

# Особенности алгоритмов и программ определения геофизических параметров Земли по данным дистанционного зондирования при помощи радиоинтерферометрической системы

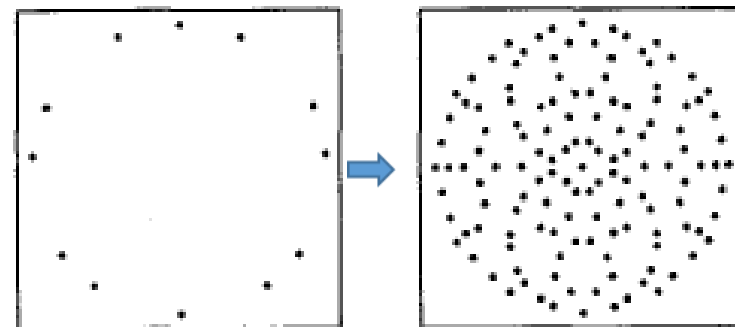
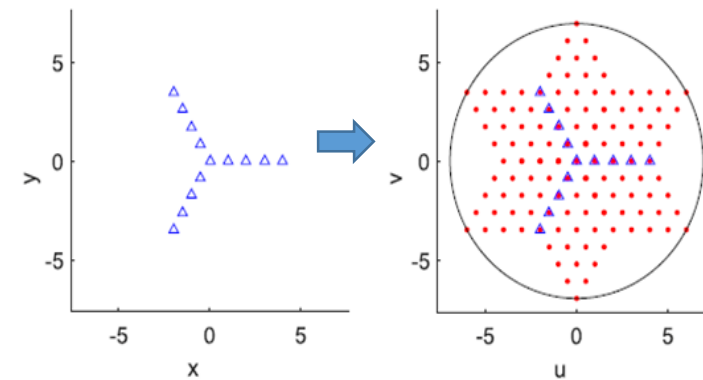
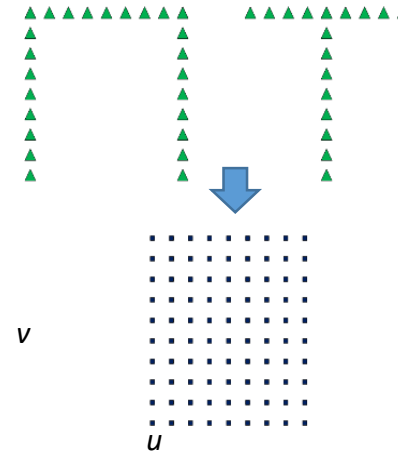
Смирнов М.Т., Аквилонова А.Б.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
Фрязинский филиал (ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)

# Особенности измерений

Антенна радиоинтерферометрической системы не является сплошной а состоит из набора элементарных антенн имеющих широкую диаграмму направленности и расположенных так, чтобы обеспечить различные базы интерферометра. Поля зрения антенн пересекаются, чтобы иметь возможность измерять взаимную корреляцию поступающих от них сигналов. Тепловое излучение источника принимается антеннами, поступает на комплексный коррелятор (перемножитель) для каждой пары антенн и, далее, на интеграторы. В результате измерений на выходе радиоинтерферометрической системы измеряется набор сигналов, пропорциональных корреляционной функции измеряемого поля или, как принято в теории радиоинтерферометрии, функции видности  $V$ .

На рисунках приведены различные схемы расположения элементарных антенн и получаемые по ним наборы отсчетов функции видности.



# Восстановление углового распределения радиотеплового излучения

Связь функции видности с угловым распределением радиоярких температур описывается формулой (1)

Из нее видно, что угловое распределение радиоярких температур можно получить обратным преобразованием Фурье

Алгоритмы восстановления поля радиоярких температур Земли обычно используют быстрое преобразование Фурье. Это позволяет существенно ускорить работу программ, но при этом применить регуляризацию бывает очень сложно.

Уравнение (1) можно представить в матричном виде

$$V=AT$$

Использование алгоритмов обращения аппаратной матрицы формирования функции видности более удобно для этих целей, хотя требует более существенных вычислительных затрат. Поскольку измерения производятся с погрешностями, то используются методы минимизации с регуляризацией.

Измеряемая функция видности  
(visibility function)

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

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 параметров

В общем случае зависимость радиоярких температур системы атмосфера-подстилающая поверхность нелинейная. При этом определение параметров атмосферы производится путем минимизации среднеквадратичной разности между измеренными и модельными значениями спектров радиоярких температур.

$$p^* = \arg \min \sum_{i=1}^N (T_{bi} - \tilde{T}_{bi}(p))^2$$

где  $T_{bi}$  - измеренные значения радиоярких температур на частоте  $i$ ,  $\tilde{T}_{bi}$  - соответствующие модельные значения для вектора параметров атмосферы  $p$ . В качестве параметров  $p$  могут использоваться как интегральные параметры (интегральное влагосодержание атмосферы, водозапас облаков), отклонения влажности атмосферы от стандартного высотного профиля и другие параметры, включая параметры подстилающей поверхности.

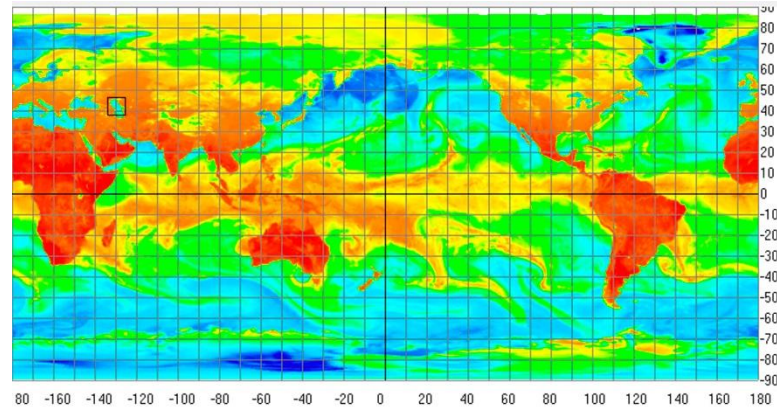
# Программные модули

Для использования в перспективных разработках радиоинтерферометрических систем ДЗЗ нами разработаны следующие программные модули:

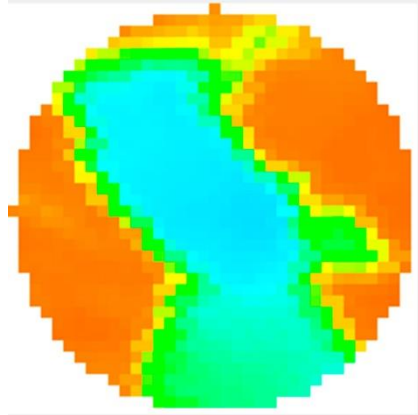
- Моделирования радиоинтерферометрических измерений
- Восстановления радиояркостных температур путем обратного преобразования Фурье
- Восстановления радиояркостных температур путем обращения матрицы, описывающей преобразование сигналов в приборе
- Расчета радиояркостных температур системы океан –атмосфера по нескольким моделям
- Определения параметров путем минимизации целевой функции, определяемой разностью измеренных и вычисленных по моделям радиояркостных температур
  - Определение интегральных параметров атмосферы по спектральным измерениям в области 22 ГГц
  - Восстановления профиля влажности атмосферы по спектральным измерениям в области 22 ГГц

# Модуль моделирования измерений

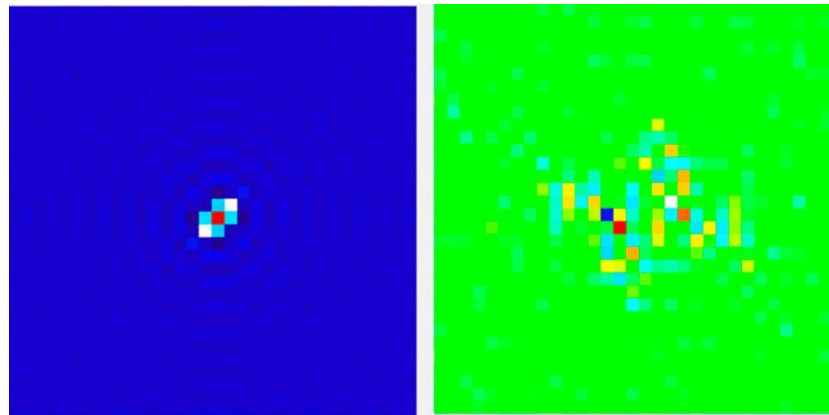
Тестовое изображение  
радиоярких температур  
Земли



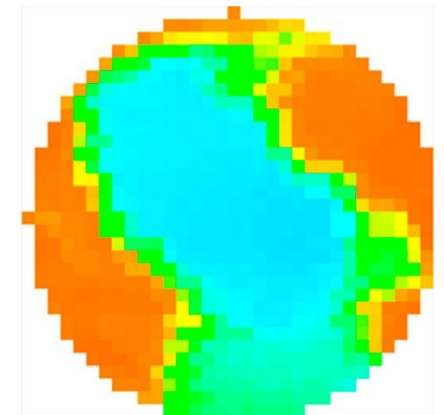
Восстановление изображения  
выполняется при помощи БПФ  
или обращения матрицы  
аппаратной функции



Фрагмент изображения,  
соответствующий полю зрения системы



Комплексная функция видности + шумы  
(погрешности измерений)



Восстановленное  
изображение

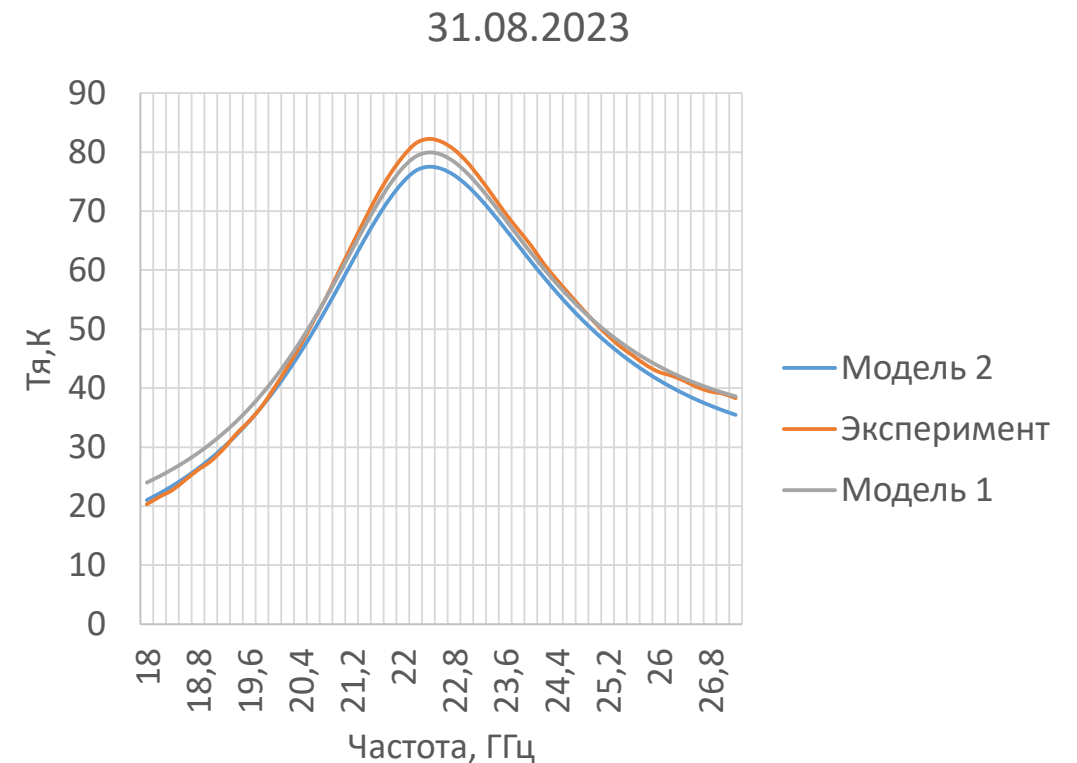
Поскольку антенна радиоинтерферометрической системы не является сплошной и, соответственно, имеет относительно небольшую эффективную площадь, ошибки измерений функции видности при восстановлении радиоярких температур усиливаются примерно в 20-30 раз в зависимости от ее конфигурации. Повышение точности может быть получено путем усреднения результатов измерений с одинаковыми базами.

# Модуль расчета радиоярких температур атмосферы

Качество расчетов радиоярких температур атмосферы оценивалось путем сравнения с натурными спектральными измерениями ее радиотеплового излучения.

Расчет радиоярких температур атмосферы может быть выполнен по двум моделям поглощения атмосферными газами

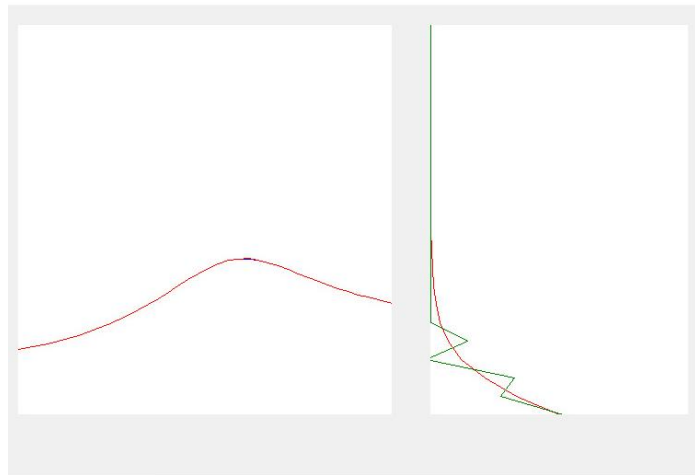
На рисунке приведено сравнение расчетов радиоярких температур по данным радиозондирования ближайшей станции



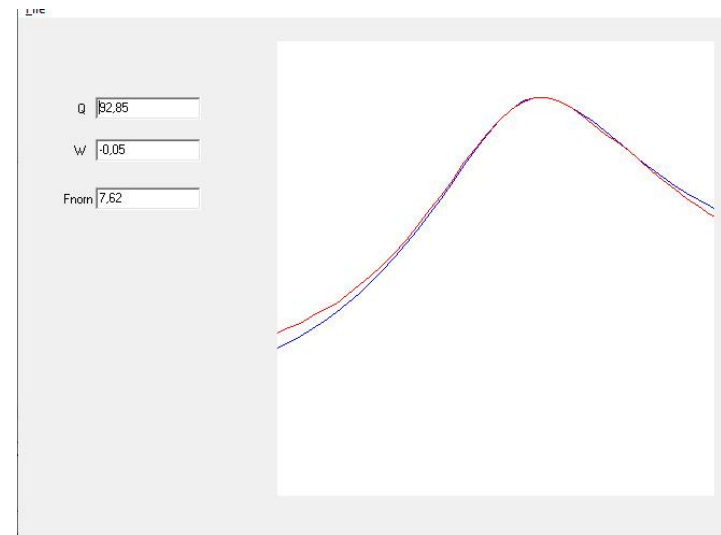
# Модуль восстановления параметров атмосферы

Восстановление параметров атмосферы производится путем минимизации разности измеренных и рассчитанных по модели радиоярких температур. Модуль реализован на базе библиотеки Cminpack (<http://devernay.free.fr/hacks/cminpack/>)

На рисунках приведены примеры восстановления параметров атмосферы путем минимизации разности измеренных и рассчитанных по модели спектром нисходящего излучения атмосферы.



Профиль влажности атмосферы



Интегральные параметры



# Литература

- *Смирнов, М. Т.* Моделирование спутниковых СВЧ радиоинтерферометрических измерений для дистанционного зондирования Земли / М. Т. Смирнов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2022. – Т. 19, № 2. – С. 23-31. – DOI 10.21046/2070-7401-2022-19-2-23-31. – EDN NIZODS.
- *Смирнов М.Т., Ермаков Д.М.* Особенности определения геофизических параметров Земли по радиоинтерферометрическим спутниковым измерениям // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2022. С. 66. DOI 10.21046/20DZZconf-2022a