

УДК 621.396

Проблемы аппаратного обеспечения измерений характеристик больших антенн по сигналам внеземных радиисточников

А. В. Калинин¹, В. А. Калинин², М. Н. Егоров³, А. Ю. Акулов⁴, М. В. Ширшов⁵, А. Е. Рогов⁶

¹д. т. н., ²к. ф.-м. н., ⁶к. т. н.,

^{1,2,3}Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского,

^{4,5,6}АО «Российские космические системы»

e-mail: andrey@kalinin.nnov.ru

Аннотация. Рассматривается современное состояние измерительных средств для экспериментального исследования радиотехнических характеристик больших антенн наземных комплексов управления в сантиметровом диапазоне волн. Приводятся структурные схемы и основные параметры разрабатываемых макетов модуляционных и корреляционных радиометров, а также экспериментальные результаты, полученные с их использованием.

Ключевые слова: зеркальная антенна, радиоизмерения, внеземной радиисточник, модуляционный и корреляционный радиометры

Challenges of Hardware Development for Measurement of Large Antenna Characteristics by the Extraterrestrial Radio Sources

A. V. Kalinin¹, V. A. Kalinin², M. N. Egorov³, A. Yu. Akulov⁴, M. V. Shirshov⁵, A. E. Rogov⁶

¹doctor of engineering science, ²candidate of physics and mathematics, ⁶candidate of engineering science,

^{1,2,3}Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod,

^{4,5,6}Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: andrey@kalinin.nnov.ru

Abstract. This article discusses the current state of measuring technologies for the experimental study of radio characteristics of large antennas of ground control complexes in the centimeter wavelength range. The schematic diagrams and basic parameters of the prototypes of switching and correlational radiometers under development are presented, as well as the experimental results obtained with their use.

Keywords: reflector antenna, radio measurements, extraterrestrial radio source, switching and correlation radiometers

Введение

Для измерения параметров больших антенн широко используются радиоастрономические методы [1–3]. При этом мощность сигнала на выходе антенны при наведении ее на естественный радиоисточник, измеряемая как приращение эквивалентной шумовой температуры антенны, не превышает десятков кельвинов.

На рис. 1 показан пример записи сигнала на выходе антенны П2500 в X-диапазоне при наведении ее на «точечный» радиоисточник ДР21. В данном случае приращение антенной температуры составляет порядка 10К, что позволяет уверенно определять коэффициент усиления (КУ) этой антенны.

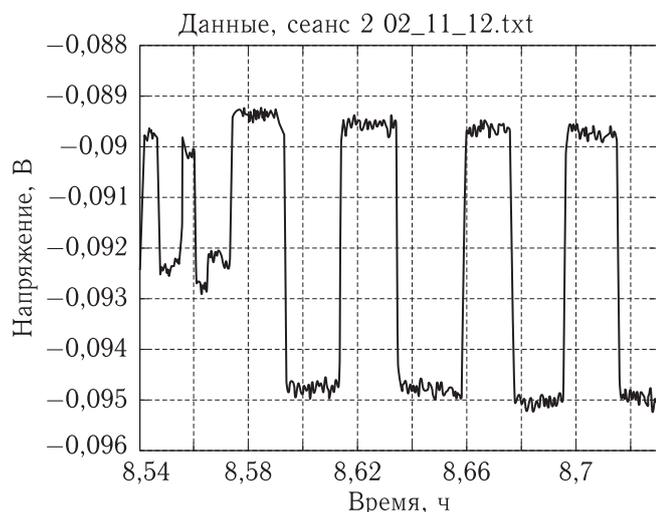


Рис. 1. Запись сигнала на выходе АС П2500 при наведении на радиоисточник ДР21

Однако при измерениях характеристик антенн меньших размеров, особенно на высоких частотах, где интенсивность большинства естественных радиоисточников падает, регистрируемые сигналы значительно уменьшаются.

Так, например, при измерении параметров 25-метровой антенны в Ка-диапазоне мощность сигналов, принимаемых от «точечных» радиоисточников, может не превышать нескольких десятых долей Кельвина. В данной работе анализируются возможности имеющейся аппаратуры для выполнения таких измерений.

Модуляционные радиометры

Модуляционные радиометры предназначены для измерения уровней мощности слабых шумовых и синусоидальных сигналов в радиоастрономических наблюдениях, измерениях характеристик антенн, а также при других видах радиоизмерений. Блок-схема модуляционного радиометра супергетеродинного типа показана на рис. 2.

Принцип действия модуляционного радиометра заключается в следующем. Измеряемый сигнал на входе приемника модулируется с частотой, задаваемой генератором опорного напряжения (порядка нескольких десятков или сотен герц). Модуляция реализуется периодическим подключением к входу прибора измеряемого сигнала и сигнала известной величины (так называемого опорного сигнала). В качестве источника опорного уровня, как правило, используется согласованная нагрузка с шумовой температурой, равной ее физической температуре, т. е. около 300 К.

Высокочастотная часть прибора построена по схеме супергетеродинного приемника и включает в себя смеситель, гетеродин и усилитель промежуточной частоты. Модулированный сигнал, а также собственные шумы прибора после преобразования в смесителе на промежуточную частоту и усиления на этой частоте поступают на квадратичный детектор, на выходе которого содержится как немодулированный шум, так и составляющая с частотой модуляции, пропорциональная мощности измеряемого сигнала. Эту составляющую можно выделить, т. к. спектральная плотность ее на частоте модуляции значительно больше спектральной плотности немодулированного шума прибора, хотя амплитуда ее может быть много меньше уровня шума. Выделение составляющей с частотой модуляции осуществляется путем синхронной фильтрации и синхронного преобразования этой составляющей в постоянное напряжение.

Таким образом, прибор регистрирует разность уровней измеряемого и опорного сигналов и дает возможность определить абсолютную величину измеряемого сигнала. Калибровка прибора осуществляется с помощью генератора шума с известной шумовой температурой.



Рис. 2. Схема модуляционного радиометра супергетеродинного типа

Т а б л и ц а. Состав серии радиометров модели ПК7

Название прибора	ПК7-15	ПК7-16	ПК7-17	ПК7-18	ПК7-19	ПК7-20	ПК7-21	ПК7-22
Диапазон частот, ГГц	0,484–0,750	0,624–1,248	1,07–2,14	2,0–4,0	3,86–5,96	5,6–8,15	8,15–12,42	12,05–17,44

В СССР промышленные радиометры для измерения характеристик антенн выпускались в течение ряда лет. Состав последней серии радиометров модели ПК7-** приведен в таблице.

Конструктивно радиометры серии ПК7-** состоят из следующих блоков:

- блок высокой частоты, предназначенный для приема входных сигналов на один из двух идентичных входов, модуляции, фильтрации и преобразования ВЧ-сигнала на промежуточную частоту 30 МГц;
- блок индикации, включающий тракт измеряемого сигнала от оконечных каскадов усиления до цифрового индикаторного табло и разъема для вывода результатов измерений на внешнее регистрирующее устройство;
- блок управления, предназначенный для управления блоком ВЧ.

В состав приборов входят также два калиброванных генератора шума — «горячий» с шумовой температурой порядка 15 000–20 000 К и «холодный» — охлаждаемая жидким азотом

согласованная нагрузка с шумовой температурой порядка 80 К.

ВЧ-блок прибора выполнен выносным, что позволяет устанавливать его вблизи выхода облучателя антенн с целью уменьшения потерь в линиях передач.

Согласно техническому описанию радиометры данной серии обеспечивают измерение шумовой температуры в диапазоне от 30 К до $3 \cdot 10^5$ К. Флуктуационный порог чувствительности при постоянной времени 1 с не превышает 2–4 К в разных диапазонах частот.

Как видно из таблицы, модуляционные радиометры серии ПК7-** могут быть применены для измерения характеристик антенных систем на частотах до 17,44 ГГц. В частности, в последние годы были выполнены серии измерений характеристик АС П2500 в С- и Х-частотных диапазонах. Вместе с тем, учитывая устаревшую элементную базу и длительное складское хранение этих приборов, выпуск которых давно прекращен, весьма актуальным представляется разработка современных аналогов таких радиометров. Структурная схема этих

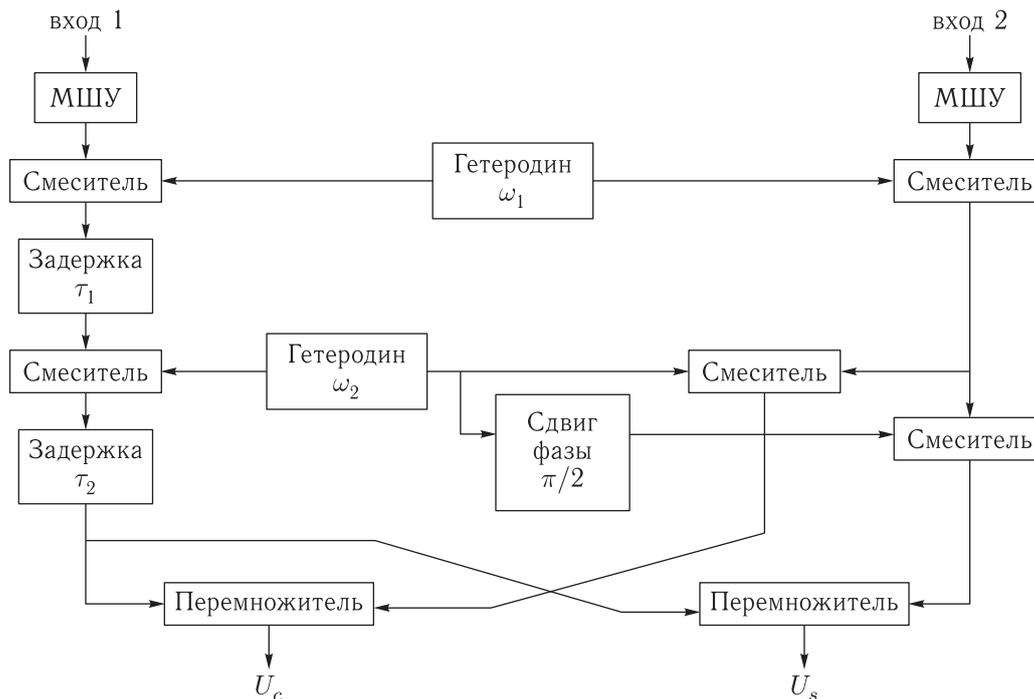


Рис. 3. Схема корреляционного радиометра для антенных измерений

приемников хорошо себя зарекомендовала и не требует изменений. Необходима ее реализация на современной элементной базе, согласование с управляющим компьютером и исполнение НЧ- и, возможно, ПЧ-части в цифровом виде. В настоящее время в ННГУ ведутся работы по созданию макетов цифровых модуляционных радиометров на базе ПЛИС со сменными СВЧ-блоками на С-, X-, Ku- и Ka- частотные диапазоны.

Корреляционные радиометры

Первоначально корреляционные радиометры создавались для использования в радиоастрономических малобазовых интерферометрах. На этой основе в 1990-х гг. в НПО «Кварц» (Нижний Новгород) по заказу НПО «Комета» был разработан промышленный вариант корреляционного радиометра для антенных измерений [4] и выпущено несколько образцов приемника для частотного диапазона 2–4 ГГц. Укрупненная блок-схема корреляционного радиометра данного типа приведена на рис. 3.

Двухканальный приемник с двойным преобразованием частоты имеет два аналоговых пере-

множителя, что позволяет одновременно измерять действительную и мнимую части функции корреляции входных сигналов. Ортогональность выходных сигналов обеспечивается введением фазового сдвига $\pi/2$ в тракт второго гетеродина одного из каналов. Первое преобразование частоты является однополосным, второе — двухполосным. Двойное преобразование частоты применяется для того, чтобы проводить все необходимые операции фазового сдвига на частоте второго гетеродина (порядка нескольких десятков МГц), что технически значительно проще, чем на входных частотах порядка нескольких ГГц. Как известно, после двухполосного преобразования все операции с фазой сигналов влияют только на амплитуду функции корреляции.

С использованием данного типа радиометров может быть реализован т. н. корреляционный способ антенных измерений, схема которого показана на рис. 4 [5]. Данный способ позволяет существенно расширить динамический диапазон измерения ДН антенны, измерять амплитудную и фазовую ДН, а также радиологическим способом восстанавливать распределение поля в апертуре антенны.

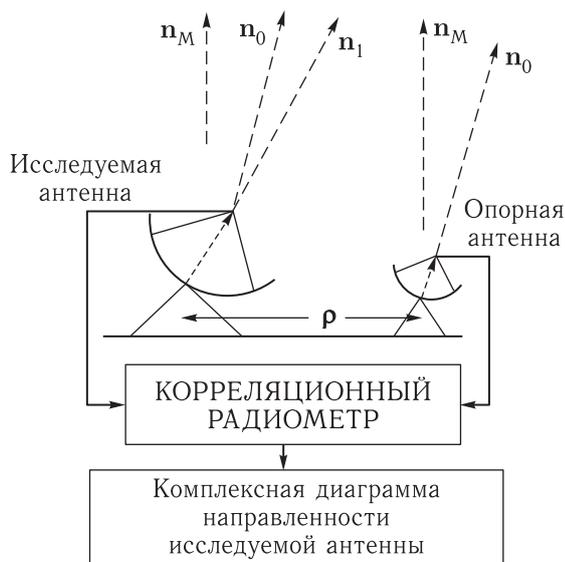


Рис. 4. Схема реализации корреляционного способа антенных измерений

При подключении обоих входов радиометра к выходу исследуемой антенны может быть измерена ДН по мощности, аналогично измерениям с модуляционным радиометром.

Цифровой корреляционный радиометр ННГУ

В ННГУ разработан макет цифрового корреляционного радиометра для антенных измерений [6]. Основу приемника составляет цифровой блок, реализованный на базе ПЛИС Virtex-5. Помимо этого, в состав радиометра входят блоки СВЧ-конверторов, гетеродин, персональный компьютер. Сменные конверторы С-, Х-, Ku- и Ka-диапазонов осуществляют перенос входных сигналов на промежуточную частоту. Сигналы ПЧ через АЦП поступают в ПЛИС, где происходит вычисление комплексной корреляционной функции. Полученное значение передается в ПК, где после преобразования записывается на жесткий диск. Управление работой цифрового блока осуществляется с ПК специально разработанным программным обеспечением. Схема цифровой части корреляционного радиометра представлена на рис. 5. В блоке реализованы основные функции:



Рис. 5. Схема цифровой части корреляционного радиометра

квадратурное детектирование, цифровая фильтрация, задержки, перемножение и накопление сигналов. На выходе блоков перемножения–накопления получают суммы $\Sigma 1$ и $\Sigma 2$, соответствующие реальной и мнимой частям корреляционной функции.

На рис. 6 представлена зависимость амплитуды (сплошной линией) и фазы (штриховой линией) корреляционной функции от уровня сигнала, поступающего на вход одного из каналов цифрового блока, при постоянном значении сигнала в другом канале и фиксированных значениях задержек в обоих каналах. Такой режим используется при работе радиометра в составе малобазового интерферометра при корреляционном способе измерений. Как видно из рисунка, линейная зависимость амплитуды корреляционной функции сохраняется при изменении входного сигнала в диапазоне не менее 70 Б, достаточно низкий уровень нелинейных искажений остается до ослаблений порядка -90 дБ. Фазовые отклонения не превышают 4° до уровней около -80 дБ. Данный результат демонстрирует, что приемник позволяет измерять

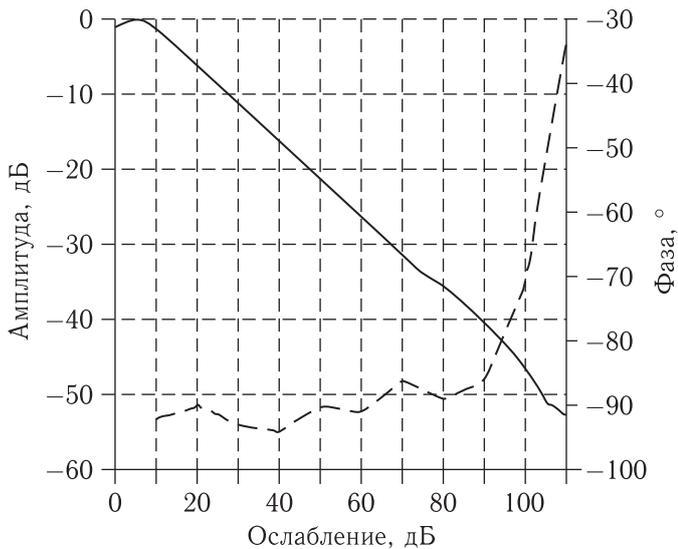


Рис. 6. Зависимость амплитуды и фазы корреляционной функции от уровня сигнала

диаграмму направленности антенны в динамическом диапазоне до 70–80 дБ.

На рис. 7 и 8 представлено центральное угломестное сечение ДН АС П2500 в С-диапазоне, измеренное с использованием разработанного макета корреляционного радиометра по сигналам естественного радиосточника ЗС405 (рис. 7) и геостационарного ИСЗ (рис. 8).

На рис. 9 и 10 показано распределение фазы поля в апертуре АС П2500, восстановленное радиоголографическим способом по сигналам ЗС405 и ИСЗ соответственно.

На рис. 11 и 12 показано сравнение соответствующих распределений амплитуды поля в апертуре.

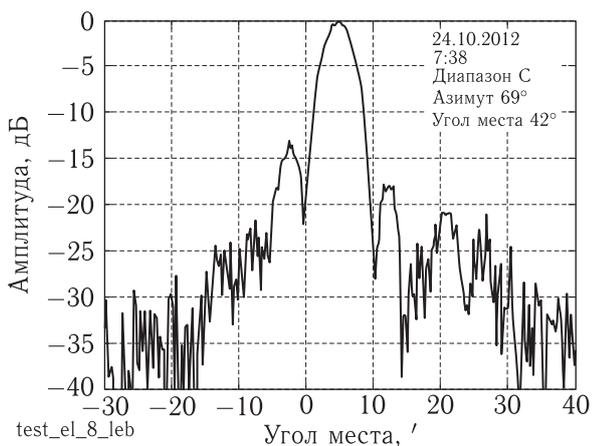


Рис. 7. Сечение ДН АС П2500, измеренное по сигналам естественного радиосточника ЗС405

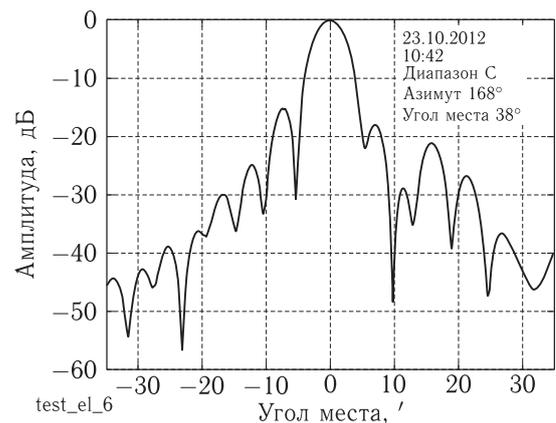


Рис. 8. Сечение ДН АС П2500, измеренное по сигналам геостационарного ИСЗ

Представленные результаты демонстрируют возможности измерений с использованием разработанного макета радиометра как по достаточно мощным узкополосным сигналам ИСЗ, так и по значительно более слабым широкополосным сигналам естественных радиосточников.

Заключение

В работе рассмотрены возможности использования существующих измерительных приемников для определения параметров антенн радиоастрономическими способами в сантиметровом диапазоне. Представлены схемы построения и результаты применения разработанного макета цифрового корреляционного радиометра. В настоящее время в ННГУ продолжают работы по созданию макетов модуляционных и корреляционных радиометров нескольких частотных диапазонов. Предполагается использование этих приемников для измерений характеристик антенн с зеркалами 25 и 32 м на частотах до 30 ГГц.

Список литературы

1. Кузьмин А. Д., Саломонович А. Е. Радиоастрономические методы измерений параметров антенн. М.: Сов. радио, 1964. 184 с.
2. Цейтлин Н. М. Антенная техника и радиоастрономия. М: Сов. радио, 1976. 350 с.
3. Baars J. W. M. The measurement of large antennas with cosmic radio sources // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1973, vol. AP-21, n. 4. P. 461–474.

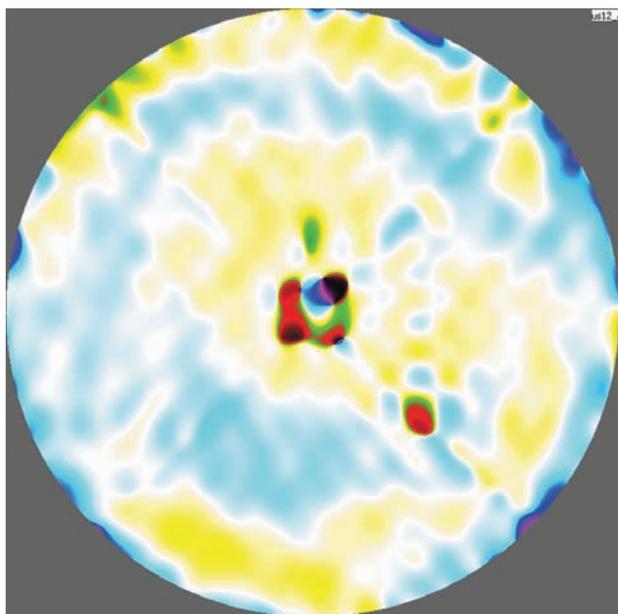


Рис. 9. Распределение фазы поля в апертуре АС П2500, восстановленное по сигналам радиоисточника 3С405

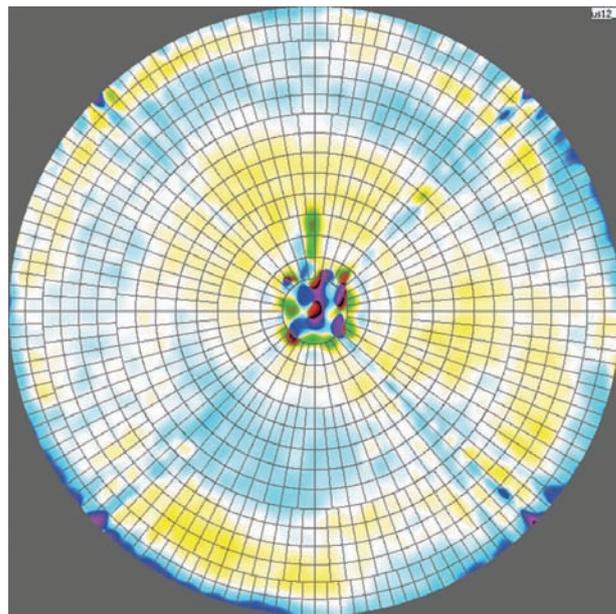


Рис. 10. Распределение фазы поля в апертуре АС П2500, восстановленное по сигналам геостационарного ИСЗ

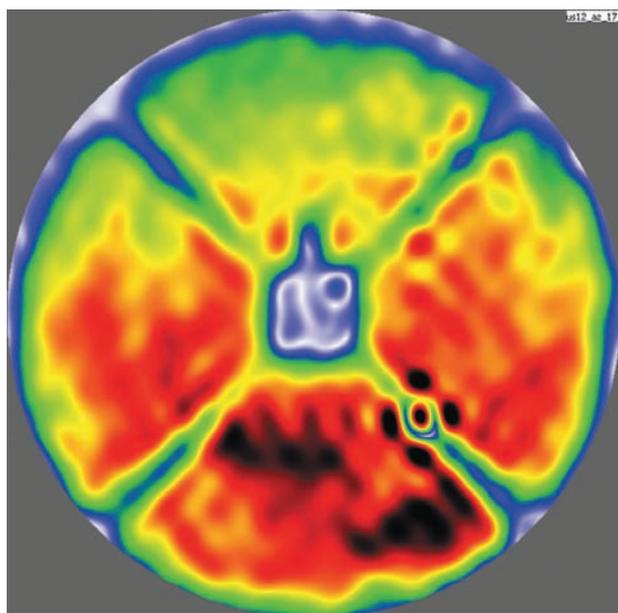


Рис. 11. Распределение амплитуды поля в апертуре АС П2500, восстановленное по сигналам радиоисточника 3С405

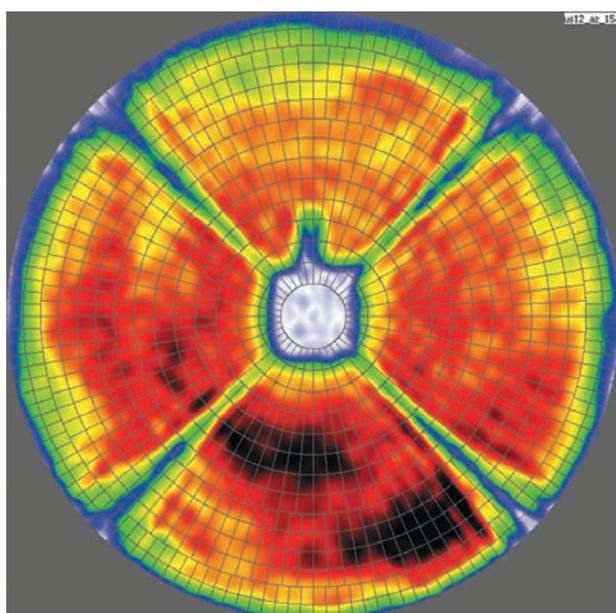


Рис. 12. Распределение амплитуды поля в апертуре АС П2500, восстановленное по сигналам геостационарного ИСЗ

4. Мальцев В.П., Щеглов К.С. Корреляционные радиометры в технике антенных измерений // Антенны, 1997, 2(39). С. 57–62.
5. Калинин А.В., Беагон В.С., Кисляков Г.А., Мальцев В.П. Разработка радиоастрономического корреляционного метода измерения характеристик зер-

кальных антенн // Изв. вузов. Радиофизика, 2002, т. 45, № 4. С. 279–288.

6. Калинин В.А., Беагон В.С., Калинин А.В. Корреляционный радиометр для антенных и интерферометрических измерений // Вестник ННГУ, 2011, № 5(3). С. 88–94.