

Нижегородский научно-исследовательский радиофизический институт

Государственный комитет Российской Федерации по высшей школе

П р е п р и н т № 371

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРКАЛА РАДИОТЕЛЕСКОПА НИРОИ

РАДИОГОЛОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ПО СИГНАЛАМ ИСЗ.

А.В.Калинин

В.С.Беагон

Г.А.Кисляков

Е.Е.Калинина

Нижний Новгород 1993

Калинин А.В., Беагон В.С., Кисляков Г.А., Калинина Е.Е.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРКАЛА РАДИОТЕЛЕСКОПА НИРФИ
РАДИОГЛОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ПО СИГНАЛАМ ИСЗ//Препринт N 371.-
Нижний Новгород: НИРФИ. 1993.-25 с.**

УДК 523.164; 621.396.67

Дано описание созданного в НИРФИ автоматизированного комплекса для радиоглографических измерений характеристик антенн по сигналам внеземных источников излучения. Рассмотрена методика измерений и восстановления карты деформаций отражающей поверхности зеркального радиотелескопа. Приведены результаты экспериментального исследования источников и величин деформаций поверхности семиметрового радиотелескопа НИРФИ в диапазоне 11 ГГц по сигналам ИСЗ. Погрешность определения деформаций составила не более 0.2 мм при разрешении по апертуре около 0.1 м.

1. ВВЕДЕНИЕ.

При создании и эксплуатации радиотелескопов с зеркалами диаметром в несколько десятков метров возникает необходимость измерения, кроме радиотехнических характеристик (ДН, КУ и др.) формы их отражающей поверхности. Эта задача становится особенно актуальной при использовании радиотелескопа для наблюдений в диапазоне сантиметровых и миллиметровых длин волн. В этом случае для определения минимальной рабочей длины волны необходимы предварительные исследования деформаций отражающей поверхности зеркала и, если возможно, выполнение соответствующей коррекции положений элементов (цитов), образующих эту поверхность.

На ряде зарубежных радиотелескопов подобные измерения проводились радиоголографическим способом (см., например, /1/), предусматривающим измерение комплексной диаграммы направленности антенны в широком угловом секторе и восстановление через преобразование Фурье распределения поля по апертуре. Информация о деформациях зеркала получается по соответствующим возмущениям фазы поля в раскрыве. В качестве источника сигнала при измерениях используются либо естественные внеземные радиисточники, либо геостационарные искусственные спутники Земли.

Несмотря на то, что радиоголографический метод известен, его практическая реализация на отечественных радиотелескопах сдерживается отсутствием аппаратуры и методик, позволяющих достигать необходимой точности измерения деформаций с требуемым разрешением вдоль раскрыва. В НИРФИ радиоголографические измерения проводились на ряде антенн по естественным внеземным радиисточникам на длинах волн до 10 см /2,3,4,5/. Полученная при этом точность определения деформаций поверхности в 1-2 мм недостаточна для современных радиотелескопов .

В настоящее время в НИРФИ создан автоматизированный измерительный комплекс для радиоголографических исследований характеристик антенн по сигналам геостационарных ИСЗ, а также естествен-

них радиостанций. Комплекс включает в себя выносные блоки СВЧ преобразователей диапазонов 4 и 11 ГГц, гетеродин, блок ПЧ и цифровой коррелятор. Для управления работой комплекса, сбора и обработки данных используется IBM PC AT. Разработаны алгоритмы и программы для радиолокационных измерений на различных типах радиотелескопов. Для крупных антенн предусматривается установка опорного зеркала непосредственно на исследуемое. Для сравнительно небольших радиотелескопов возможно использование опорной антенны, установленной на отдельном ОПУ вблизи исследуемой. Алгоритмы измерений предусматривают возможность управления наведением либо от штатной ЭВМ радиотелескопа, либо от ЭВМ измерительного комплекса.

В данной работе представлена методика и экспериментальные результаты, полученные при апробации измерительного комплекса на 7-метровом радиотелескопе РАС НИРФИ "Старая Пустынь".

2. ИССЛЕДУЕМАЯ АНТЕННА И АППАРАТУРА.

На рисунке 1 представлена фотография интерферометра, использовавшегося при радиолокационных измерениях на РАС НИРФИ "Старая Пустынь". Измерения проводились в диапазоне 11 ГГц по сигналам геостационарных ИСЗ. Опорная антенна с зеркалом диаметром 2 метра была установлена на отдельном ОПУ и направлена при измерениях на используемый ИСЗ. СВЧ конвертор опорного канала устанавливался вблизи фокуса зеркала на выходе облучателя. Исследуемая семиметровая Касегреновская антенна имела контррефлектор диаметром 1.1 метра. СВЧ конвертор измерительного канала располагался на выходе облучателя вблизи вторичного фокуса.

Основные параметры используемых конверторов:

- центральная частота входного сигнала -11.3 ГГц;
- полоса частот входного сигнала -600 МГц;
- коэффициент шума не более 2 дБ ($T_{\text{ш}} < 175\text{К}$);
- частота выходного сигнала ПЧ-48 МГц.

В лабораторном помещении радиотелескопа располагалась аппаратура измерительного комплекса:

- гетеродин-генератор типа Г4-80;
- двухканальный преобразователь сигналов промежуточной частоты.

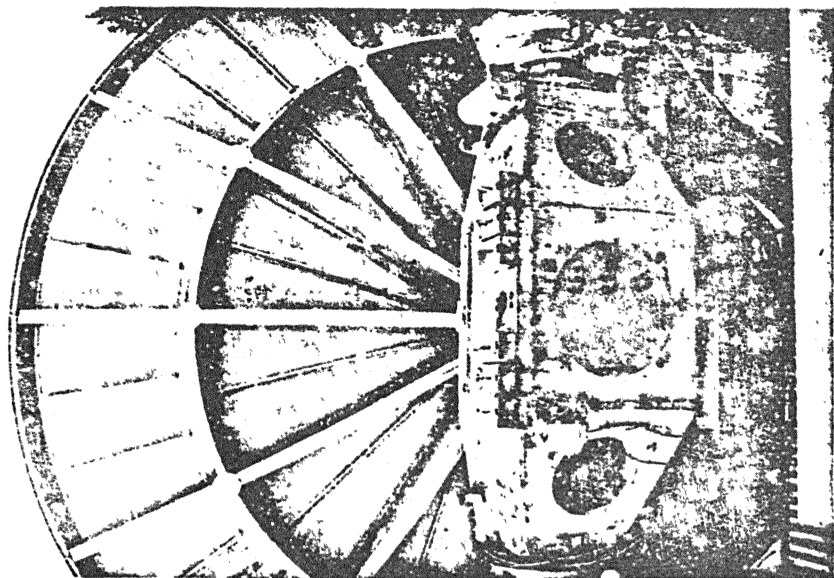


Рис. 2

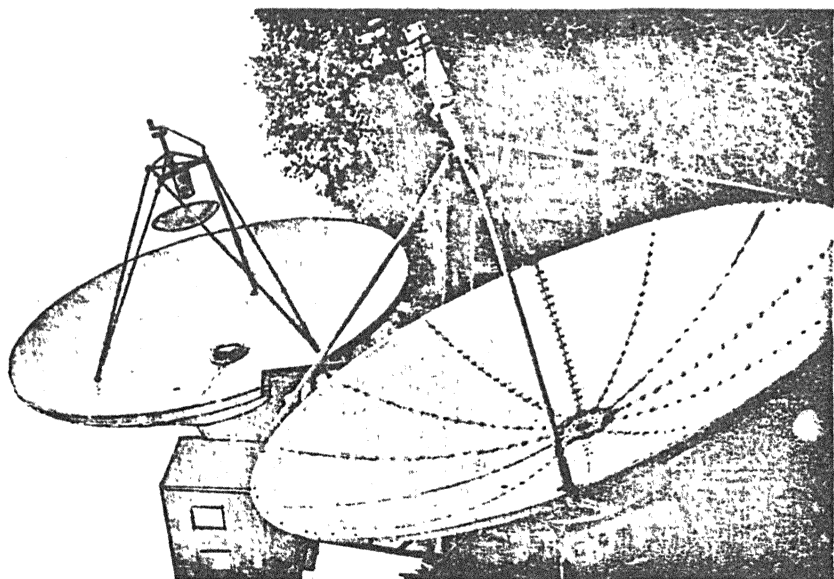


Рис. 1

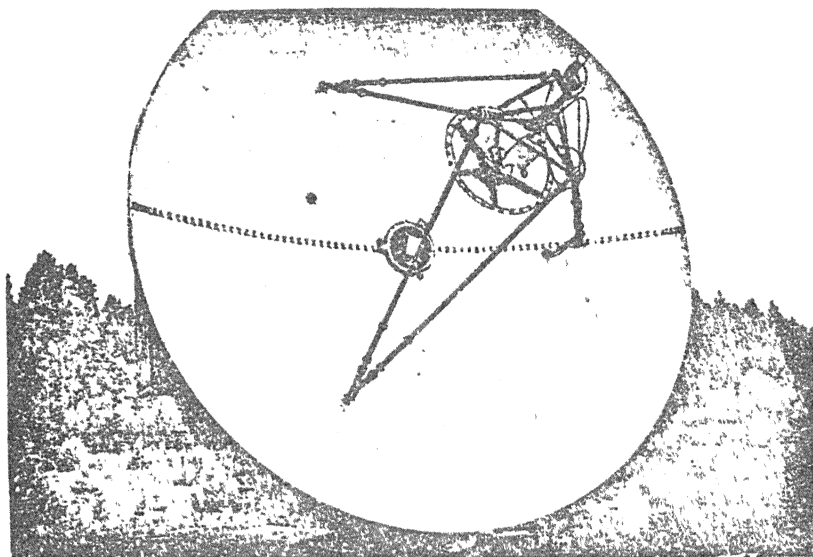


Рис. 3

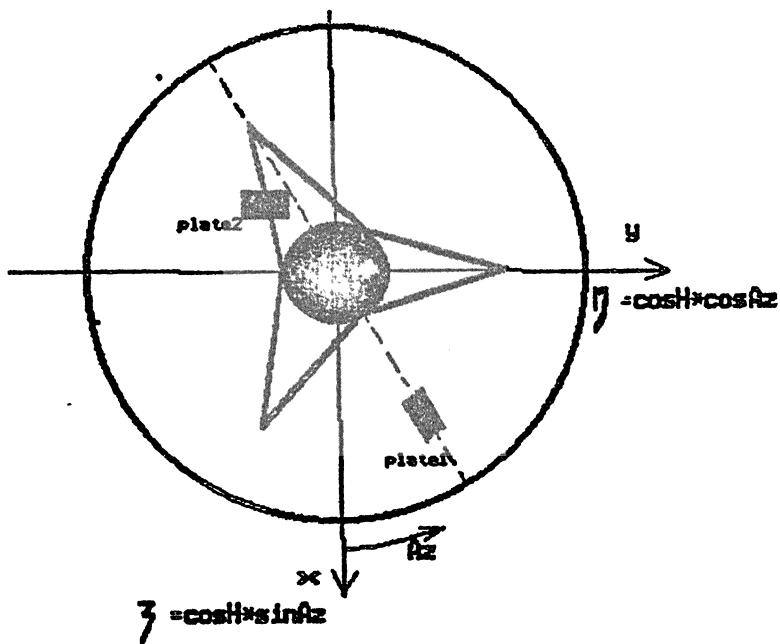


Рис. 4

а также цифровой коррелятор с полосой входного сигнала 5 МГц (приборы разработаны и изготовлены в НИРФИ);

-IBM PC AT, осуществляющая управление приборами и наведением исследуемой антенны, сбор данных и их обработку. Для связи PC AT с приборами комплекса использовался набор интерфейсных плат в стандарте КАМАК.

На рис. 2 и 3 показан внешний вид главного зеркала исследуемой антенны. Отражающая поверхность параболической формы состоит из 12 "лепестков" с угловым размером 30 град., установленных на каркасе из 12 радиальных "ребер" и кольца, диаметром около 2,3 м. В трех точках этого кольца на поверхность главного зеркала опирается крепление вторичного зеркала (в направлениях $Az = 90, 210$ и 330 град.). Для моделирования смещения цитов отражающей поверхности на главное зеркало устанавливались дополнительные (тестовые) металлические пластины. Одна пластина с размерами $610 \times 170 \times 2$ мм была расположена на участке поверхности с координатами центра в плоскости раскрыва $r=2.3$ м, $Az.=30$ град.(пластина 1), другая, размером $420 \times 270 \times 1,5$ мм, в точке с координатами $r= 1,4$ м, $Az = 247$ град. (пластина 2). Расположение опор контррефлектора и тестовых пластин показано на рисунке 4.

3.МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ.

При проведении радиологических измерений на РАС "Старая Пустынь" исследовались сигналы диапазона 11 ГГц нескольких геостационарных ИСЗ, в том числе с координатами 19,16,13,10,7 град.в.д. и других. По уровню мощности, стабильности принимаемого сигнала, а также по наблюдаемому углу места для измерений был выбран спутник Intelsat VA-F15, расчетные координаты которого для РАС "Старая Пустынь" составляют $N=24$ град. 57мин., $Az=340$ град. 25мин. Из нескольких частотных каналов, передаваемых этим спутником, использовался в основном канал с центральной частотой 11030 МГц, поляризация горизонтальная.

Программа, управляющая наведением исследуемой антенны осуществляла ее перемещение при измерении матрицы ДН, обеспечивающее равномерную сетку осчетов в системе координат главного зеркала. При этом сканирование антенной проводилось, как правило,

по углу места с дискретным перемещением по азимуту между строками. Для контроля изменения сигналов во время сеансов измерений проводились периодические калибровки при наведении исследуемой антенны на спутник. При обработке измеренных значений матрицы ДН выполнялась коррекция с использованием результатов калибровок.

Для определения инструментальной составляющей погрешности восстановления карты деформаций главного зеркала исследуемой антенны проводилось сравнение результатов, полученных при нескольких измерениях одинаковой матрицы ДН. Для реализации пространственного разрешения по поверхности симметричной антенны около 10×15 см (что моделирует измерения, например, на 70-метровой антенне с разрешением не хуже 1.0×1.5 м) измерялась матрица ДН в угловом секторе около 10 град. \times 15 град. с дискретом $\sin 10$ мин. \times $\sin 10$ мин. (63 строки \times 93 столбца).

Для выявления возможных изменений формы отражающей поверхности и других искажений АФР, обусловленных, например, солнечным нагревом элементов антенны, проводилось сравнение результатов, полученных в разное время суток и в разные месяцы года.

В следующем разделе приводятся результаты, соответствующие нескольким реализациям измерения матрицы ДН и восстановления АФР поля в раскрыве антенны. На рис.5 представлены зависимости амплитуды и фазы сигнала в калибровках, полученные при измерениях матриц ДН. Матрицы с номерами 702 и 705 (первая цифра соответствует размеру исследуемой антенны, последние цифры-номеру реализации) измерялись в утренние часы. Матрицы с номерами 703 и 708 измерены в вечернее время, матрицы с номерами 704 и 709 - ночью. Измерения матриц ДН с номерами 702-705 выполнены в апреле, матриц 708 и 709 - в июне месяце 1993 года. Измерения в апреле проводились при значительном изменении температуры- теплая погода при ярком солнце в дневное время и заморозки ночью. Во время измерения матрицы 708 шел холодный дождь, матрица 709 измерена сразу после дождя. При измерениях матриц 702 и 703 на поверхности главного зеркала были установлены обе тестовые пластины, показанные на рис.4. При измерениях матриц 704и 705 пластина номер 2 была установлена, пластины номер 1 не было. Матрицы 708 и 709 измерялись без тестовых пластин на главном зеркале.

Представленные на рис.5 результаты демонстрируют наличие регулярных изменений фазы измеряемого сигнала, обусловленных днев-

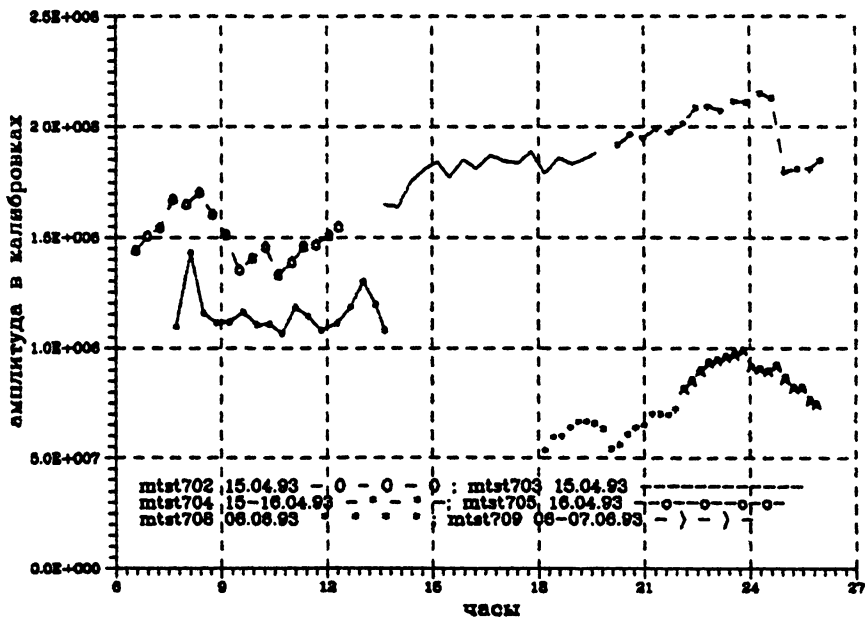
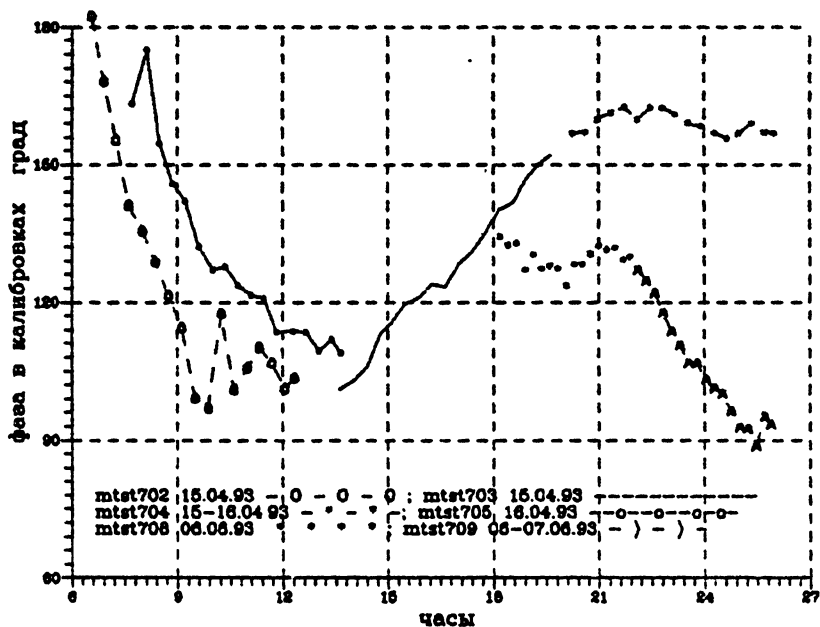


Рис. 5

ним нагревом и ночным охлаждением элементов антенны. Изменение фазы сигнала в измерениях матрицы с номером 709 вызвано, по-видимому, нагревом элементов антенны после дождя.

Наблюдаемые изменения фазы сигнала, которые могут быть связаны и с изменением характеристик исследуемой антенны за время сеанса, демонстрируют необходимость минимизации продолжительности радиологических измерений. В проводимых в апреле 1993 года измерениях продолжительность сеанса измерения матрицы ДН составляла около 6 часов. После доработки программы наведения в измерениях в июне 1993 г. продолжительность сеанса при тех же размерах матрицы ДН составила 3,5 час.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ.

На рис. би 7 показаны примеры восстановления соответственно амплитудного и фазового распределения поля в апертуре антенны. Среднеквадратичное отклонение фазы от среднего значения составило в этой и других реализациях величину 25-26град., что соответствует деформациям поверхности около 1мм.

На рис. 8, 9 и 10 изображены в яркостном виде матрицы разности распределений фазы поля в апертуре. Матрица АФР7043 соответствует разности значений фазы поля восстановленного по измерениям в вечернее и ночное время (АФР704-АФР703). Распределение АФР7045 представляет разность значений, полученных по измерениям в ночные и утренние часы (АФР704-АФР705). Распределение АФР7049 соответствует разности фазовых распределений, полученных в апреле и в июне месяце в одно и то же время суток (АФР704-АФР709).

На представленных рисунках хорошо заметны изменения в фазовом распределении, вызванные тестовыми пластинами (АФР7043 и АФР7049). Кроме того, полученные результаты наглядно демонстрирует наличие существенной зависимости формы отражающей поверхности от времени проведения измерений.

Из сравнения результатов, полученных в одинаковое время суток оценивалась инструментальная погрешность восстановления фазы поля в апертуре. Среднеквадратичное отклонение фазы поля в распределениях АФР7043 и АФР7049, определенное по всему раскрытию за исключением центральной области радиусом 0,6 м., затененной контрреф-

File afr704m3

Ampl 1

Point 71

Rows 71

Val1 0.00000e+00

Val2 1.00000e-01

Val3 2.00000e-01

Val4 3.00000e-01

Val5 4.00000e-01

Val6 5.00000e-01

Val7 6.00000e-01

Val8 7.00000e-01

Val9 8.00000e-01

Val10 9.00000e-01

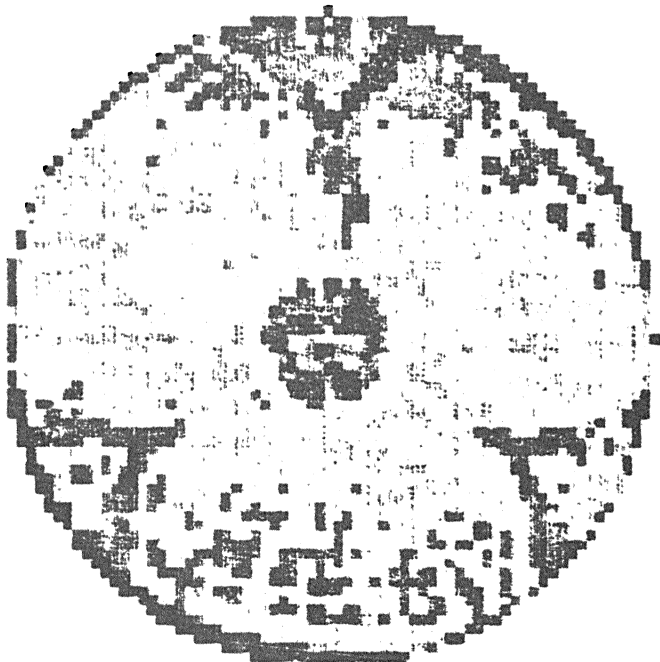
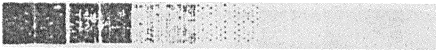
Val11 1.00000e+00

Val12 2.00000e+00

Val13 2.00000e+00

Val14 2.00000e+00

Val15 2.00000e+00



File af704n3

Comp 0

Point 71

Rows 71

Val1 -1.00000e+02

Val2 -1.20000e+02

Val3 -9.00000e+01

Val4 -5.00000e+01

Val5 -3.50000e+01

Val6 -2.00000e+01

Val7 -5.00000e+00

Val8 1.00000e+01

Val9 2.50000e+01

Val10 4.00000e+01

Val11 5.50000e+01

Val12 7.00000e+01

Val13 9.00000e+01

Val14 1.20000e+02

Val15 1.80000e+02



File afr7043

Ampl 0

Point 71

Rows 71

Val1 -1.80000e+02

Val2 -1.00000e+02

Val3 -8.00000e+01

Val4 -6.50000e+01

Val5 -5.00000e+01

Val6 -3.50000e+01

Val7 -2.00000e+01

Val8 -1.00000e+01

Val9 -5.00000e+00

Val10 0.00000e+00

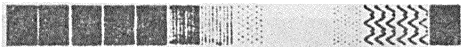
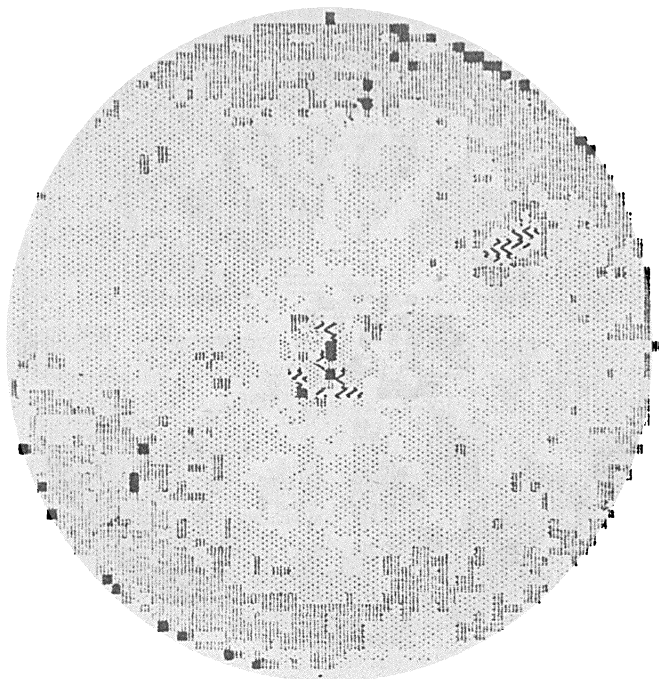
Val11 5.00000e+00

Val12 1.50000e+01

Val13 3.00000e+01

Val14 4.50000e+01

Val15 1.80000e+02



File afrr7049

Ampl 0

Point 71

Rows 71

Val1 -1.80000e+02

Val2 -1.00000e+02

Val3 -8.00000e+01

Val4 -6.50000e+01

Val5 -5.00000e+01

Val6 -3.50000e+01

Val7 -2.00000e+01

Val8 -1.00000e+01

Val9 -5.00000e+00

Val10 0.00000e+00

Val11 5.00000e+00

Val12 1.50000e+01

Val13 3.00000e+01

Val14 4.50000e+01

Val15 1.80000e+02

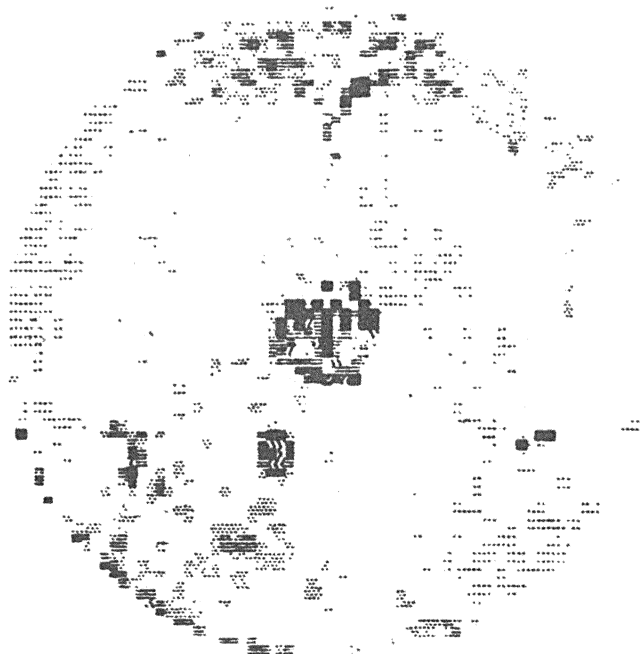


FIG. 9

File affr7045

Ampl 0

Point 71

Rows 71

Val1 -1.80000e+02
Val2 -1.00000e+02
Val3 -8.00000e+01
Val4 -6.50000e+01
Val5 -5.00000e+01
Val6 -3.50000e+01
Val7 -2.00000e+01
Val8 -1.00000e+01
Val9 -5.00000e+00
Val10 0.00000e+00
Val11 5.00000e+00
Val12 1.50000e+01
Val13 3.00000e+01
Val14 4.50000e+01
Val15 1.80000e+02

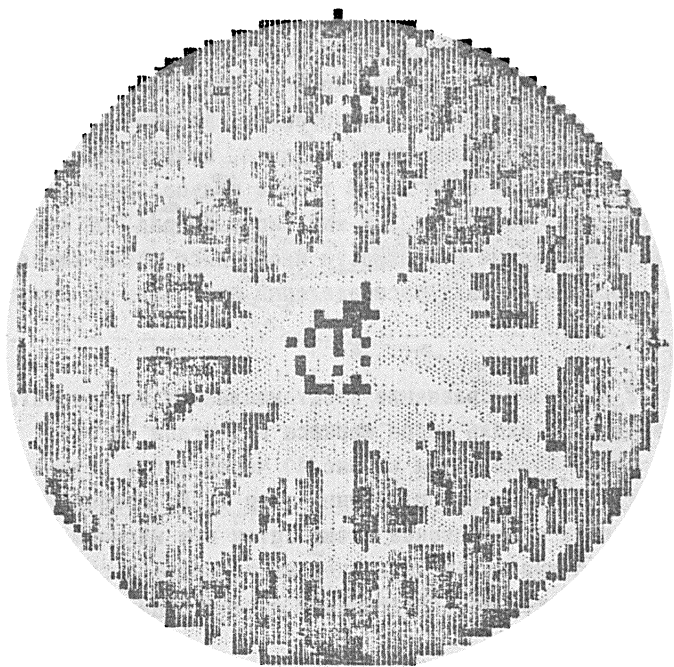
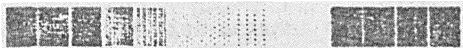


FIG. 10

лектором, и мест расположения тестовых пластин, составило величину 4 град., что соответствует погрешности определения деформаций отражающей поверхности величиной 0,15 мм.

Сравнение распределений фазы поля в апертуре, полученных в разное время суток (рис. 10) демонстрирует характер искажений поверхности зеркала, обусловленных солнечным нагревом. Как видно из представленного рисунка, в этих искажениях можно разделить деформации каркаса и прогибы металлических листов, образующих отражающую поверхность.

Для количественного анализа величин различных видов деформаций проводилось сравнение отдельных сечений распределения фазы поля по апертуре антенны.

Определение величины "смещения" фазового распределения в отдельных реализациях проводилось путем сравнения значений фазы, восстановленных на неподвижной части главного зеркала. На данной антенне в качестве такой области зеркала использовалось кольцо в его центральной части вне зоны, затененной контррефлектором. На рис. 11 показано сравнение зависимостей фазы поля на кольце радиусом 0,7 м, восстановленных по нескольким измерениям. Наблюдаемое смещение значений, полученных в разное время суток, по-видимому, может быть обусловлено перемещением контррефлектора вдоль оси зеркала из-за нагрева опор. Величина такого сдвига, полученная при усреднении разности значений фазы по 12 точкам кольца, расположенным над ребрами каркаса, составила 1,5 мм (около 40 град. по фазе). Последующий анализ деформаций поверхности проводился после выполнения "привязки" восстановленных распределений фазы поля на кольце радиусом 0,7 м.

На рис. 12 показано сравнение восстановленных зависимостей фазы поля по поверхности вдоль ребра каркаса под углом 30 град. от вертикальной оси (пунктирная линия на рис. 4) через места установки опоры контррефлектора и тестовой пластины номер 1. Из сравнения результатов, полученных в одинаковое время суток при наличии и отсутствии тестовой пластины может быть оценена точность регистрации деформаций поверхности зеркала, определяемая аппаратурными, а также методическими погрешностями.

Изменение в фазовом распределении, вызванное наличием тес-

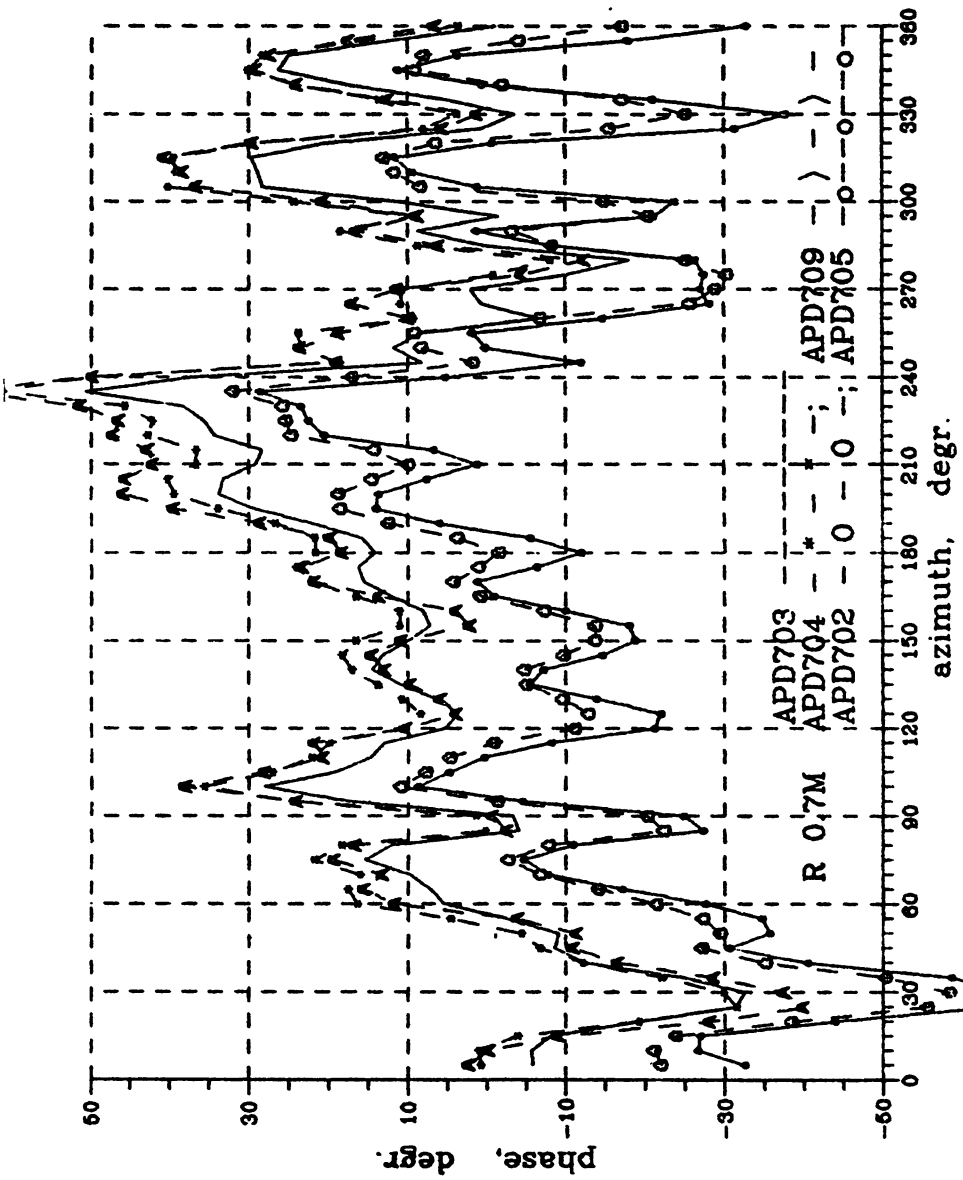
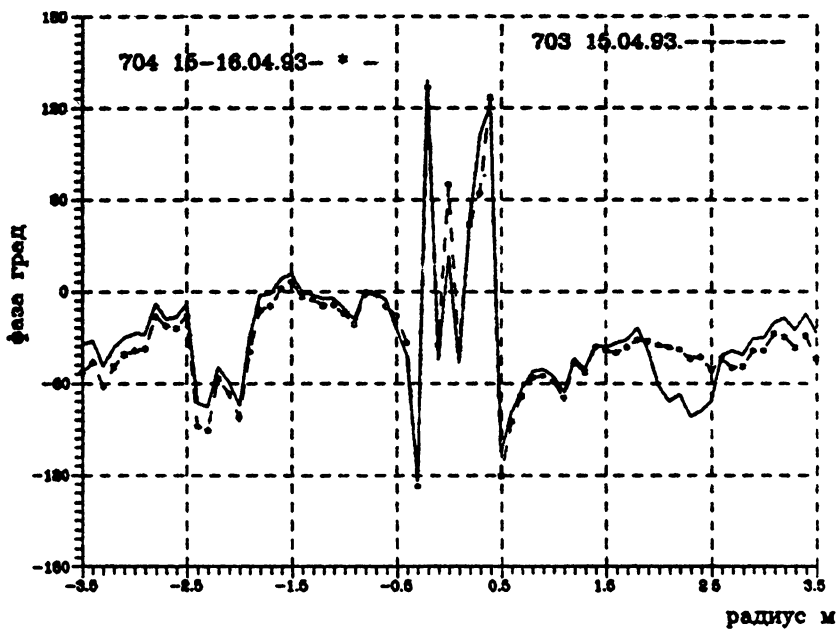


Рис. II



а)

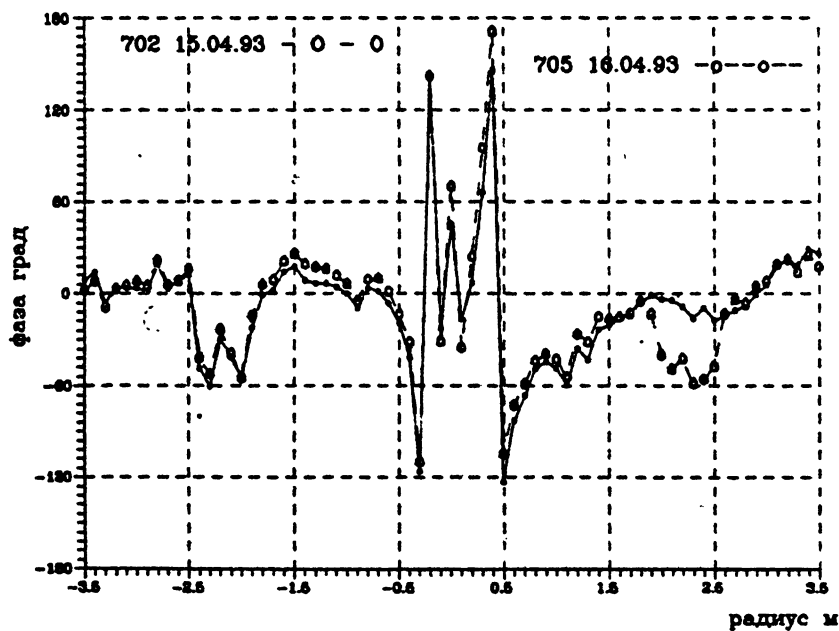
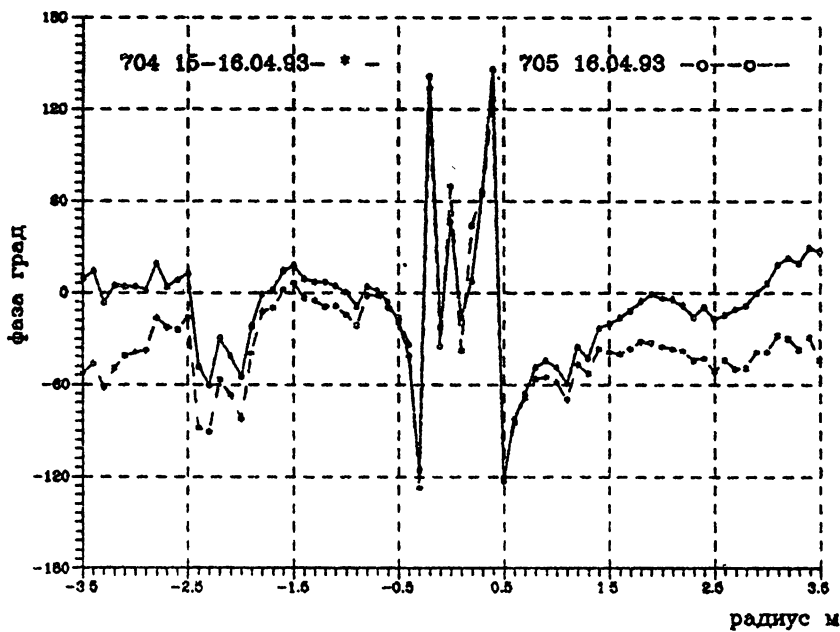


Рис. 12



б)

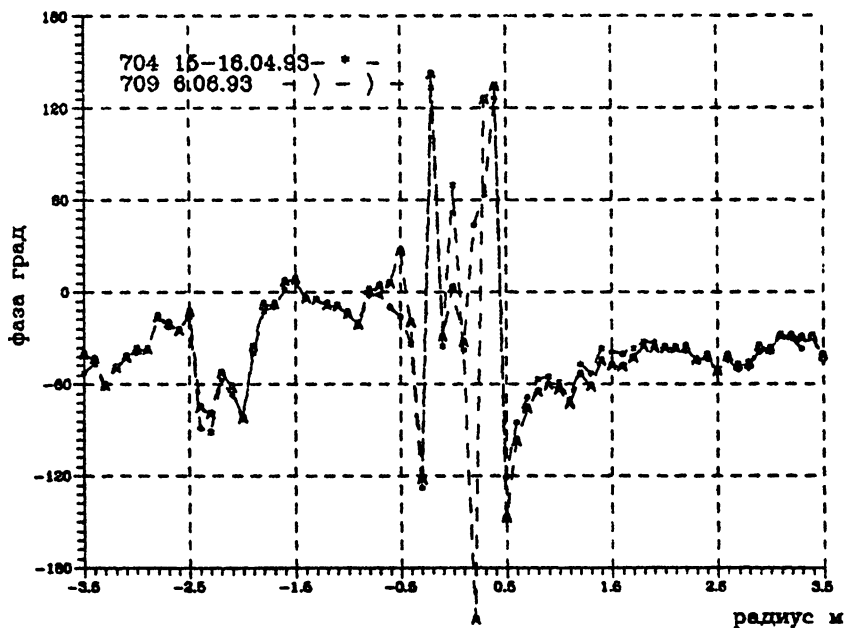


Рис. 12

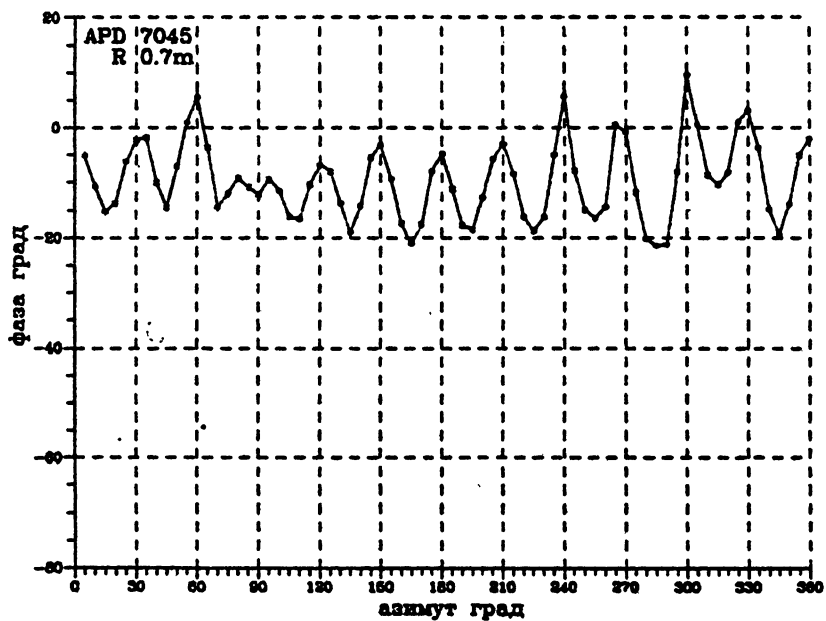
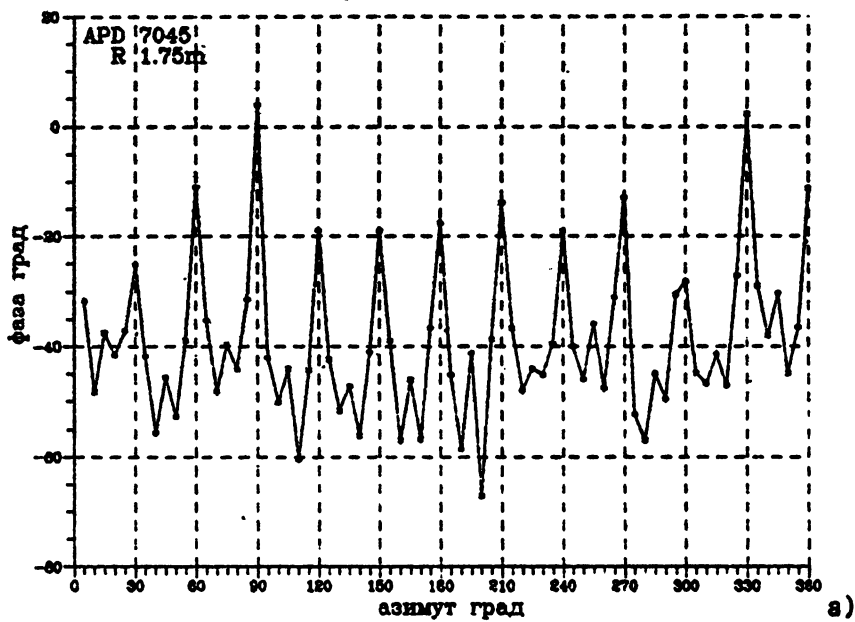
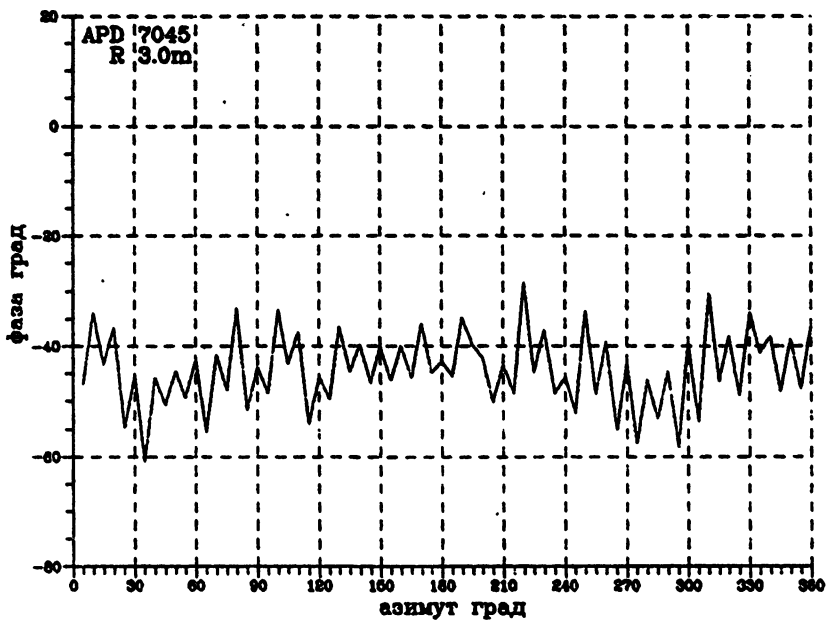


Рис. 13



б)

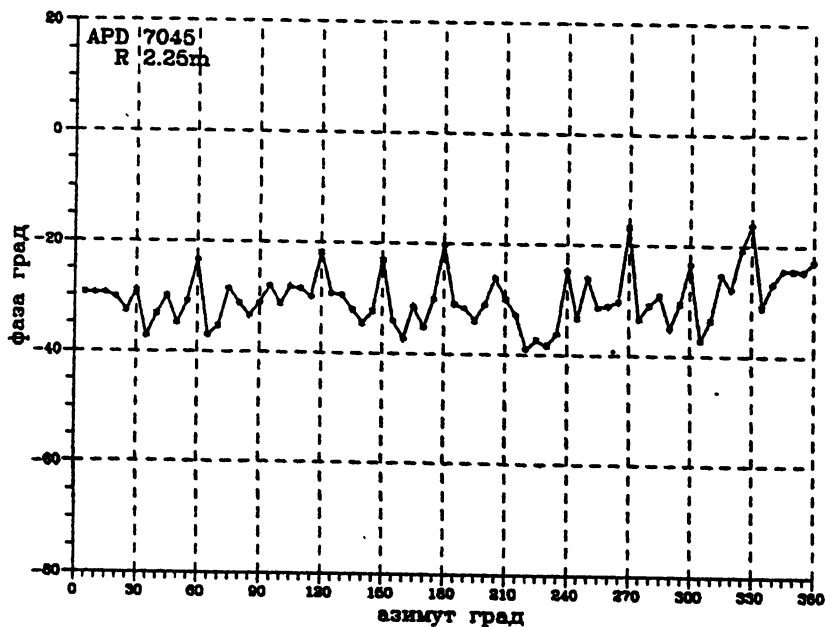


Рис. 13

товой пластины составляет величину (в центральной части пластины) 48-50 град., при расчетном значении 53 град. (толщина пластины 2мм). Таким образом погрешность регистрации деформаций поверхности главного зеркала в проведенных измерениях составляет около 0,2мм (5 град. по фазе).

Представленные на рис. 12 результаты демонстрируют также наличие существенных температурных деформаций каркаса главного зеркала. Соответствующие отклонения профиля зеркала на его краях составляют величину до 2 мм (50 град.). Такие искажения не могут быть вызваны смещением контррефлектора из фокуса, т.к. для данной антенны оценка изменения фазы поля от центра к краям раскрыва при сдвиге контррефлектора на 1.5мм. составляет около 10 град.

На рис. 13 показаны разности распределений фазы поля на отдельных кольцах раскрыва, восстановленных по измерениям ночью и днем. Представленные зависимости демонстрируют изменение характера температурных деформаций отражающей поверхности главного зеркала вдоль его радиуса. В области зеркала внутри кольца каркаса (при $R < 2.3$ м) температурные прогибы листов отражающей поверхности между ребрами каркаса достигают величин до 2 мм (50 град. по фазе). При этом сам каркас деформируется незначительно. Вне кольца каркаса (при $R > 2.3$ м) радиальные ребра слабо влияют на температурные деформации. На представленных распределениях фазы заметны характерные "изломы" - по одному максимуму между основными ребрами каркаса при радиусах до 2.3 м (например, при $R=1.75$ м) и по два максимума при больших радиусах (например, при $R=3.0$ м.). Эти "изломы" обусловлены наличием на внутренней стороне зеркала между основными радиальными ребрами дополнительных ребер жесткости, показанных на рис. 3.

Представленные в данной работе материалы демонстрируют возможность использования аппаратного комплекса , алгоритмов и методик измерений для регистрации с достаточно высокой точностью деформаций отражающей поверхности зеркальных антенн. Разработанные методики позволяют определить причины и оценить величину отдельных составляющих искажений амплитудно-фазового распределения поля в раскрыве антенны, что, очевидно, должно представлять интерес для разработчиков и пользователей крупных антенн, особенно в случае их использования на коротких (мм и см) длинах волн.

ЛИТЕРАТУРА.

1. D.Morris, J.M.M.Baars, H.Hein et.al. Radio-golographic reflector measurement of the 30-m millimeter radio telescope at 22 GHz with a cosmic signal source. Astron.and astrophys., 1988, 203, p.399-406.
2. Н.В.Векслер, А.В.Калинин, В.С.Коротков, В.И.Турчин. Измерение поляризационных и фазовых диаграмм направленности антенн и амплитудно-фазового распределения корреляционным методом с использованием внеземных источников радиоизлучения. -Изв.вузов, Радиофизика, 1984. -Т.27, №3., с.341-349.
3. В.С.Беагон, Н.А.Дугин, Г.А.Кисляков и др.Методика и результаты измерения ДН РТ-70 корреляционным способом по внеземным источникам радиоизлучения.Тезисы докладов ВКАИ-4, Ереван, 1987г.
4. Д.Е.Емельянов, А.В.Калинин, Г.А.Кисляков и др.Методика и результаты измерения характеристик крупногабаритной зеркальной антенны корреляционным методом. -Тезисы докладов ВКАИ-5, Ереван, 1990г., с.67-68.
5. Н.М.Цейтлин. Развитие и разработка радиоастрономических методов антенных измерений в научно-исследовательском радиофизическом институте (НИРФИ). Препринт НИРФИ N 357, Н.Новгород, 1993г., 14с.

Дата поступления статьи
1 августа 1993 г.