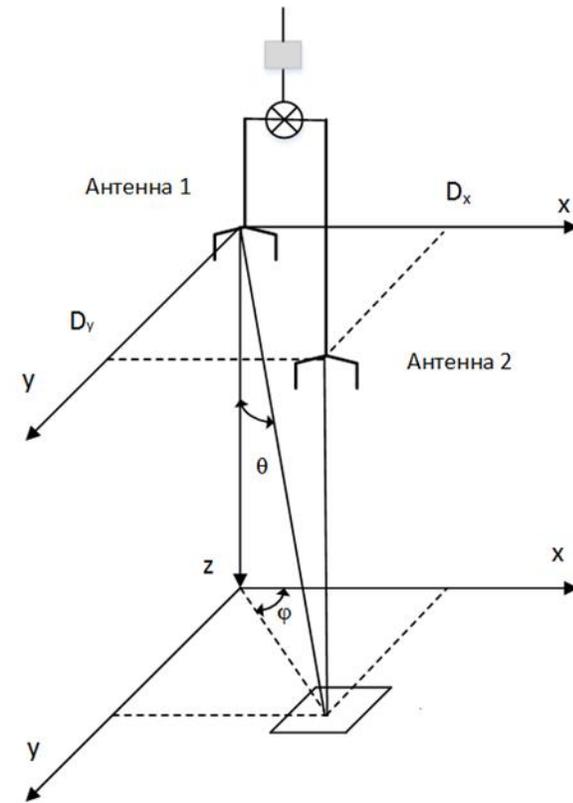


Совместное использование методов радиоинтерферометрии и панорамных измерений для повышения информативности СВЧ радиометрических измерений

М.Т. Смирнов¹, М.В. Данилычев², Д.М. Ермаков¹

- 1) ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН
- 2) ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН

Схема интерферометрии применительно к ДЗЗ



Функция видности (visibility function)

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

Нормированные
диаграммы
направленности антенн

Угловое распределение
радиоярких температур

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

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 $\sin(x)/x$

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

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

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

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

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

Преобразование Фурье

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

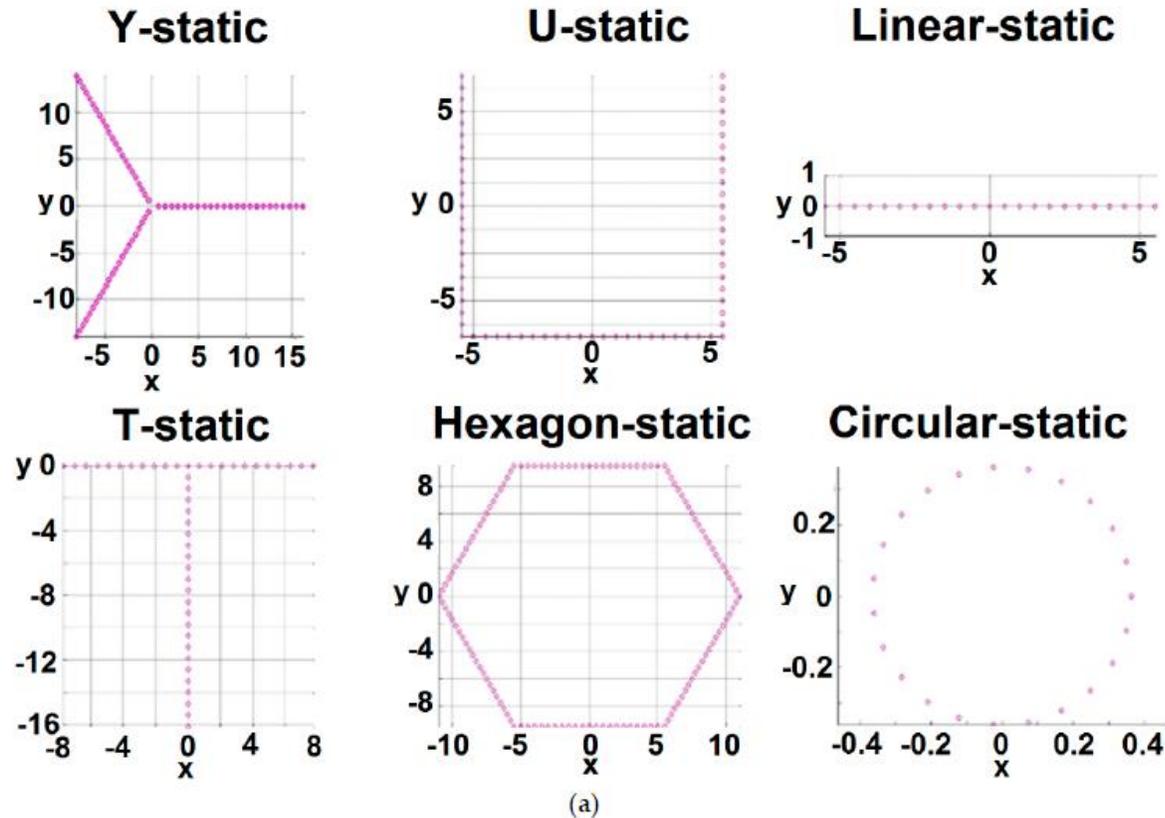
$$T'_{ij}(\xi, \eta) = \frac{\sqrt{D_i D_j}}{4\pi} \frac{T_B(\xi, \eta) - T_r}{\sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2}} F_{ni}(\xi, \eta) F_{nj}^*(\xi, \eta) \tilde{r}_{ij} \left(-\frac{u\xi + v\eta}{f_0} \right)$$

Метод G матрицы

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

$$V = GT$$

Расположение антенн



Camps, A.; Park, H.; Kang, Y.; Bandeiras, J.; Barbosa, J.; Vieira, P.; Friaças, A.; D'Addio, S. Microwave Imaging Radiometers by Aperture Synthesis Performance Simulator (Part 2): Instrument Modeling, Calibration, and Image Reconstruction Algorithms. *J. Imaging* **2016**, *2*, 18

Приборы с радионтерферомерами для задач ДЗЗ

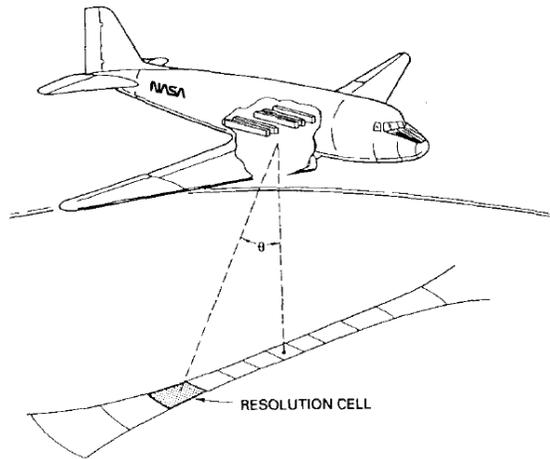


Fig. 1. Configuration of the ESTAR aircraft prototype.

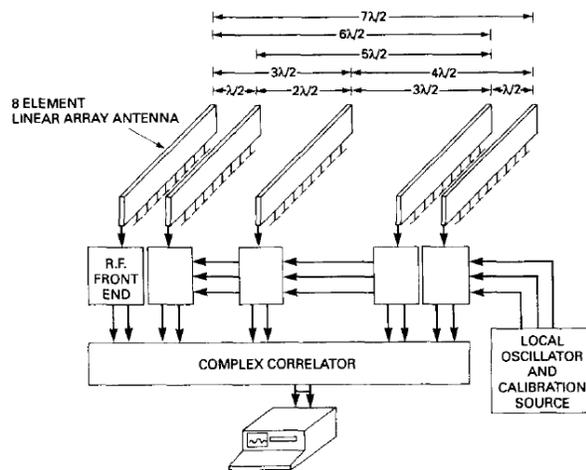
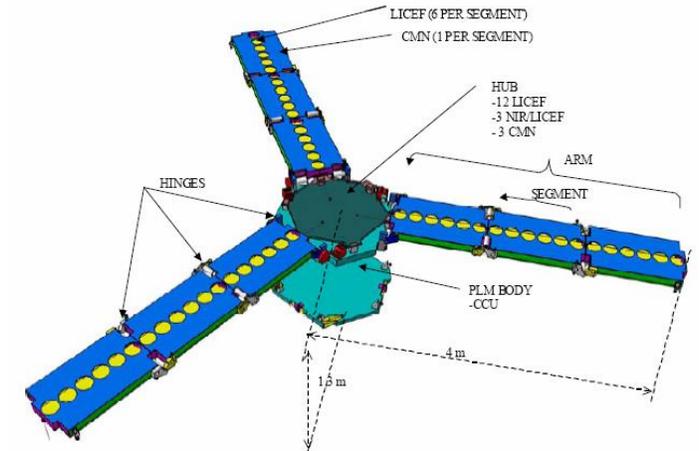
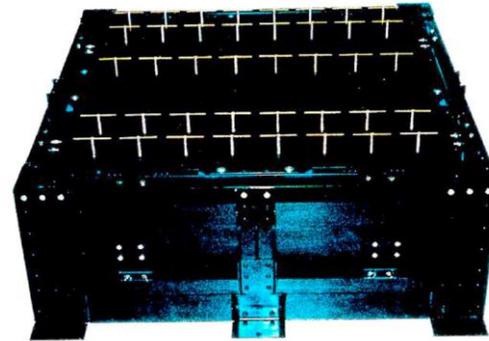
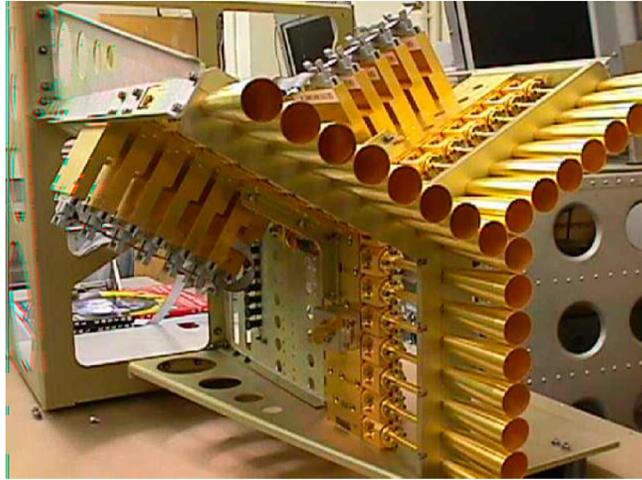


Fig. 2. Block diagram of the ESTAR instrument.



SMOS

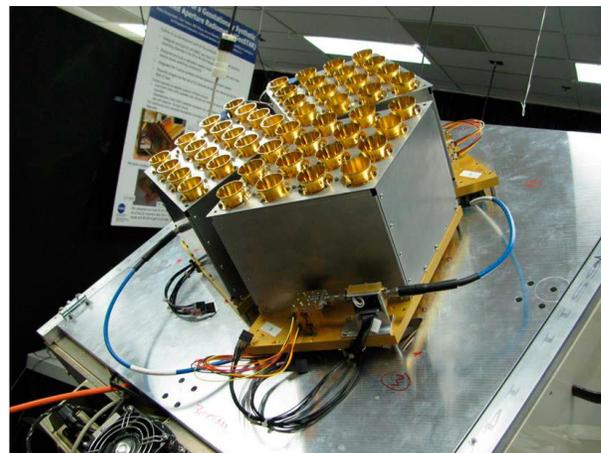
GeoSTAR



GeoSTAR

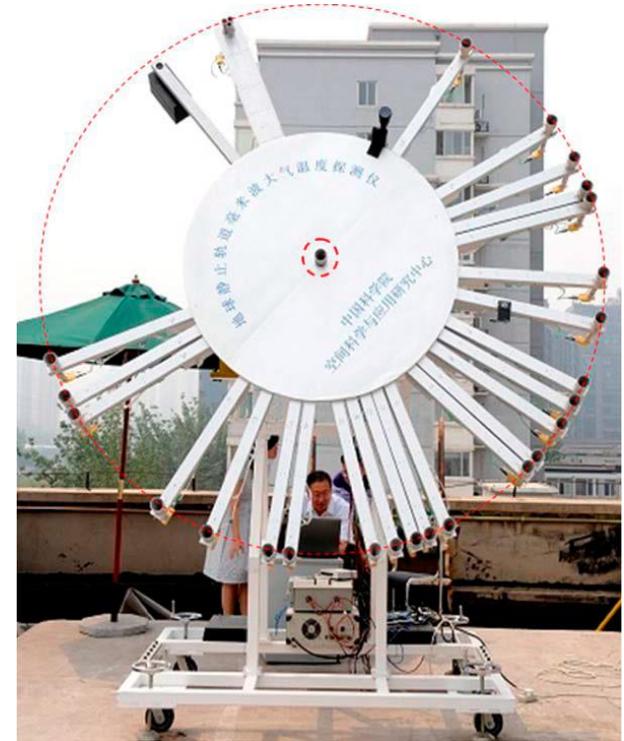
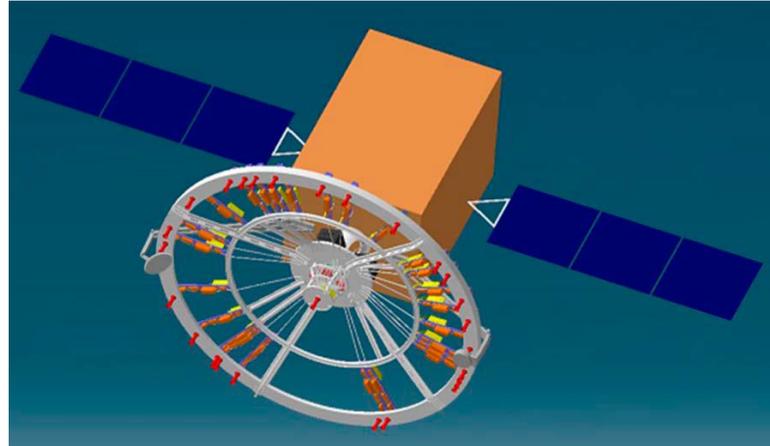


GeoSTAR-III

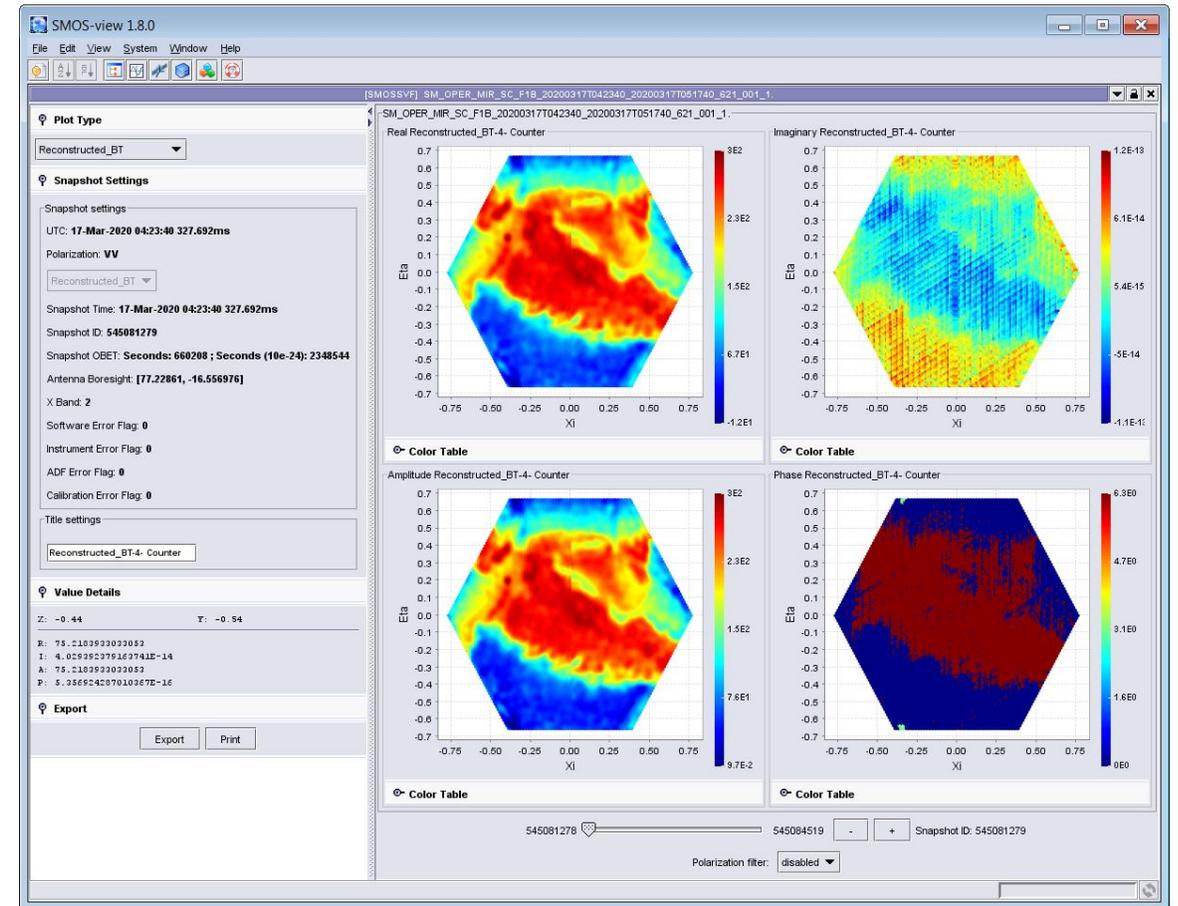
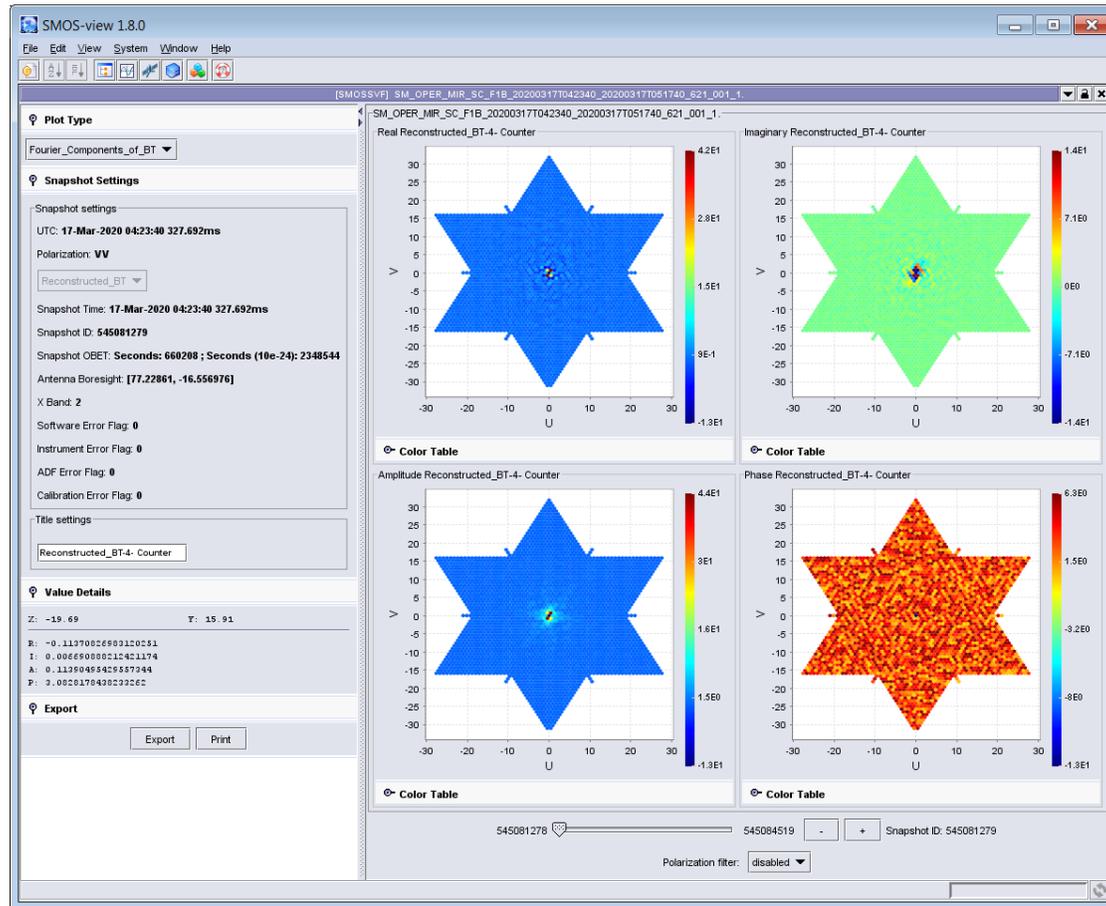


GeoSTAR 183-GHz

GIMS (Geostationary Interferometric Microwave Sounder)



SMOS View



Пространственное разрешение

- Переменные u, v можно интерпретировать как пространственные частоты восстанавливаемого изображения в угловых координатах
- Набор этих переменных определяет качество восстановления радиотеплового поля, пространственное разрешение и ширину поля зрения системы
- Пространственное разрешение определяется максимальной базой интерферометра а размер общего поля зрения (кадра) – минимальной
- Некоторое ухудшение пространственного разрешения вносит функция размытия интерференционных лепестков \tilde{r}_{ij} , определяемая шириной полосы пропускания приемника

$$\Delta\theta \approx \frac{\lambda}{D}$$

$$\Delta\theta_{max} \approx \frac{\lambda}{d}$$

Достоинства и недостатки

- Главным достоинством радионтерферометрического метода, часто называемого пассивным синтезом апертуры, является
 - высокое пространственное разрешение и возможность
 - получения кадра радиотеплового излучения без сканирования по пространству
- К недостаткам его относятся
 - сравнительно высокие погрешности измерений радиояркостных температур, обусловленные уменьшением реальной площади антенны

Теоретические оценки точности измерений

Флуктуационная чувствительность классического радиометра

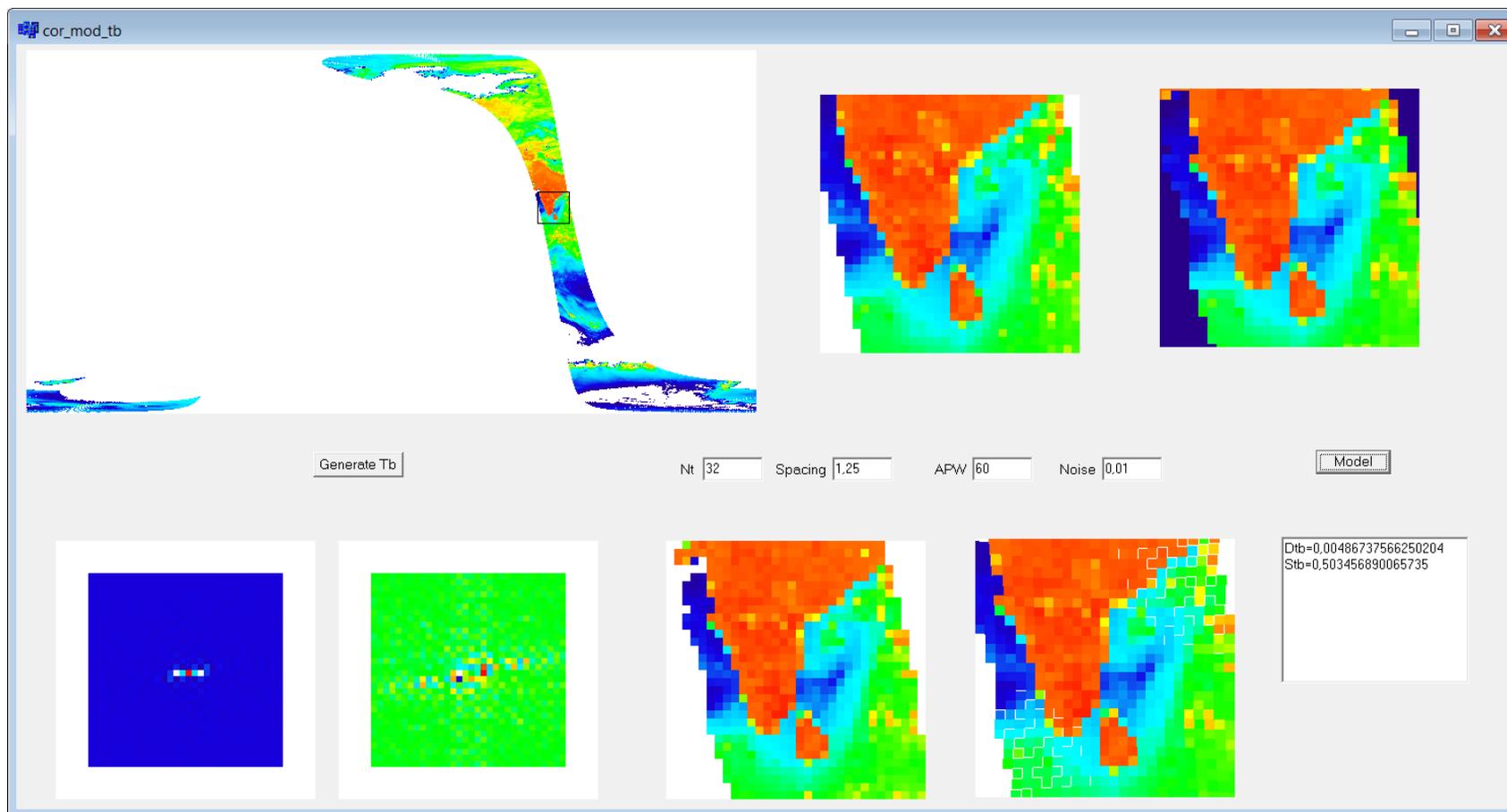
$$\sigma_T = \frac{T_A + T_r}{\sqrt{B\tau}}$$

Чувствительность системы интерферометров

$$\sigma_T \approx A \frac{T_A + T_r}{\sqrt{B\tau}} \alpha_W \sqrt{N_V}$$

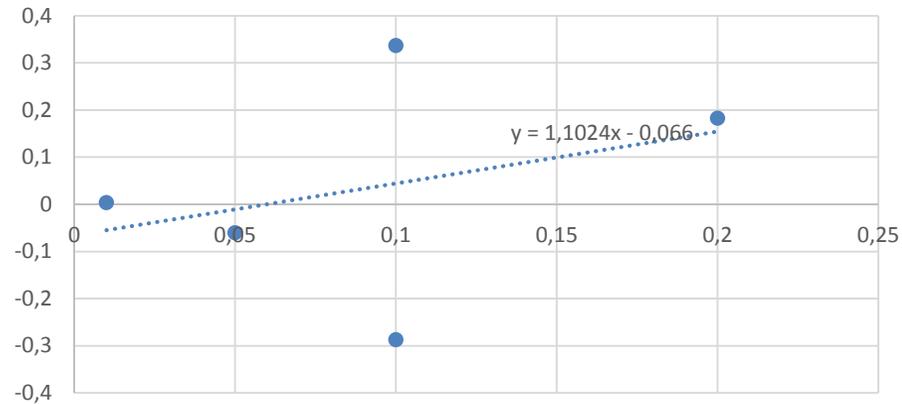
$$\alpha_W = \sqrt{\sum_m \sum_n \frac{W_{mn}^2}{N_V}}$$

Моделирование измерений

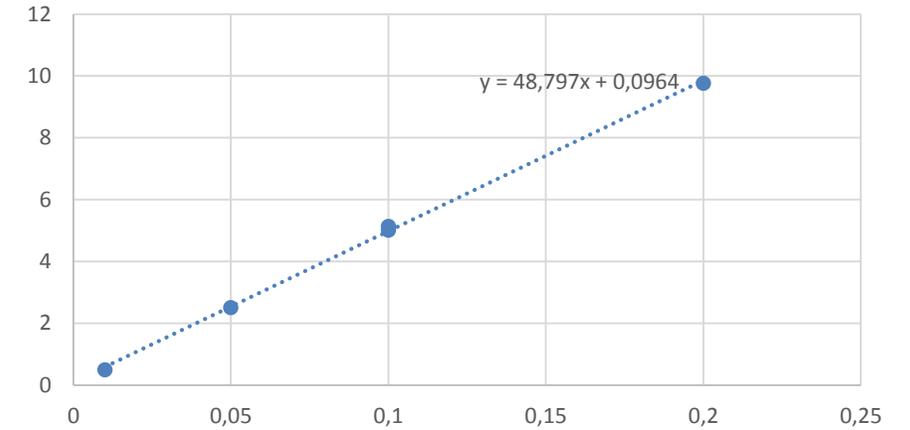


Ошибки восстановления

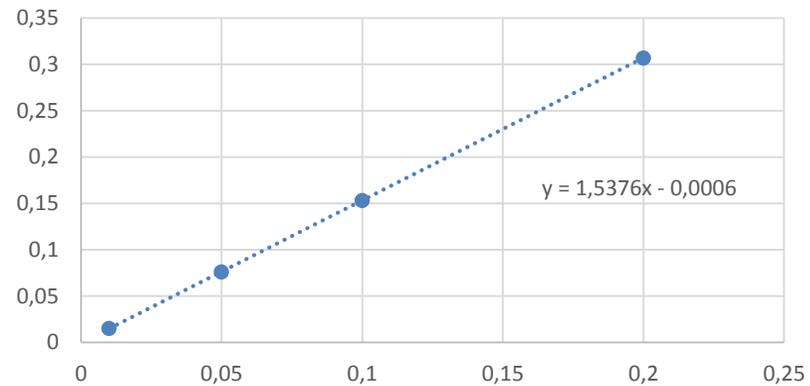
Случайные ошибки



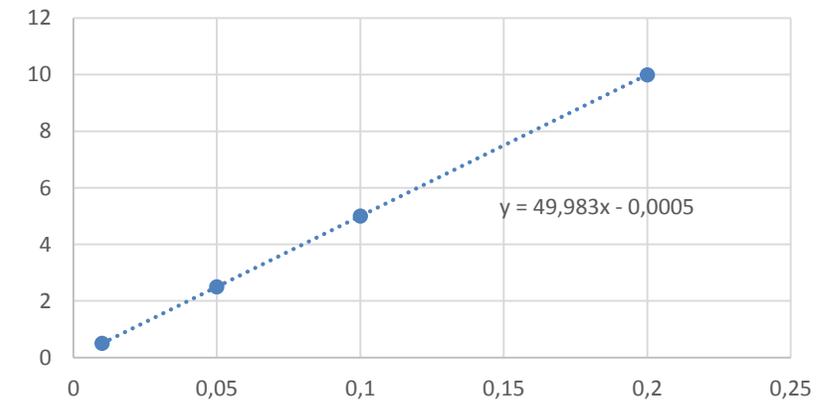
Случайные ошибки



Регулярное смещение



Регулярное смещение



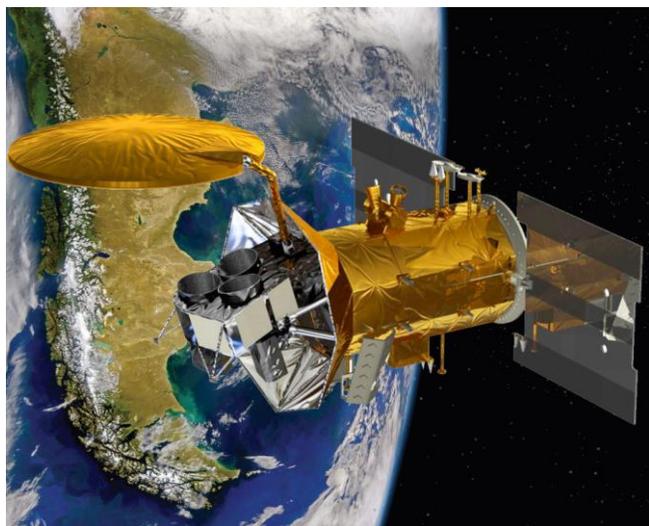
Смещение среднего значения

Среднеквадратическая ошибка

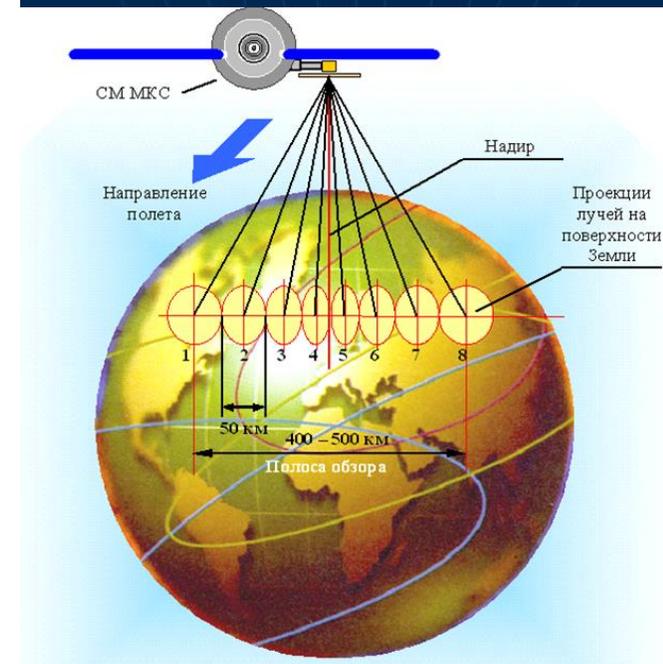
GeoSTAR III



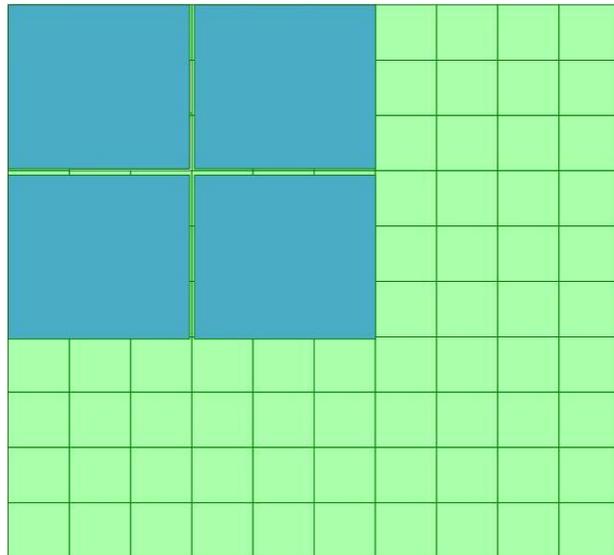
Панорамные радиометры



SAC-D/Aquarius



Совместное использование радиоинтерферометрических и панорамных радиометров



- Радиояркостные температуры на низких пространственных частотах могут быть измерены более точно по данным панорамных радиометров
- Измеренные средние значения на соответствующих пространственных частотах можно использовать для регуляризации восстановления радиояркостных температур по радиоинтерферометрическим измерениям

Выводы и перспективы

- Радиointерферометрические измерения находят все более широкое применение в задачах ДЗЗ
- Предложено использовать панорамные измерения для повышения точности радиointерферометрических измерений
- Эффективность регуляризации при совместном использовании радиointерферометрических и панорамных измерений требует дальнейшей оценки

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