

# Моделирование СВЧ радиоинтерферометрических измерений для дистанционного зондирования Земли со спутников

М.Т. Смирнов, Д.М. Ермаков

ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН

Одной из проблем СВЧ радиометрического дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) со спутников является сравнительно низкое пространственное разрешение приборов, обусловленное необходимостью создания больших антенн. Создание таких антенн и выведение их на орбиту связано с тяжелыми техническими сложностями. Одним из путей решения проблемы является использование методов радиоинтерферометрии или пассивного синтеза апертуры.

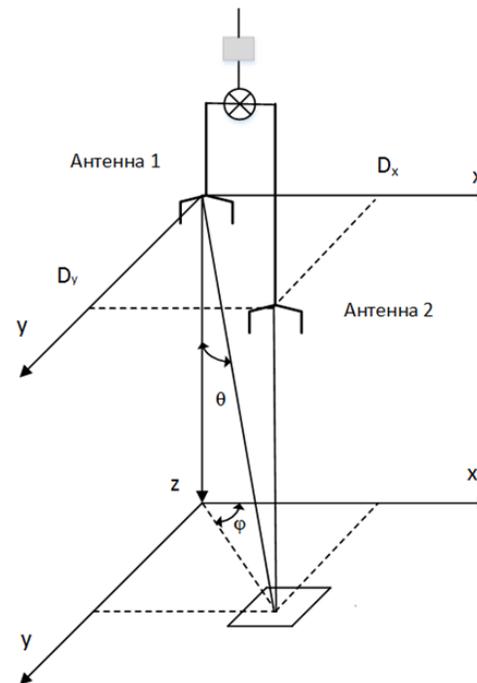
# Схема интерферометрии применительно к ДЗЗ

## Общая схема интерферометра



Тепловое излучение источника принимается антеннами, поступает на комплексный коррелятор (перемножитель) и, далее, на интегратор

## Схема наблюдения с ИСЗ



Система антенн размещена на космическом аппарате, находящемся на высоте  $h$ . Поля зрения антенн пересекаются, чтобы измерять взаимную корреляцию сигналов. В результате на выходе радиоинтерферометрической системы измеряется набор сигналов, пропорциональных корреляционной функции измеряемого поля (функция видности). Расстояние между антеннами – база интерферометра.

# Функция видности (visibility function)

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

Угловое распределение радиоярких температур

Нормированные диаграммы направленности пары антенн

$$T'_{ij}(\xi, \eta) = \frac{\sqrt{D_i D_j}}{4\pi} \frac{T_B(\xi, \eta) - T_r}{\sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2}} F_{ni}(\xi, \eta) F_{nj}^*(\xi, \eta) \tilde{r}_{ij} \left( -\frac{u\xi + v\eta}{f_0} \right)$$

Функция размытия интерференционных лепестков (Fringe washing function)

$$\tilde{r}_{ij}(\tau) = \frac{e^{-j2\pi f_0 \tau}}{\sqrt{B_i B_j} \sqrt{D_i D_j}} \int_0^\infty H_i(f) H_j^*(f) e^{j2\pi f \tau} df$$

Для прямоугольного фильтра  $\tilde{r}_{ij}(\tau)$  аппроксимируется функцией  $\sin(x)/x$

Безразмерные координаты антенн

$$u = (x_1 - x_2) / \lambda,$$

$$v = (y_1 - y_2) / \lambda$$

Угловые координаты направлений наблюдения

$$\xi = \sin\theta \cos\varphi,$$

$$\eta = \sin\theta \sin\varphi$$

Corbella, N. Duffo, M. Vall-Ilossera, A. Camps and F. Torres, "The visibility function in interferometric aperture synthesis radiometry," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 42, no. 8, pp. 1677-1682, Aug. 2004

# Восстановление углового распределения радиоярких температур

Угловое распределение радиоярких температур можно получить обратным преобразованием Фурье функции видности

$$T'_{ij}(\xi, \eta) = \iint_{-\infty}^{+\infty} V_{ij}(u, v) e^{j2\pi(u\xi + v\eta)} du dv$$

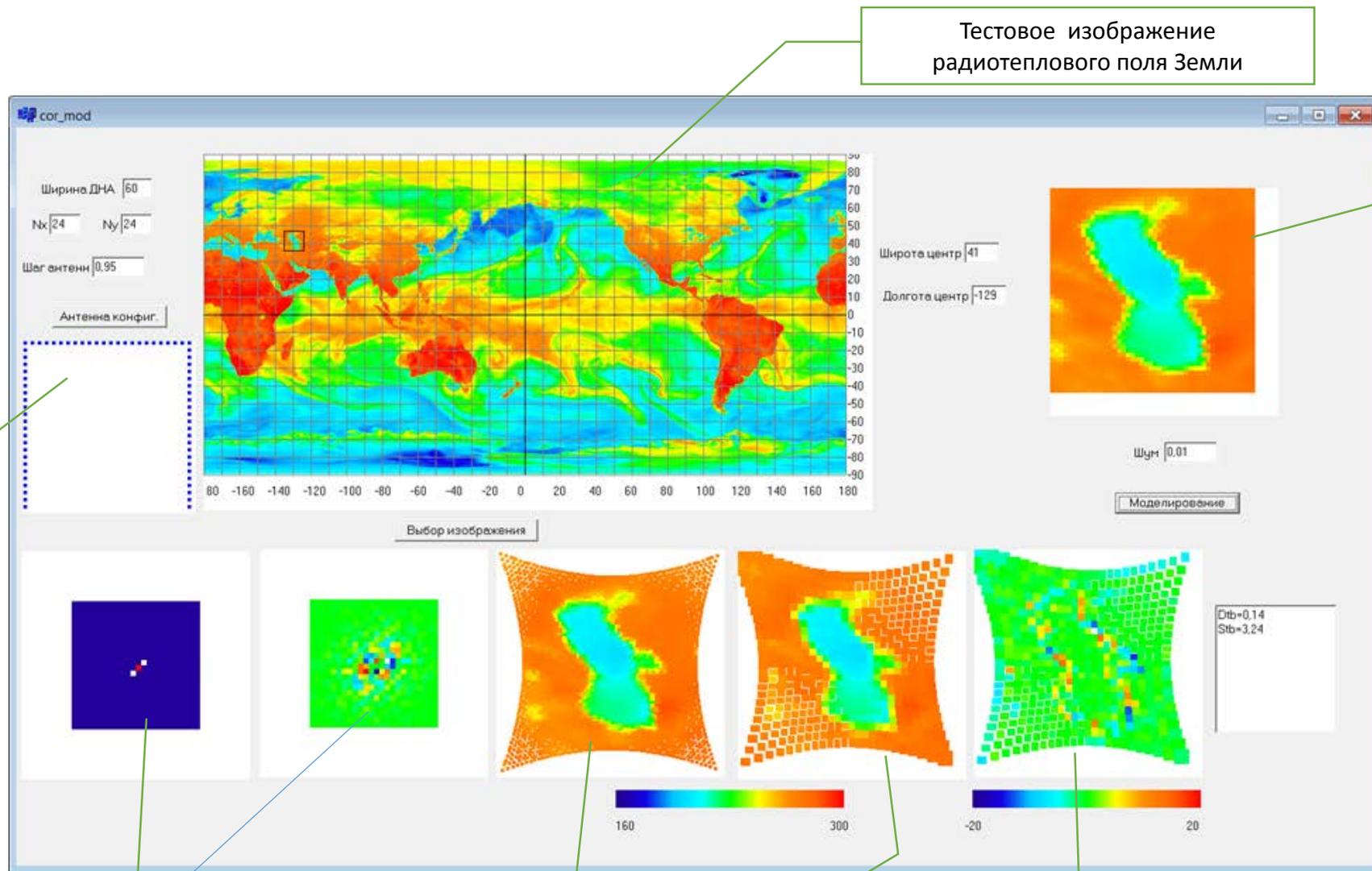
$$T'_{ij}(\xi, \eta) = \frac{\sqrt{D_i D_j}}{4\pi} \frac{T_B(\xi, \eta) - T_r}{\sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2}} F_{ni}(\xi, \eta) F_{nj}^*(\xi, \eta) \tilde{r}_{ij} \left( -\frac{u\xi + v\eta}{f_0} \right)$$

Альтернативный метод G-матрицы основан на матричном представлении функции видности и последующим решением системы линейных уравнений современными математическими методами

$$V_{ij}(u, v) = \iint_{\zeta^2 + \eta^2 \leq 1} T_B(\xi, \eta) g(\xi, \eta, u, v) d\xi d\eta$$

$$V = GT$$

# Интерфейс программы моделирования измерений



Тестовое изображение радиотеплового поля Земли

Выделенный фрагмент радиотеплового поля определяемый диаграммой направленности элементарных антенн

Конфигурация антенной системы

Действительная и мнимая части функции видности

Наблюдаемое изображение в координатах  $(\xi, \eta)$

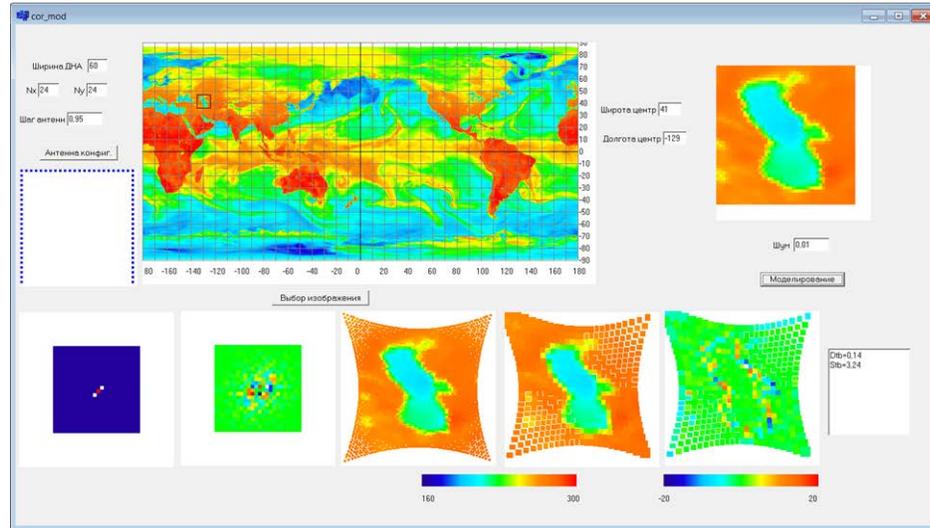
Восстановленное изображение

Ошибки восстановления

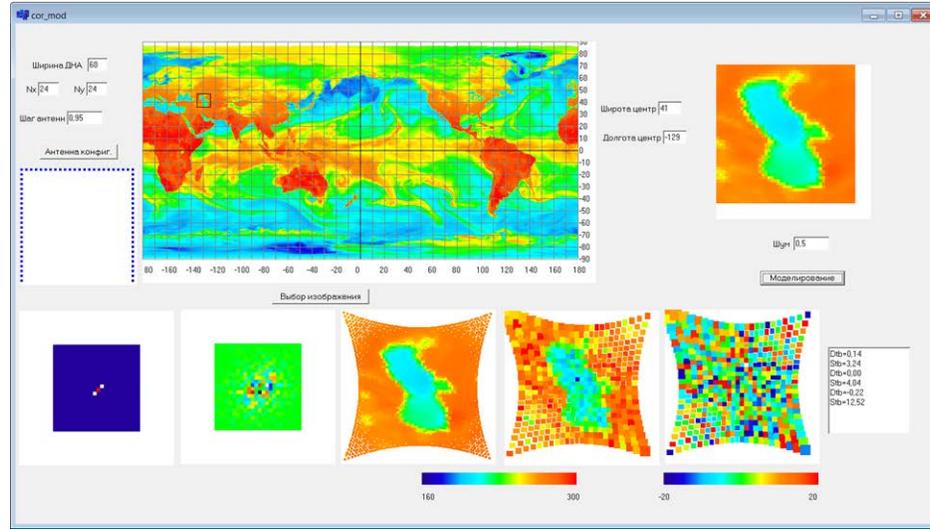
# Основные возможности программы моделирования

- Матрица яркостных температур тестового радиотеплового поля Земли сформирована на основе измерений приборов SSMIS, SSM/I на частоте 22ГГц, вертикальной поляризации
- Область наблюдения для моделирования измерений выбирается интерактивно
- Программа позволяет задавать параметры антенной системы:
  - Количество антенн
  - Ширина диаграммы направленности антенн
  - Расстояние между антеннами
- Оценка погрешности измерений осуществляется путем добавления шумовой составляющей к вычисленной функции видности с последующим восстановлением поля радиояркостных температур

# Ошибки восстановления поля радиояркостных температур



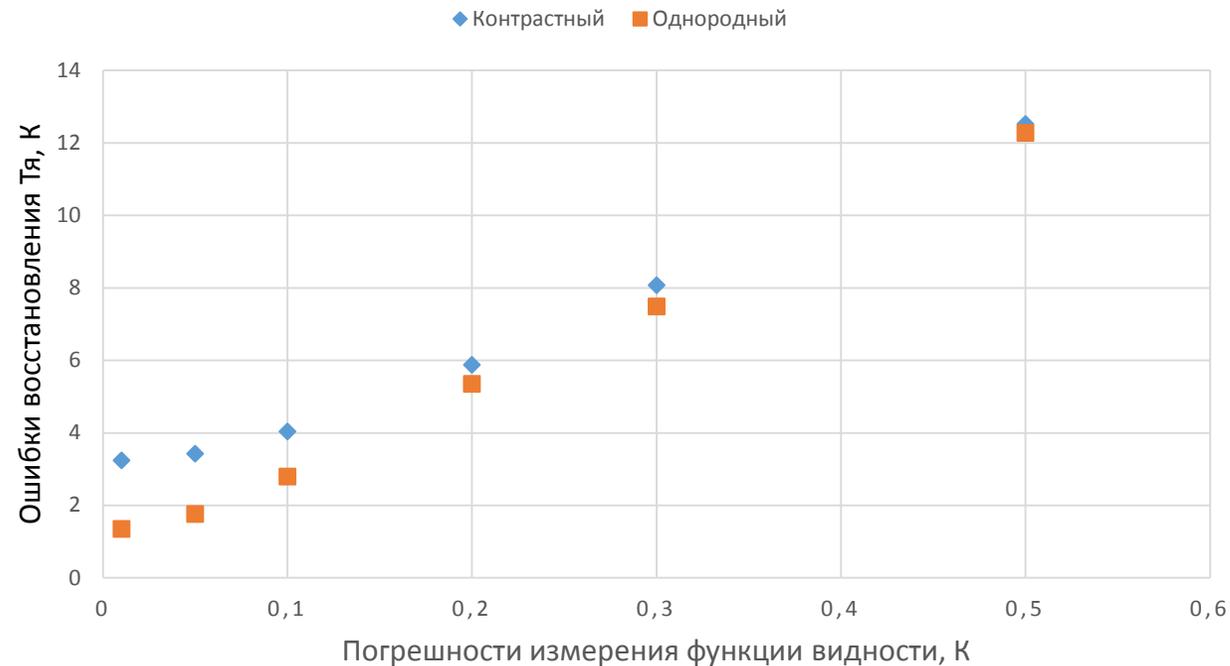
Погрешности измерений 0,01 К



Погрешности измерений 0,5 К

Основные ошибки восстановления поля радиояркостных температур при малых погрешностях измерений функции видности наблюдаются в переходных областях контрастных объектов и на краях изображений. При увеличении погрешностей измерений ошибки распределены более однородно.

# Оценка ошибок восстановления

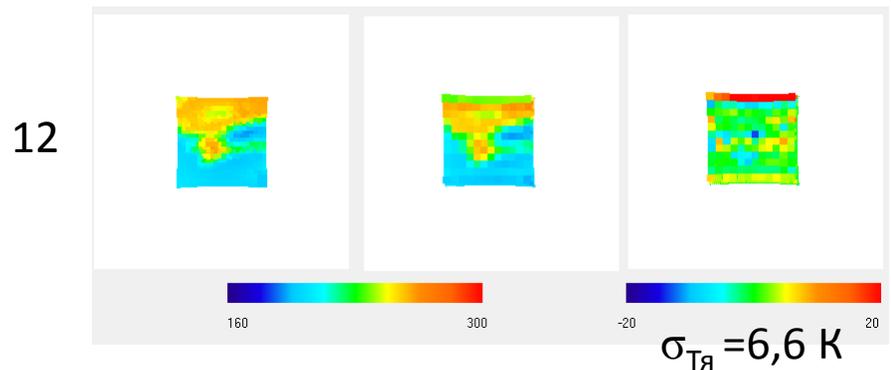
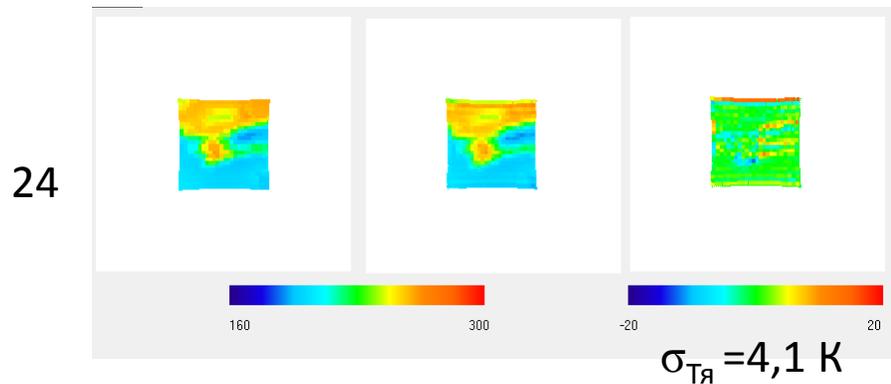
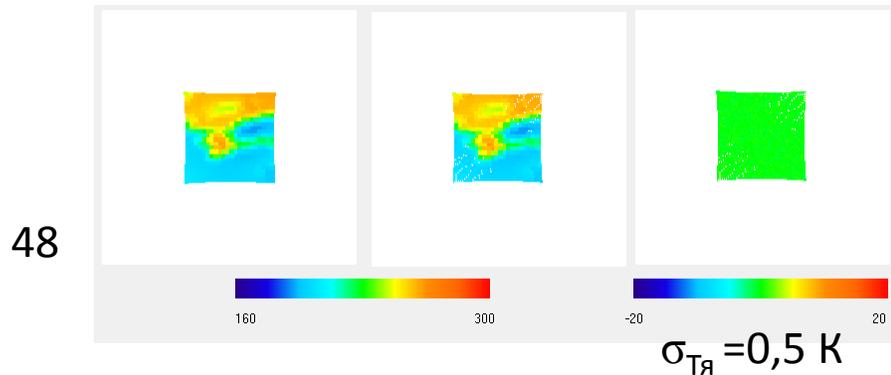


Ошибки восстановления поля радиоярких температур при малых погрешностях измерений зависят от степени контрастности исследуемого объекта.

# Пространственные характеристики системы

- Переменные  $u, v$  - пространственные частоты углового распределения радиотеплового изображения
- Набор значений  $u, v$  определяет качество восстановления радиотеплового поля
- Пространственное разрешение определяется максимальной базой интерферометра  $\Delta\theta \approx \frac{\lambda}{D}$
- Размер общего поля зрения (кадра) определяется минимальной базой и шириной диаграммы направленности элементарных антенн  $\Delta\theta_{max} \approx \frac{\lambda}{d}$
- Ухудшение пространственного разрешения вносит функция размытия интерференционных лепестков  $\tilde{r}_{ij}$ , определяемая шириной полосы пропускания приемника

# Влияние конфигурации антенной системы



Результаты моделирования показали, что большое значение имеет согласованность шага расстояния между антеннами и шириной диаграммы направленности элементарных антенн.

При заданном шаге расстояний между антеннами количество антенн определяет разрешающую способность системы. На рисунках приведен пример оценки влияния количества антенн на качество восстановления поля радиоярких температур.

# Выводы

- Разработанная программа моделирования позволяет оценить потенциальные погрешности измерений радиотеплового поля Земли
- Программа позволяет задавать параметры антенной системы:
  - Количество антенн
  - Ширина диаграммы направленности антенн
  - Расстояние между антеннами
- Оценены погрешности восстановления поля радиоярких температур в зависимости от погрешности измерений функции видности
- При разработке антенной системы большое значение имеет согласованность шага расстояния между антеннами и шириной диаграммы направленности элементарных антенн

Работа выполнена в рамках государственного задания и частично  
поддержана РФФИ (проект № 20-07-00200 А)