников.

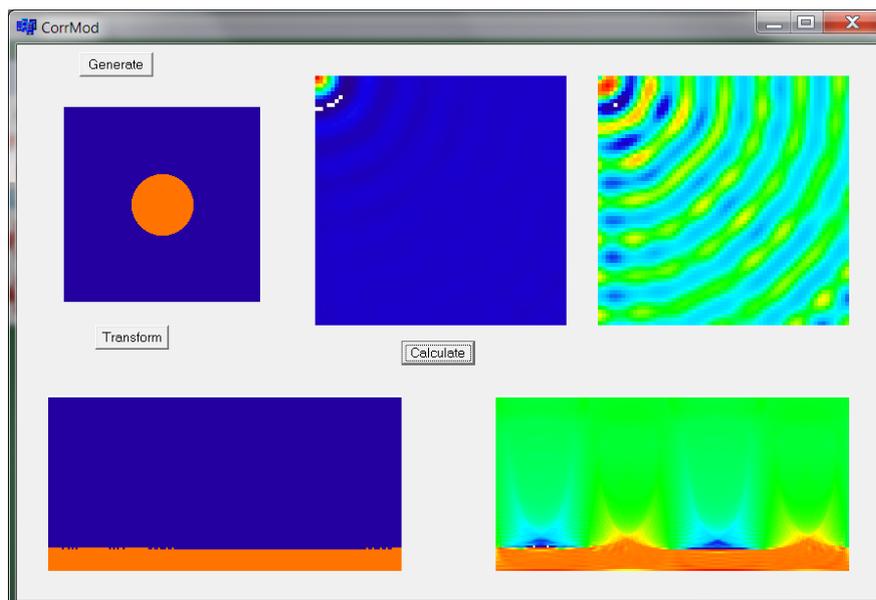


Рис. 3. Интерфейс программы математического моделирования измерений.

### Краткое описание проекта СВЧ радиометрической системы

Для экспериментальной оценки возможностей радиоинтерферометрических измерений природных объектов в настоящее время разрабатывается СВЧ радиометрическая система со следующими основными характеристиками:

- число антенн (и, соответственно, приёмников) – 4;
- $D$  (характерное расстояние между антеннами) – 2,5 м;
- АЦП с частотой отсчётов 1 ГГц при квадратурном преобразовании.
- полоса перестройки рабочих частот –  $16 \div 24$  ГГц;

СВЧ радиометрическая система состоит из 4 приемников и коррелятора. Блок-схема системы приведена на рис. 4.

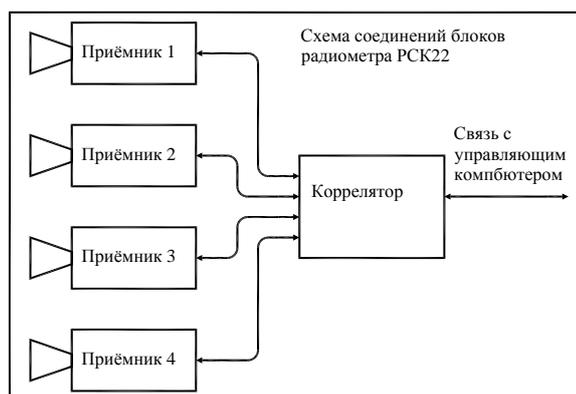


Рис. 4. Блок-схема СВЧ радиометрической системы.

Базовым расположением антенн радиометрической системы предполагается по сторонам квадрата. Расположение приемников и размеры конструкции могут изменяться для получения оптимальных результатов.

Наряду с корреляционными измерениями система должна проводить спектральные измерения путем перестройки частоты гетеродина по команде внешнего компьютера. Спектральные измерения важны для изучения характеристик атмосферы.

## **Выводы**

В работе предложен модифицированный метод использования интерферометрии или двумерного синтеза апертуры применительно к задачам ДЗЗ, позволяющий более полно использовать результаты измерений.

Большое значение для проектирования системы имеет математическое моделирование измерений, позволяющее проанализировать различные варианты расположения антенн, а также оценить влияние диаграммы направленности антенн и ширины полосы пропускания приемников.

Полученный в ходе выполнения данной работы опыт, будет использован при разработке аналогичных приборов космического базирования.

*Работа поддержана Госзаданием «ЦОХКИ-1» – регистрационный номер – 01201354304.*

## **Литература**

1. Томпсон А. Р., Моран Д. М., Свенсон Д. У. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии / Перевод с англ. под ред. Л.И. Матвеевко. — 2-е изд. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. - 624 с.
2. Kerr Yann H. Senior Member IEEE, Waldteufel et al. The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle // Proceedings of the IEEE . Vol. 98, No. 5, May 2010, P.666-687.
3. Ruf C. S., Swift C. T., Tanner A. B., Le Vine D. M. Interferometric synthetic aperture microwave radiometry for the remote sensing of the Earth // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1988, vol. 26, pp. 597–611.
4. Camps, A., Application of Interferometric Radiometry to Earth Observation // Univ. Politecnica de Catalunya, Barcelona, Spain, 1996.
5. Corbella I., Duffo N., Vall-llossera M., Camps A., Torres F., "The visibility function in interferometric aperture synthesis radiometry // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, vol. 42, pp. 1677.
6. Butora R., Camps A. Noise maps in aperture synthesis radiometric images due to cross-correlation of visibility noise // Radio Science, 2003, Vol. 38, NO. 4, P. 1067
7. Corbella I., Torres F., Camps A., Colliander A., Martín-Neira M., Ribó S., Rautiainen K., Duffo N., Vall-llossera M. MIRAS End-to-End Calibration: Application to SMOS L1 Processor // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, VOL. 43, NO. 5, P. 1126-1134
8. A. B. Tanner, W. J. Wilson, B. H. Lambrigsten, S. J. Dinardo, Sh. T. Brown, P. P. Kangaslahti, T. C. Gaier, Ch. S. Ruf, S. M. Gross, B. H. Lim, S. B. Musko, S. A. Rogacki, and J. R. Piepmeier Initial Results of the Geostationary Synthetic Thinned Array Radiometer (GeoSTAR) Demonstrator Instrument // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, Vol. 45, No. 7, PP. 1947-1957
9. Карелин А.В., Саворский В.П., Смирнов М.Т., Салихов Р.С., Туманов М.В. Перспективный подход к созданию космической системы мониторинга чрезвычайных ситуаций // Космонавтика и ракетостроение, 2017, №2 (95), С. 111-116.
10. M. A. Fischman, A. W. England, and Ch. S. Ruf, How Digital Correlation Affects the Fringe Washing Function in L-Band Aperture Synthesis Radiometry // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, VOL. 40, NO. 3, pp. 671-679
11. Corbella I., Torres F., Camps A., Colliander A., Duffo N., Vall-llossera M. Brightness-Temperature Retrieval Methods in Synthetic Aperture Radiometers // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, vol. 47, No. 1, pp. 285-294.