

# Особенности определения геофизических параметров Земли по радиоинтерферометрическим спутниковым измерениям

М.Т. Смирнов, Д.М. Ермаков

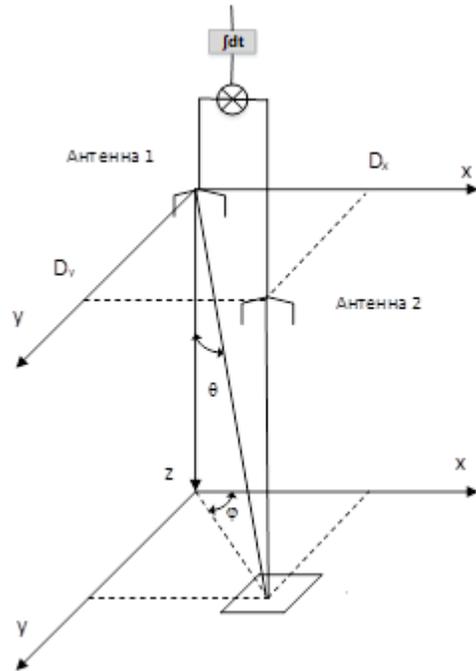
ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН

Основной особенностью радиоинтерферометрического метода является возможность использования разреженных антенных систем. При этом радиотепловое излучение Земли измеряется косвенно, по корреляционным функциям сигналов всех пар антенн (функции видности).

Это обуславливает специфику определения геофизических параметров Земли по таким измерениям.

# Схема интерферометрии применительно к ДЗЗ

Схема наблюдения с ИСЗ

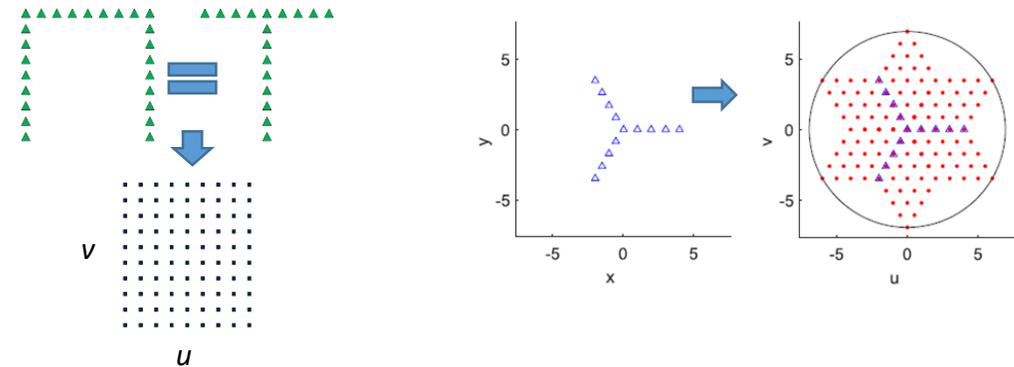


Система элементарных антенн размещена на космическом аппарате, находящемся на высоте  $h$ . Поля зрения антенн пересекаются, чтобы измерять взаимную корреляцию сигналов.

В результате на выходе радиоинтерферометрической системы измеряется набор сигналов, пропорциональных корреляционной функции измеряемого поля (функция видности).

Расстояние между антеннами – база интерферометра.

Расположение антенн и распределение отсчетов  $u, v$



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  $\Delta\theta_{max} \approx \lambda/d$ .

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

# Основная формула

Измеряемая функция видности (visibility function)

$$V(u, v) = \iint_{\zeta^2 + \eta^2 \leq 1} T_b(\xi, \eta) A(\xi, \eta) e^{-j2\pi(u\zeta + v\eta)} d\xi d\eta \quad (1)$$

Угловое распределение радиоярких температур

Аппаратная функция включающая диаграмму направленности антенн и передаточную функцию приемника

Безразмерные координаты антенн  $u = (x_1 - x_2)/\lambda$ ,  $v = (y_1 - y_2)/\lambda$

Угловые координаты направлений наблюдения:  $\xi = \sin\theta \cos\varphi$ ,  $\eta = \sin\theta \sin\varphi$

# Восстановление углового распределения радиоярких температур

Угловое распределение радиоярких температур можно получить обратным преобразованием Фурье функции видности

$$\frac{T_b(\xi, \eta)}{A(\xi, \eta)} = \iint_{-\infty}^{+\infty} V(u, v) e^{j2\pi(u\xi + v\eta)} dudv$$

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

$$G(u, v, \xi, \eta) = A(\xi, \eta) e^{-j2\pi(u\xi + v\eta)}$$

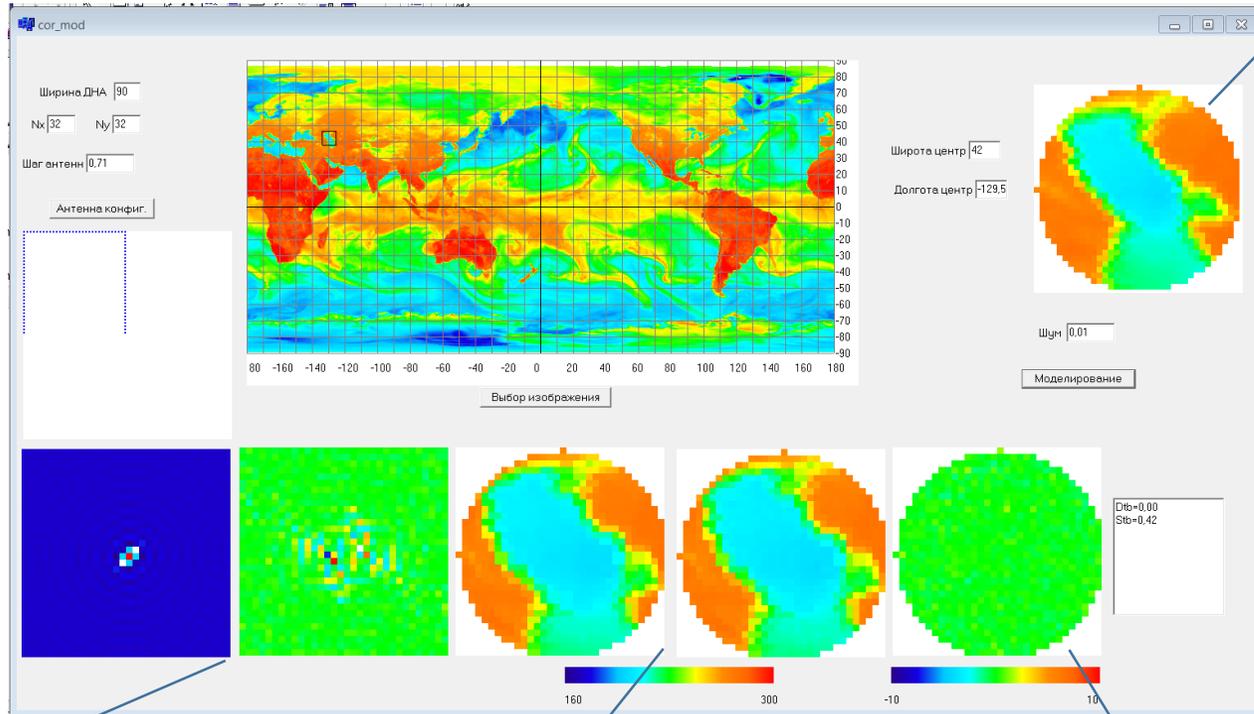
$$\mathbf{V} = \mathbf{GT}$$

Размерности векторов T и V могут не совпадать, поэтому решение ищется минимизацией разности

$$\min \|\mathbf{V} - \mathbf{GT}\|^2$$

# Моделирование измерений радиояркостных температур

## Интерфейс программы моделирования измерений



Увеличенный фрагмент выбранной области, ограниченный шириной диаграммы направленности элементарной антенны

Для восстановления поля радиояркостных температур Земли используется 2 основных метода: это двумерное преобразование Фурье, измеренной функции видности, и обращение матрицы для дискретизированного представления взаимосвязи радиотеплового поля и функции видности.

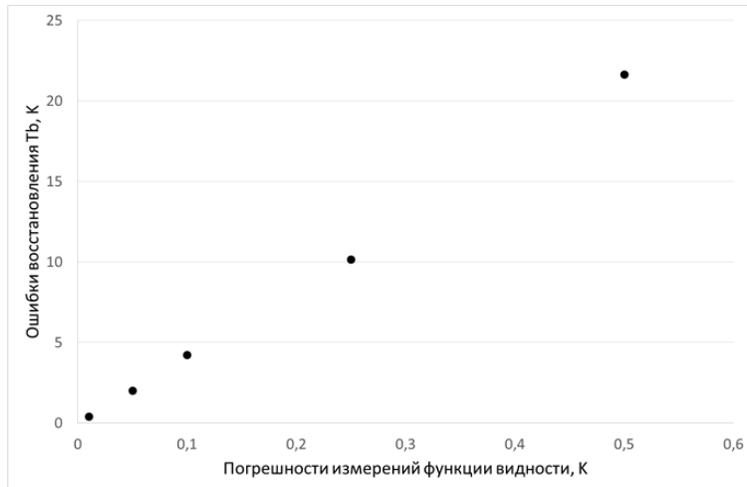
Разработано 2 программы, реализующие эти методы с одинаковым интерфейсом. Анализ результатов их использования показал, что преобразование Фурье работает быстрее, но матричный метод является более гибким.

Действительная и мнимая части функции видности

Исходное и восстановленное угловые распределения радиояркостных температур

Ошибки восстановления, обусловленные погрешностями измерений

# Ошибки восстановления $T_b$ и повышение точности



Ошибки восстановления радиоярких температур по результатам моделирования без регуляризации

Поскольку для восстановления углового распределения радиоярких температур требуется фактически решение интегрального уравнения, возникают довольно большие ошибки. Для повышения точности требуется использование различных способов регуляризации решения. В случае БПФ это различные окна, а в методе G матрицы – использование априорной информации о  $T_b$ .

Основным методом регуляризации является метод Тихонова и его модификации

$$\min \|V - GT\|^2 + \mu \|T\|^2$$

# Определение геофизических параметров Земли

Модельная или регрессионная зависимость радиоярких температур от набора геофизических параметров

$$T_b(f_j, \theta) = c_0(f_j, \theta) + \sum_{i=1}^N c_i(f_j, \theta) x_i$$

$N$  – количество параметров,  $M$  – количество частот ( $f_j$ ),  $N \leq M$

В матричном виде:  $T=CX$

Решение ищется аналогично минимизацией разности измеренных и рассчитанных по модели радиоярких температур.

$$\|CX - T\|^2 + \alpha \|LX\|^2 = \min_{\psi}$$

В качестве априорных данных для регуляризации можно использовать пространственно-временную статистику  $X$

$$\|LX\|^2 = \left\| \sum_{i=1}^m \gamma_i D(x_i / \sigma_i) \right\|^2$$

Одним из вариантов регуляризации может быть алгоритм предложенный в работе

*Лобанова Е.Н., Смирнов М.Т. Использование сплайн-аппроксимации для синтеза полей геофизических параметров Земли по спутниковым СВЧ радиометрическим многоканальным измерениям // Исследование Земли из космоса, 1992, № 4, С. 40-47*

Решение осложняется наличием угловой зависимости коэффициентов.

Возможно объединение процедур восстановления радиоярких температур и определения параметров

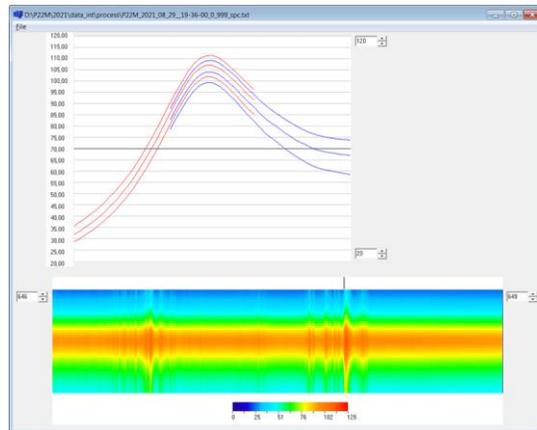
$$V=GCX$$

# Использование наземных измерений для отработки подходов к использованию априорной информации

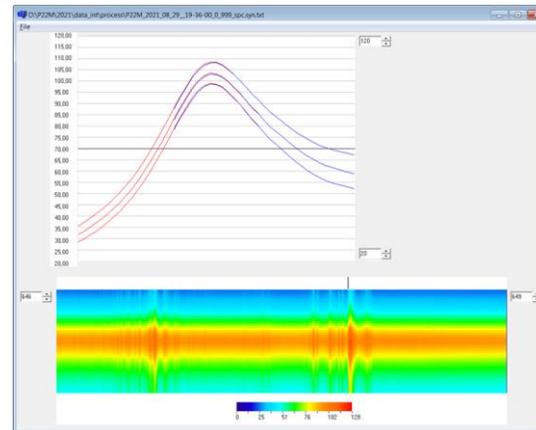
Для изучения статистических характеристик радиотеплового поля атмосферы использовались измерения выполненные при помощи радиометра спектрометра P22M.

Для повышения точности измерений возможно накопление сигнала на достаточно большом интервале времени. Особенно актуально это при использовании радиоинтерферометрических измерений с геостационарных спутников. При этом необходимо учитывать временные изменения объекта исследований. Нами была исследована возможность и алгоритм коррекции такого рода временных изменений на основе спектральных измерений прибора P22M.

## Быстрые изменения объекта исследований



До коррекции



После коррекции

Время измерения спектра при помощи последовательного сканирования по частоте прибора P22M получается значительным и за это время возможно изменение состояния атмосферы. Полученная информация на разных частотах при этом будет соответствовать разным состояниям атмосферы.

Для коррекции используется избыточность информации, содержащаяся в области пересечения спектров двух каналов радиометра.

*Подробнее методика коррекции излагается в докладе **Ермаков Д.М., Смирнов М.Т.** «Коррекция спектров радиотеплового излучения атмосферы, регистрируемых в нестационарных гидрометеорологических условиях»*

# Выводы

- Применение радиоинтерферометрического метода связано с относительно большими погрешностями измерений радиоярких температур Земли и, соответственно, погрешностей определения геофизических параметров
- Анализ результатов их использования показал, что преобразование Фурье работает быстрее, но матричный метод является более гибким
- Для регуляризации решения задач как восстановления поля радиоярких температур, так и геофизических параметров Земли необходимо использовать аналогичные подходы, основанные на статистических характеристиках радиотеплового поля и пространственно-временной изменчивости искомых параметров
- Для учета временных изменений измеряемого объекта за время накопления сигнала требуется некоторая избыточность измерений

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