

Радиотелескоп РИНАНУ 3-х миллиметрового диапазона РТ-2

В настоящее время радиоастрономия миллиметровых волн переживает период бурного развития, что обусловлено вступлением в строй к концу 80-х годов действующих за рубежом ряда прецизионных больших наземных радиотелескопов (РТ) миллиметрового диапазона (ММД) [1]. В СССР развитие радиоастрономии ММД снижается с созданием РТ-70, ввод в строй которого планируется к концу XX века. При этом в условиях отсутствия равноценных по чувствительности и разрешению РТ определенной научной ценности могут представлять мобильные радиотелескопы (МРТ) с диаметром антенны $D \approx 1 \div 2$ м и стационарные с $D \approx 3 \div 4$ м. Целесообразность таких РТ доказана эксплуатацией в течение более десяти лет РТ-1,2 Колумбийского университета (США) [2] и получением новых научных данных недавно вступившими в строй РТ-4 (Нагоя, Япония) [3], РТ-3 (Кельнский университет) [4] и РТ-2,5 (обсерватория Бордо) [5]. Два последних работают в благоприятных астроклиматических условиях высоко в горах и снабжены самой современной приемной и анализирующей аппаратурой.

Цель создания мобильного радиотелескопа диапазона коротких миллиметровых волн в Радиоастрономическом институте АН Украины (Харьков) состоит в проведении астрофизических наблюдений, в частности, гигантских молекулярных облаков в линиях CO ($\lambda = 2,6$ мм) и HCN ($\lambda = 3,3$ мм). Исследования в этой области далеко не завершены и до сих пор продолжаются на многих РТ. Из прикладных задач наиболее важными представляются экологический мониторинг озонового слоя и изучение астроклиматических условий в различных местах радиоастрономических наблюдений.

Мобильный радиотелескоп представляет собой полностью автономный инструмент (питание внешнее), размещенный в автомобильном аппаратном прицепе. На рис. 1 приведена структурная схема МРТ, включающего в себя антенную систему (АС), закрепленную на опорно-поворотном устройстве (ОПУ), приемник на основе «теплого» ДБШ (I), спектроанализатор фильтрового типа (II) и систему автоматического управления (III) на основе вычислительного комплекса МС-0507 (ДВК-4). Общий вес аппаратного прицепа МРТ составляет ~ 5 т.

Антенная система МРТ. Выполнена по схеме Кассегрена с главным зеркалом в виде параболоида диаметром его апертуры $D = 1100$ мм. Отношение фокусного расстояния рефлектора к его диаметру составляет 0,43. Статистический анализ результатов измерений качества отражающей поверхности рефлектора, проведенных на специальном оптико-механическом стенде (обработке подвергался массив из 700 точек), показал, что рефлектор работоспособен до длин волн $\lambda \approx 2$ мм.

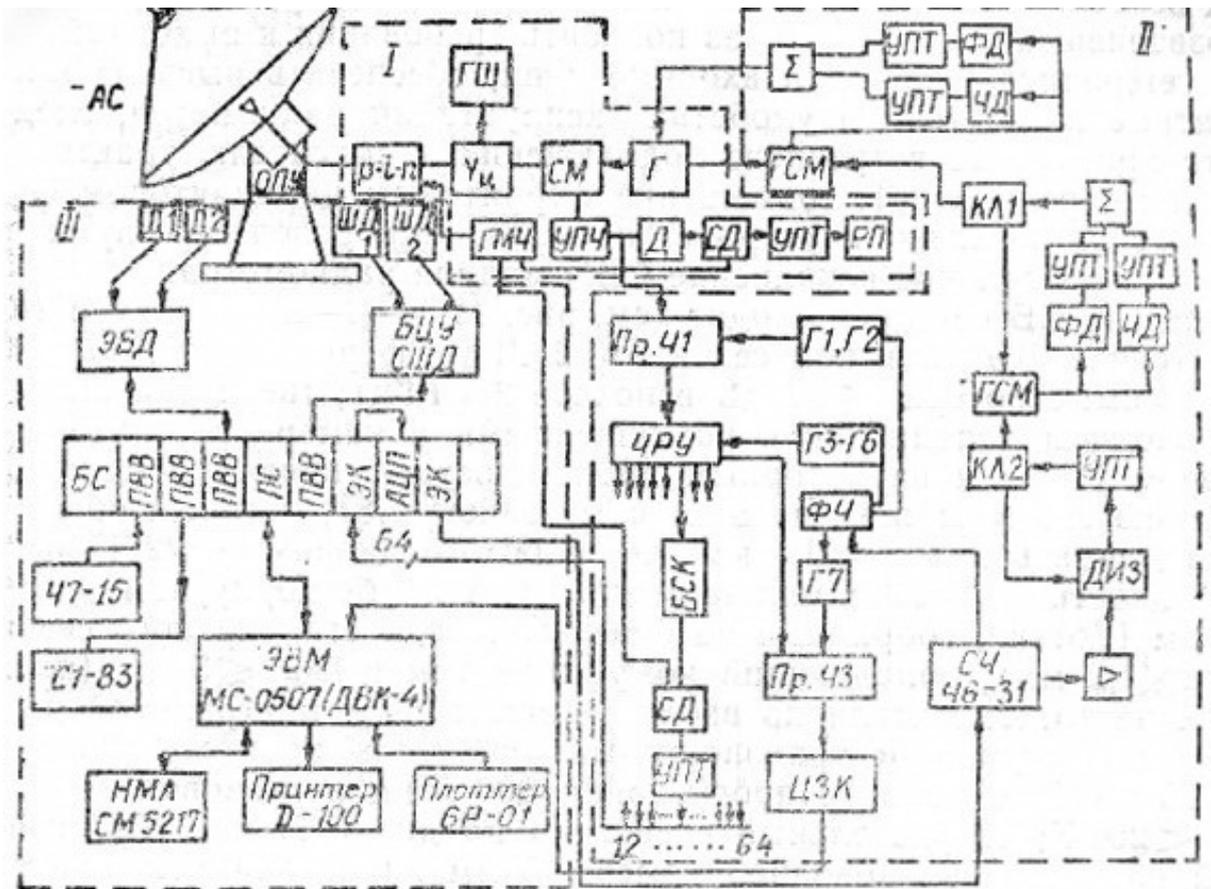


Рис. 1. Блок-схема мобильного радиотелескопа:

Д1 (Д2) датчики угол-код; ШД1(2) – шаговые двигатели; ЭБД – электронный блок датчиков; БЦУ СШД – блок цифрового управления системой ШД; ГШ – генератор шума; $Y_{ц}$ – Y -циркулятор; СМ – смеситель; Г – гетеродин; БС – блок сопряжения; ПВВ – платы ввода-вывода; ПС – плата сопряжения; ЭК – электронный коммутатор; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ГМЧ – генератор модулирующих частот; УПЧ – усилитель промежуточной частоты; Д – детектор; СД – синхронный детектор; УПТ – усилитель постоянного тока; РП – регистрирующий прибор; ПРЧ – преобразователь частоты; ЧРУ – частотно-разделительное устройство; ФСС – фильтр сосредоточенной селекции; ФД – фазовый детектор; ЧД – частотный детектор; Σ – суммирующее устройство управителя гетеродина; ГСМ – гармониковый смеситель; СЧ – синтезатор частот; Δ – усилитель; ДИЗ – диод с накоплением заряда; ЦЗК – цифровой знаковый коррелометр; ФЧ – формирователь частоты; КЛ (1, 2) – клистрон.

Вторичное зеркало выполнено в виде гиперboloида вращения (эксцентриситет $e = 1,236$, диаметр $d = 104$ мм), который установлен на четырех регулируемых опорах прямоугольного сечения 11 мм \cdot $5,5$ мм. Такое зеркало обеспечивает фокусировку луча в области на оси рефлектора, отстоящей на 20 мм от его вершины. В качестве облучателя может

использоваться либо диагональный рупор, либо конический двухмодовый. В описываемом варианте рупор и элементы волноводного тракта рассчитаны на работу в диапазоне $\lambda \approx 2,6 \div 3,3$ мм. Геометрия элементов АС такова, что уровень облучения краев рефлектора составляет ≈ -12 дБ. При этом коэффициент использования площади по предварительным оценкам не менее 0,5, а ширина луча по половинной мощности $\approx 14'$. Уровень первого бокового лепестка ≈ -22 дБ. Уровень бокового излучения минимизировался на основе апертурных расчетов, выполненных токовым методом. АС вместе с приемной частью, расположенной в непосредственной близости от облучателя с тыльной стороны рефлектора, установлена на ОПУ экваториального типа.

Радиометрический приемник. Построен по модуляционной схеме с приемником супергетеродинного типа на рабочую частоту 94 ГГц.

К особенностям реализованной нами схемы построения СВЧ тракта, позволившей в несколько раз понизить требования к выходной мощности гетеродина, упростить входные цепи, обеспечить высокие массо-габаритные показатели и удобства эксплуатации радиометра, следует отнести применение встречного подключения к смесителю трактов антенны и гетеродина [6], совмещение ферритовым циркулятором функций элемента развязки и устройства ввода калибровочного шума [7], а также твердотельное исполнение СВЧ модуля радиометра.

В состав СВЧ модуля входят (см. рис. 1): $p-i-n$ модулятор (прямые потери $\sim 0,9$ дБ в полосе частот 2 ГГц); ферритовый Y-циркулятор (вносимые потери $\leq 0,7$ дБ в полосе 2,5 ГГц); твердотельный ГШ в волноводном исполнении с размещенными в камере резонатора генератором Ганна и варакторным диодом, осуществляющим частотную модуляцию его мощности по шумовому закону [8], который обеспечивает на длине волны $\lambda \approx 3,3$ мм при работе с диодом АА727Г выходную мощность ~ 1 мВт; малошумящий СМ на бескорпусном диоде с барьером Шоттки, собранный на базе волновода стандартного сечения (2,4 мм x 1,2 мм), обладающий коэффициентом шума ≤ 5 дБ (полоса рабочих частот смесителя по входу не менее 30% центральной частоты [9]); малошумящий транзисторный усилитель промежуточной частоты 750 МГц с полосой пропускания 500 МГц и шумовой температурой < 200 К; твердотельный генератор на диоде Ганна (Г), выполненный на основе волноводной камеры 6 мм диапазона (сечение волновода 5,2 мм x 1,2 мм) [10].

Элементы низкочастотной части радиометра традиционны и в пояснении не нуждаются.

Флуктуационная чувствительность радиометра, измеренная в режиме *DSB*, при постоянной времени интегрирования ~ 1 с, составляет 0,2 К.

Система управления МРТ. Проведение комплексных радиоастрономических наблюдений в диапазоне коротких ММВ в режиме спектральных исследований возможно только в автоматическом режиме, который на современных РТ реализуется системой управления на основе управляющего вычислительного комплекса (УВК).

Основные задачи, решаемые системой управления МРТ:

– управление антенной, заключающееся в вычислении с определенной частотой в реальном масштабе эфемеридного времени текущих экваториальных координат (α , δ), исправленных на систематические ошибки наведения, на учет рефракции, параллакса и т. д., и в выдаче установочных координат в цифровую систему управления;

– управление измерительным комплексом аппаратуры спектрального анализа (калибровка каналов, накопление, статистическая обработка и т. д.) с последующей записью на все виды носителей (магнитные диски, магнитные ленты и др.) и представление результатов в удобной для документирования форме – на принтер и плоттер.

Система управления МРТ функционально включает две подсистемы: подсистему синхронизированного по звездному времени наведения, сопровождения, сканирования антенной РТ заданных объектов на небесной сфере, обеспечивающую заданный алгоритм «время—положение антенны»; подсистему приема, калибровки, накопления и первичной обработки данных, полученных радиометром и спектроанализатором. Для МРТ точность и стабильность наведения АС стоит на втором месте по критичности параметров после качества изготовления рабочей поверхности рефлектора. Ошибка наведения в 0,2 от ширины диаграммы направленности (ДН) приводит к потере чувствительности приема на 10%, которая эквивалентна появлению дополнительной ошибки поверхности $\sim \lambda/40$. Минимальная ширина ДН по половинной мощности у АС МРТ (при диаметре апертуры $D \approx 2$ м и $\lambda \approx 1$ мм) может составлять всего $\sim 3'$. Поэтому необходимая точность как датчиков «угол—код», так и характеристик привода системы управления должна быть не хуже $0,5'$. В МРТ установлены датчики «угол—код» на основе синусно-косинусных вращающихся трансформаторов (СКВТ) типа ВТ-71, которые совместно с преобразователями «фаза—код» типа ПФК-15 обеспечивают точность определения угла $\pm 25''$ (15 двоичных разрядов). Датчики смонтированы непосредственно на осях склонения и прямого восхождения ОПУ в экваториальной установке. Редукторы, расположенные в ОПУ, и шаговые двигатели привода типа ДШИ-200-3 мощностью ≈ 25 Вт каждый, обеспечивают минимальное значение отработки угла менее $1''$. Ядром УВК РТ-1 (РТ-2) является микроЭВМ «Электроника МС0507» (ДВК-4), объединяющая обе подсистемы управления и связанная с оператором через консоль ввода-вывода. Функционально обе подсистемы входят в одну ветвь УВК [15] и подключены к межмодульному параллельному интерфейсу (МПИ) микроЭВМ через контроллер ветви И2. Конструктивно БС (см. рис. 1) представляет собой автономный субблок с ПВВ цифровой и аналоговой информации с внутренней 8-разрядной шиной данных и 8-разрядной адресной шиной на 256 возможных устройств ввода-вывода. Блок сопряжения включает три платы ввода от ЭБД угол—код и синхронизатора Ч7-15, плату вывода 2 аналоговых сигналов (ЦАП) на осциллограф С1-83 или 2-координатный самописец Н307-1, плату связи с 9-разрядным АЦП типа Ф7077/2, две платы электронных коммутаторов – для коммутации 64

каналов спектроанализатора к АЦП и управлению перестройкой частоты синтезатора Ч6-31 и плата связи с БЦУ СШД, который, однако, работоспособен и в режиме ручного автономного управления антенной. ЦЗК соединен с ЭВМ аналогично БС – через устройство параллельного обмена И2 в режиме прерываний.

1. Пейн Дж. М. Радиоастрономия миллиметровых и субмиллиметровых волн/Труды ин-та ннж. по электротехнике и радиоэлектронике. – 1989. – 77, №7.– С. 12–42.

2. Giant Molecular clouds in the Galaxy/Ed. by P. M. Solomon and M. G. Edmunds.– Oxford etc.: Pergamon Press, 1980. – 344 p.

3. The 4-m millimeter Wave Telescope at Nagoya / K. Kawabata, H. Ogawa, Y. Fukui et al. //Astron. and Astrophys. – 1985. – 151, N 1. – P. 1–6.

4. The University of Cologne 3-m radiotelescope / G. Winnewisser, M. Bester, R. Ewald et al. // Ibid. – 1986. – 167. N 1. – P. 207–213.

5. The 2,5-mn millimeter telescope on Plateau de Bure/A. Casters. R. Lucas. V. Lazareff et al. //Ibid. – 1988. – 194, N 1/2. – P. 340–343.

6. Руженцев Н. В. Радиометр без диплексера // Радиоастрономическая аппаратура: Тез. докл. XXI Всесоюз. конф. (Ереван, окт. 1989). – Ереван: Изд-во АН Арм. ССР, 1989. – С. 45–46.

7. Руженцев Н. В., Шарапов Л. И., Чурилов В.П. Радиометр трехмиллиметрового диапазона с системой внутренней калибровки // Радиоастрономическая аппаратура: Тез. дкл. XVII Всесоюз. конф. (Ереван, окт. 1985). – Ереван : Изд-во АН Арм. ССР, 1985. – С. 181 – 182.

8. Воробьев Ю. Л., Погоняйло В. Д. Генератор стохастических колебаний миллиметрового диапазона длин волн//Там же. – С. 135–136.

9. Королев А. М., Песковацкий С. А., Подъячий В. И. Малошумящий охлаждаемый приемник 3 ММ диапазона //Радиоастрономическая аппаратура: Тез. докл. XXI Всесоюз. конф. (Ереван, окт. 1989). – Ереван: Изд-во АН Арм. ССР, 1989. – С. 125-126.

10. Barth H. A Wideband backshort-fannable 2-harmonic W-band Gunn oscillator // IEEE MTT, S. Int. Microwave Symp. Dig. – 1981. – P. 334–337.

11. Сулима В. С. Фильтровый анализатор спектра для радиоастрономической аппаратуры миллиметрового диапазона // Радиоастрономическая аппаратура: Тез. докл. XXI Всесоюз. конф. (Ереван, окт. 1989). – Ереван: Изд-во АН Арм. ССР, 1989. С. 187.

Анализ влияния ошибок калибровки на определение радиояркой температуры источника космического излучения

Важным обстоятельством, влияющим на точность измерений радиояркости объекта исследований, является выбор метода калибровки радиометрической системы радиотелескопа. На основании предыдущего опыта проведения радиометрических и радиоастрономических наблюдений нами был рассмотрен ряд методов измерения радиояркой температуры ($T_{я}$) источника космического источника (ИКИ), подлежащих количественной оценке их точностных характеристик на примере условий эксплуатации и с учетом параметров радиотелескопов РТ-2 и MRT – 2. Расчет точности всех исследовавшихся конкурирующих методов осуществлялся с помощью единого, хорошо известного подхода по формулам «переноса ошибок». Поскольку, в КВЧММДВ флуктуации излучения атмосферы оказывают существенное негативное влияние на измерение интенсивности измеряемого сигнала от ИКИ, в радиотелескопах используется режим переориентировки антенны на реперную область неба (где отсутствуют ИКИ) для осуществления т.н. режима диаграммной модуляции [433]. В этом случае можно показать, что величина $T_{я}$ космического источника будет определяться выражением [107]:

$$T_{я} = \frac{\alpha \cdot \delta n}{p \exp(-\tau)} K ,$$

где α - калибровочный коэффициент приемной системы,

δn - разность показаний уровней на выходе АЦП при наблюдении ИКИ и отведении от него антенного луча по азимуту,

p - параметр, учитывающий рассеяние вне основного лепестка ДН антенны и тепловые потери в ней,

τ - поглощение в атмосфере на луче зрения радиотелескопа,

K - коэффициент заполнения ДН антенны ИКИ (зависящий от формы и ширины ДН, а также от угловых размеров ИКИ).

Точность определения каждой из входящих в это выражение величин влияет на точность определения величины $T_{я}$ по результатам измерений. Формулы «переноса ошибок», использованные для оценки точности характеристик анализируемых методов определения вышеуказанных параметров позволили также оценить и относительный вклад ошибки определения каждого параметра в суммарную ошибку.

Были выбраны и проанализированы ошибки следующих методов определения значений α , $\delta\alpha$, p , τ , $T_{я}$:

- 1) Величины α путем калибровки радиометрического приемника с помощью :
 - а) согласованной нагрузки облучателя, находящейся при комнатной температуре и при температуре кипения жидкого азота,
 - б) по радиоизлучению атмосферы и неохлаждаемой нагрузке облучателя (с использованием величины $T_{я}$ атмосферы, либо рассчитанной по метеоданным, либо измеренной с помощью эталонного рупора),
 - в) с помощью калибровочного генератора шума.
- 2) Величины p :
 - а) методом «искусственной луны»,
 - б) «по радиоизлучению леса»,
 - в) по радиоизлучению центральной части лунного диска в период новолуния,
 - г) по одиночным кучевым облакам с применением радиометра с эталонной рупорной антенной.
- 3) Величины τ , измеренной с помощью эталонного рупора, либо рассчитанной по метеоданным.
- 4) Величины δn , измеренной с изменяемым после калибровки и не изменяемым коэффициентами усиления приемника.
- 5) Величины $T_{я}$, измеряемой путем различных комбинаций перечисленных выше методов.

Анализ полученных данных (Таблица А) продемонстрировал, что максимальную точность определения $T_{я}$ КИ (около 3% для РТ-2 и МРТ-2) можно получить, измеряя рассеяние антенны методом «искусственной луны» калибруя приемник с помощью охлаждаемой жидким азотом согласованной нагрузки облучателя.

Таблица В.1

Оценка точности определения $T_{я}$ ИКИ для различных методов калибровки радиометра ($\delta\alpha$) и измерения параметра рассеяния (ρ) антенной системы.

	методы калибровки	
	метод нагрузок (300К, 78К)	метод расчета яркости неба
Метод Луны		10-17%
Метод искусственной Луны	3%	6%
Метод излучения леса		9%

Однако, в случаях, когда не требуется столь высокая точность определения измеряемой интенсивности излучения КИ, имеет смысл использовать более простые и удобные в реализации методы измерений. Например, проводить калибровку приемников по расчетному (на основании метеоданных) излучению зенитной области неба ($\delta\alpha$ около 5%). Различные сочетания этих методов использовались нами на практике при астрономических наблюдениях.

Измерение чувствительности радиометра

Принято считать, что \min сигнал, который можно зарегистрировать РМ-ом равен СКО выходных флуктуаций δT . Что бы определить δT экспериментально, надо записать с помощью например самописца $V_{\text{вых}}(t)$ радиометра при отсутствии сигнала. Запись надо произвести в достаточно большом масштабе по обеим осям T и t , чтобы были видны флуктуации $V_{\text{вых}}$ и затем провести калибровку, подав калибровочный сигнал на вход РМ-ра.

В результате мы получим запись т.н. шумовой дорожки и т.н. калибровочной ступеньки.

СКО определяется следующим образом: от некоторого условного t_0 через равные промежутки времени $\Delta t > \tau$ (для независимости отсчетов) снимаются отсчеты a_i :

По n отсчетов 1) находим среднее $\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i$; 2) отклонения от среднего

$\bar{a} - a_i$ и их квадраты $(\bar{a} - a_i)^2$ и, наконец, их СКО $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{a} - a_i)^2}{n-1}}$. Затем

используя известный калибровочный сигнал $\Delta u_k \propto \Delta T_a$ находим $\delta T = \Delta T_k \frac{\sigma}{\Delta u_k}$ в $^{\circ}\text{К}$.

Чтобы приблизиться к предельному значению 2^x СКО выходных флуктуаций надо использовать множество реализаций (по n отсчетов в каждой), либо иметь одну с большим числом n .

СВЯЗЬ δT С ШИРИНОЙ ШУМОВОЙ ДОРОЖКИ

Если флуктуации на вых. РМ, как можно считать, обладают нормальным распределением, то плотность вероятности отклонений X при нулевом среднем определяется формулой

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{-x^2/2\sigma^2}$$

Вероятность того, что X находятся в интервале $-x_0 < x < x_0$

$\Phi(x_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-x_0}^{x_0} e^{-x^2/2\sigma^2} dx$ и наоборот вероятность выхода за интервал x_0/σ и

x_0/σ равна $1 - \Phi\left(\frac{x_0}{\sigma}\right)$.

Итак, если мы рассматриваем выходные флуктуации радиометра, то под X надо понимать выходной ток регистрируемый самописцем и пропорциональный входной температуре T . А вероятность u можно

трактовать, как величину обратную числу отсчетов n на которые приходится 1 выброс за границы интервала $(-x_0, x_0)$ шумовой дорожке и СКО.

1) связь между шириной шумовой дорожки $\Delta T_{дор}$ и СКО в зависимости от числа отсчетов на участке записи; 2) полезно знать, что δT с вероятностью 0,9 лежит в пределах $\delta T \pm 1,6 \frac{\delta T}{\sqrt{2n}}$ т.е. если $n=25$ $\delta T = 0,03^\circ K$, то с 90% вероятностью $\delta T = 0,03 \pm 0,007^\circ K$.

С помощью этой кривой легко найти значения отношения $\Delta T_{дорожки} / \delta T$ для выбранного значения вероятности выхода за интервалах $\Delta T_{дор}$, измеряемых значений или $n_1 = \frac{1}{u}$ или $u = \frac{1}{n_1}$.

Целесообразно выбрать $n=20-30$ на 5 ± 10 участках для отфильтрованных т.о. НЧ ползаний (смещений нуля).

Измерение Тш радиометра по постоянной составляющей тока видеодетектора

Измерение T_m обычно проводятся с помощью 2^x калибровочных нагрузок с T_1 и T_2 .

Источники калибровочного сигнала обычно это или две нагрузки с T_1 и T_2 или ГШ с известной эффективной T излучения.

Из 2^x измерений получим 2 отсчета

$$\alpha_1 \propto T_{np} + T_1$$

$$\alpha_2 \propto T_{np} + T_2, \quad \text{тогда}$$

$$T_{np} = (T_2 - T_1) \frac{\alpha_1 / \alpha_2}{1 - \alpha_1 / \alpha_2} - T_1$$

Если нет уверенности в линейности тракта, то измерения проводят с помощью аттенюатора. С его помощью сигналы от каждой из нагрузок приводят к одному уровню α , при этом исключается характеристика детектора:

$$T_1 + T_{np} \propto \alpha \text{ и}$$

$$\frac{T_2 + T_{np}}{n} \propto \alpha, \quad \text{тогда}$$

$$T_{np} = \frac{T_2 - nT_1}{n-1} \text{ здесь } n - \text{ это } \Delta \text{ ослабление, вносимое аттенюатором.}$$

Измерение радиояркости источников излучения с учетом параметров рассеяния антенны

Описана предложенная автором [127] и экспериментально апробированная в диапазоне 90 ГГц [74, 410-411] методика измерения коэффициента полезного действия η , а также коэффициента рассеяния β вне главного луча диаграммы направленности (ДН) и его составляющих для антенн с малой апертурой. Кроме того, здесь приведены примеры использования таких эталонных антенн для исследования свойств рассеяния зеркальных антенн радиотелескопов РТ-2 и МРТ-2.

Методика основана на использовании широко известного устройства – искусственной луны (ИЛ), в сочетании с применением специальной полый пенопластовой бленды с радиопоглощающим материалом, помещаемым в жидкий азот.

Антенные температуры радиометра при расположении в радиопоглощающей бленде ориентированной в зенит антенны, направленной в первом случае на перекрывающий главный луч ДН поглощающий диск ($T_{А.Л.ГЛ}$), а во втором – на диск, перекрывающий полный луч ДН ($T_{А.Л.П.}$), т.е. сектор углов, не затененный блендой, равны

$$T_{А.Л.ГЛ} = T_{ОЛ}(1 - \beta)\eta + T_{ОБЛ}\beta_{И}\eta + \tilde{T}_{Я.З}\beta_{Н}\eta + T_0(1 - \eta) \quad (Б.1)$$

$$T_{А.Л.П.} = T_{ОЛ}(1 - \beta)\eta + T_{ОБЛ}\beta_{И}\eta + T_{ОЛ}\beta_{Н}\eta + T_0(1 - \eta), \quad (Б.2)$$

где : T_0 , $T_{ОЛ}$, $T_{ОБЛ}$ - термодинамические температуры антенны, радиопоглощающего материала ИЛ и бленды, соответственно; $\tilde{T}_{ЯЗ}$ - усредненная радиояркая температура неба, принимаемая неизотропной частью ДН антенны, приближенно (с точностью до 1%) равная радиояркой температуре зенита $T_{Я,3}$; $\beta_{И}$, $\beta_{Н}$ - коэффициенты рассеяния изотропной и неизотропной частей ДН антенны.

Из выражений Б.1 и Б.2 следует, что

$$\beta_{Y}\eta = \frac{(T_{А.ИЛ} - T_{А.ИЛЛ})}{(T_{ОБЛ} - T_{Я.3})} \quad (Б.3)$$

Теперь, записав антенные температуры зенита при температуре радиопоглотителя бленды - T_0 ($T_{Л,ЗТ}$) и жидкого азота ($T_{Л.З.АЗ}$),

$$T_{А.З.Е_0} = T_{Я.3} \cdot (1 - \beta)\eta + T_{ОБЛ} \beta_{И}\eta + \tilde{T}_{Я.3} \beta_{Н}\eta + T_0(1 - \eta) \quad (Б.4)$$

$$T_{А.З.АЗ} = T_{Я.3} \cdot (1 - \beta)\eta + T_{ОБЛ.АЗ} \beta_{И}\eta + \tilde{T}_{Я.3} \beta_{Н}(1 - \eta) \quad (Б.5)$$

получим

$$\beta_{И}\eta = \frac{(T_{АЗТ_0} - T_{А.З.АЗ})}{(T_{ЩБЛ} - T_{О.БЛ,АЗ})} \quad (Б.6)$$

Кроме того, из выражений (1) и (4) следует, что

$$(1 - \beta)\eta = \frac{(T_{А.ИЛЛ} - T_{А.З.Т_0})}{(T_{ОЛ} - T_{Я.3})} \quad (Б.7)$$

Решая совместно (Б.3), (Б.6), (Б.7) и имея в виду, что $\beta_{И} + \beta_{Y} = \beta$, легко получить значения β , $\beta_{И}$, $\beta_{Н}$, η .

Исследованные с помощью данного метода рупоры различного типа имели значения коэффициента рассеяния, представленные в таблице 1.1. Исходя из этих данных, для измерения рассеяния зеркальных антенн, в качестве эталонного, был выбран рупор с изломами угла раскрыва. С его помощью и с использованием метода двух нагрузок были проведены прецизионные измерения радиояркой температуры зенитной области

атмосферы. После чего с привлечением известного метода радиоизлучения леса были проведены измерения значений β для предварительно отъюстированных исследовавшихся антенн. В результате было выяснено, что значения коэффициента рассеяния антенн Кассегрена, использовавшихся в радиотелескопах РТ-2 и МРТ-2, равны 0.24 и 0.26 соответственно.

Юстировка радиотелескопов ММ ДВ лазерным излучателем

Применение нелинейных методов восстановления изображения источников космического радиоизлучения, регистрируемого с помощью малых радиотелескопов (РТ) при наличии априорной информации об объекте исследования, позволяет значительно повысить разрешающую способность изображений и информативность радиоастрономических исследований, проводимых на подобных РТ. Условием решения задачи повышения разрешающей способности в процессе восстановления изображения является необходимость точного учета диаграммы направленности (ДН) радиотелескопа. В связи с этим, важно обеспечить соответствие реальной ДН радиотелескопа с ее расчетными параметрами. В этом подразделе описываются работы по юстировке радиотелескопа РТ-2 с апертурой $D=2\text{м}$ ($\lambda=3.4\text{мм}$) с помощью лазерного излучателя, обеспечивающие выполнение данных требований.

Целью юстировки являлась минимизация ошибки размещения контррефлектора (КР) относительно оси рефлектора, причем, как в линейном (смещение от оси), так и в угловом (перекосы относительно оси) плане. Обычно применяемый способ юстировки с помощью юстировочного штыря, дает хорошие результаты, но пригоден для предварительной установки положения КР. Окончательное размещение контррефлектора достигается другими методами, среди которых радиофизический является наиболее продуктивным. Однако он имеет недостаток: медленный процесс юстировки, вследствие продолжительного периода обмера по удаленному

СВЧ генератору или сканам по радиоастрономическому источнику, чередующимися с механическими, плохо прогнозируемыми подстройками геометрии антенной системы. Кроме того, недостатком юстировки по выносному источнику является проблема обеспечения на антенном полигоне условий дальней зоны ($L=2.4\text{кМ}$), а для юстировки малых РТ отсутствуют мощные точечные космические источники. Использование в последнем случае резких границ Солнца осложнено нестационарностью его излучения.

Основные результаты.

Известны применения лазерного излучателя для юстировок и измерения поверхности рефлектора РТ. Однако они не полностью обеспечивали штатную установку всех компонент антенной системы РТ. Предлагаемая юстировка отличается тем, что КР располагается в антенной системе на штатном месте, а юстировка ведется лазерным излучателем, располагаемым в штатном месте рупора, облучающего КР [Рис. Г.1]. Такое размещение лазерного излучателя позволяет обеспечить симметрию положения КР относительно оси основного рефлектора, учитывая все смещения и перекосы установки КР в его узле. Модуль лазерного излучателя полупроводникового типа выполнен в цилиндрическом корпусе с 2-мя коллимационными отверстиями диаметром 0.5ММ, расположенными на расстоянии 140мм, а за ними располагается собственно полупроводниковый (ПП) лазер [Рис. Г.2а]. Минимальная ошибка несоосности коллимационных отверстий и поверхности модуля обеспечивается технологически на этапе производства и сборки. Коллимационные отверстия получены в 2-х диафрагмах, запрессованных на концах основного приспособления с высокой осевой точностью, вследствие изготовления их на станке с одной установки. Окончательная юстировка лазерного излучателя внутри модуля производилась регулировочными винтами до получения яркого и симметричного пятна от ПП лазера на удалении нескольких метров от

лазерного излучателя. Процесс сборки ПП модуля лазерного излучателя заканчивался проверкой отсутствия биений луча лазера при вращения модуля, помещенного на поверхность технологической уголковой призмы. Облучение экрана на расстоянии 5 метров показало, что биение лазерного луча в нашем случае не превосходят 0.5 мм.

С внешней стороны модуля, на стороне выхода луча, размещен узел оптической призмы, предназначенной для отклонения луча с целью облучения средней части поверхности КР. Весь процесс юстировки положения КР проводится в 2 этапа. На первом этапе модуль ПП лазера используется без оптической призмы и по лучу лазера точно устанавливается центр КР по его центральной метке. На втором этапе на модуль ПП лазера устанавливается оптическая призма и путем ее поворота достигается облучение КР примерно в средней части, после чего призма надежно фиксируется. Непременным условием такой юстировки является использование КР с отполированной рабочей поверхностью, обеспечивающей хорошее отражение лазерного луча. Рефлектор РТ не требует такой подготовки, поскольку пятно от луча лазера на его поверхности хорошо заметно. Размеры пятна не превышают 20мм и легко фиксируются на поверхности рефлектора любым доступным способом, причем наиболее удобно такое пятно фиксировать по его краям в направлении радиуса рефлектора, а окончательную траекторию получать, отмечая середину 2-х отметок.

В процессе юстировки лазерный излучатель поворачивался вокруг своей оси, а пятно от лазера, отраженное зеркальной поверхностью КР на рефлектор, совершало движение по окружности или эллипсу на его поверхности. Так как КР представляет собой абсолютно симметричное тело (изготовлен на токарном станке), то достигая траектории движения отраженного пятна на рефлекторе в виде окружности (регулировкой положения КР с помощью тяг), - удается достичь его симметричного

положение относительно рефлектора. Осевое положение КР легко устанавливается с помощью специального осевого шаблона.

Эта процедура впервые была апробирована на системе радиовидения с однометровой апертурой и на радиотелескопе ММ ДВ с двухметровой апертурой. Процесс юстировки занимал не более 0.5 часа, а с учетом смены радиометра на модуль лазерного излучателя, - не более 1 часа. Начальная эллиптичность после тщательной юстировки с помощью обычно применяемого штыревого устройства достигала 60мм. После проведения юстировки с помощью предлагаемого устройства, достигалась эллиптичность менее 4мм, что соответствовало (для геометрии антенной системы РТ-2) угловому смещению электрической оси антенны менее, чем на одну ширину ДН.

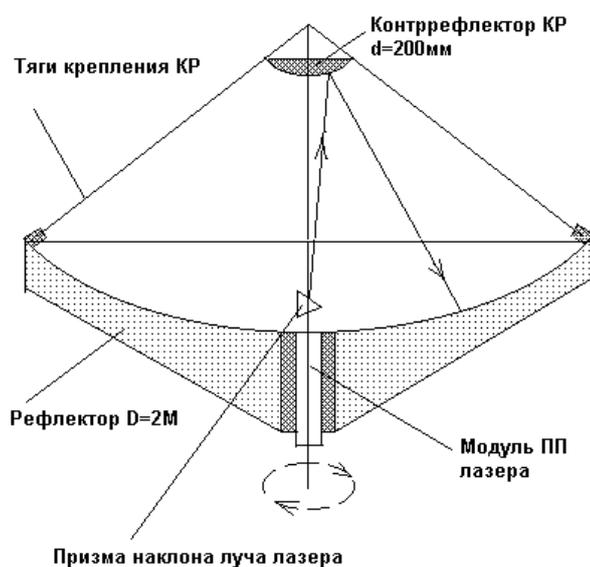


Рис. Г.1 Схема лазерной юстировки двухзеркальных антенных систем

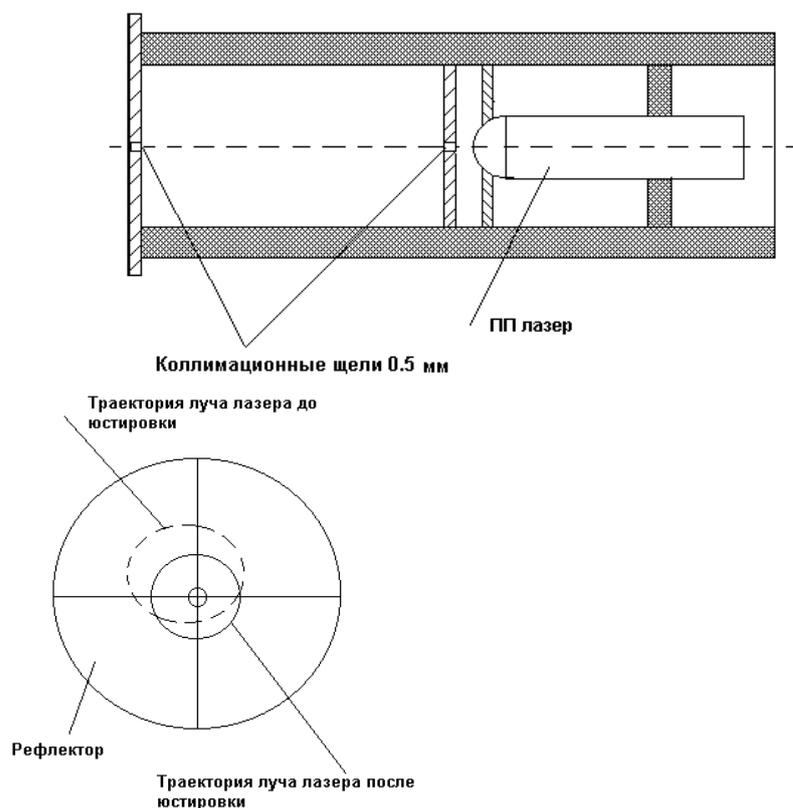


Рис.Г.2 Схема лазерного излучателя для юстировки антенных систем

Основным требованием к успешному проведению юстировки положения КР в антенной системе лазерным излучателем является гарантия наличия осевой симметрии основного рефлектора и узла крепления облучателя, а также осевой симметрии узла крепления облучателя с его электрической осью, т.е. с его собственной ДН. Только при выполнении этих условий описанная юстировка положения КР даст желаемый результат- симметричную ДН антенной системы радиотелескопа.

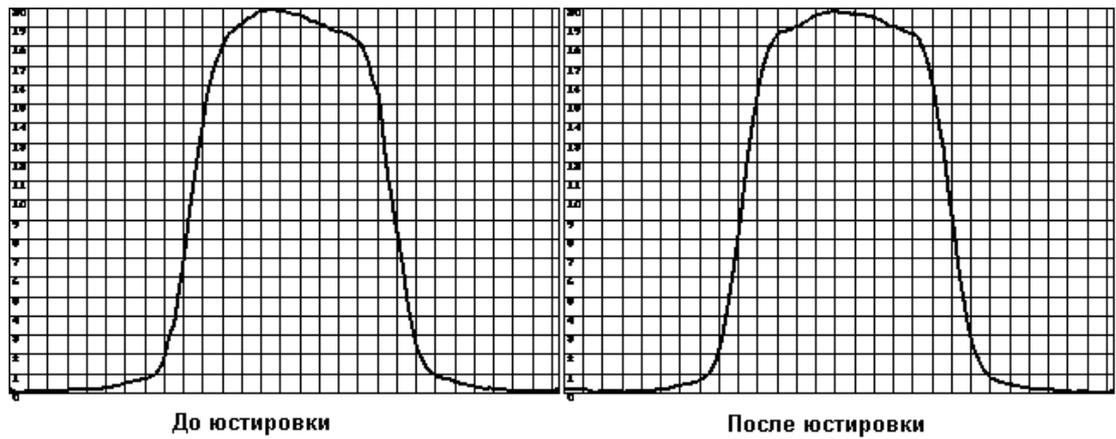


Рис.Г.3 Вертикальный скан солнца (в Е плоскости антенной системы)

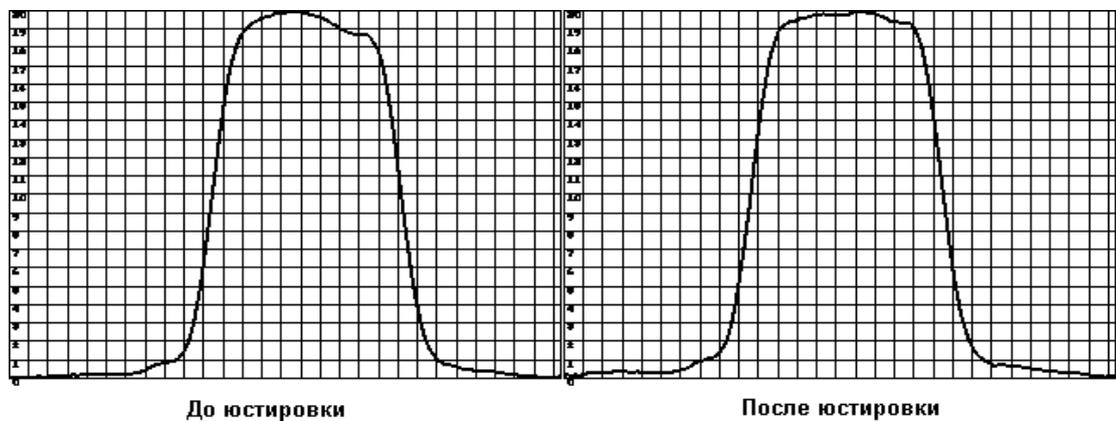


Рис.Г.4 Горизонтальный скан солнца (в Н плоскости антенной системы)

В качестве иллюстрации эффекта юстировки по лазерному излучателю на Рис. Г.3 и Рис. Г.4 приводятся вертикальные и горизонтальные сканы Солнца, на которых хорошо заметен эффект симметризации ДН РТ-2. Как отмечалось ранее, использование резких границ Солнца может дать лишь качественный эффект вследствие локальных неоднородностей и их нестационарности на поверхности (пятна, вспышки). Тем не менее эффект юстировки хорошо заметен. В последние несколько лет с помощью описанного выше метода проводится регулярная настройка и юстировка антенн, представленных на рис. 1.5 и рис. 1.6, а также других антенных систем.

Исследование влияния искажений ДН радиотелескопа РТ-2 на форму изображения Солнца.

Радиоастрономические исследования радиоизлучения Солнца, выполняемые на радиотелескопах, предусматривают восстановление радиоизображений активных образований на его диске. Для решения этой задачи необходимо знание реальной аппаратной функции, определяемой ДН радиотелескопа. Прямые измерения ДН радиотелескопов сопряжены со значительными техническими трудностями и эти трудности возрастают по мере роста соотношения размера апертуры к длине волны.

Основные искажения ДН параболического радиотелескопа связаны с геометрическими ошибками установки элементов антенной системы – рупорной антенны радиометра и контррефлектора.

Смещение рупорной антенны вдоль главной оси относительно фокальной плоскости приводит к эффекту дефокусировки изображения, которая соответствует аппаратной функции в частотной области типа

$$A(\omega) = I_1(\beta \cdot \omega) / \beta \cdot \omega,$$

где I_1 - функция Бесселя первого рода, ω - пространственная частота, а β параметр дефокусировки. Наличие дефокусировки приводит к расширению ДН радиотелескопа, снижению коэффициента передачи пространственных частот и уменьшению граничной частоты ω_{sp} . По этому, целесообразно по данным наблюдений спокойного Солнца выполнять более точную юстировку непосредственно антенной системы, сведя эффект дефокусировки к минимуму.

Другой эффект, приводящий к искажению ДН радиотелескопа, связан с угловыми ошибками установки оси контррефлектора. Ограниченная точность механических устройств и методик юстировки может приводить к

паразитному угловому наклону фокальной плоскости параболического рефлектора к плоскости размещения рупорной антенны. В результате возникает асимметрия ДН радиотелескопа, наиболее явно проявляющаяся в асимметрии уровня боковых лепестков. Оценку допустимого уровня искажений ДН можно получить на основе результатов соответствующего математического моделирования. Такое математическое моделирование эффектов искажения изображений источников на выходе радиотелескопа за счет асимметрии его ДН было проведено здесь для моделей, наиболее полно соответствующих реальным условиям. При этом, очевидно, что оценку искажений необходимо выполнить также для модели спокойного Солнца.

Процесс восстановления изображения активных образований связан с последовательной обработкой одномерных ортогональных сканов реальной двумерной свертки изображения Солнца с двумерной ДН радиотелескопа. Поэтому обе модели (Солнца и ДН) должны быть двумерными. Поскольку в рабочем 3х ММ ДВ параметры спокойного Солнца близки к оптическим, двумерную модель Солнца представим круговой столообразного вида с размером по диаметру $32'$ и яркостной температурой 6000K . Вид центрального сечения модели на картинной плоскости размером $64' \times 64'$ представлен на рис. Д.1. Размерность оси ординат дана в яркостной температуре. В качестве исходной модели ДН используем расчетную нормированную диаграмму радиотелескопа РТ-2 с круговой симметрией относительно оси главного лепестка. Уровень её первого бокового лепестка составляет -18дБ . Центральное сечение исходной ДН по мощности приведено на рис. Д.2, где по оси абсцисс дан угловой размер в минутах. Двумерная свертка изображения Солнца с исходной ДН выполнена с учетом вклада её первых двух боковых лепестков. Центральное сечение двумерной свертки показано на рис. Д.3. Максимальный уровень яркостной температуры сглаженного изображения Солнца примерно на $2,5\%$ меньше яркостной температуры модели. Это свидетельствует о том, что аппаратная функция радиотелескопа РТ-2 является достаточно узкой и выходное

изображение спокойного Солнца не достигает уровня исходного изображения. Данное обстоятельство необходимо учитывать при определении истинной яркости наблюдаемого изображения. Приведенная форма сглаженного изображения спокойного Солнца является эталонной, относительно которой оценивается уровень искажений, вызываемых асимметрией реальной ДН.

Аналогичные расчеты проведены для трёх вариантов величины асимметрии ДН, когда уровни первых боковых лепестков составляют: -17дБ и -19дБ ; -15дБ и -21дБ ; -12дБ и -18дБ . Покажем, для наглядности, к каким искажениям изображения Солнца на выходе радиотелескопа приводит асимметрия ДН по боковым лепесткам, указанным в последнем варианте. Трёхмерное нормированное изображение указанной ДН приведено на рис. Д.4. Центральное сечение двумерной свертки искаженной ДН с моделью Солнца в плоскости, соответствующей максимальному соотношению уровней первых боковых лепестков, показано на рис. Д.5.

Расчеты подобные проведенным, позволяют выбирать модель ДН, которая дает наиболее близкую форму центральных сканов свертки столообразной модели с реальными сканами спокойного Солнца на радиотелескопе. Выбранная таким образом модель ДН использовалась в качестве аппаратной функции при восстановлении изображения активных образований на диске Солнца для РТ-2.

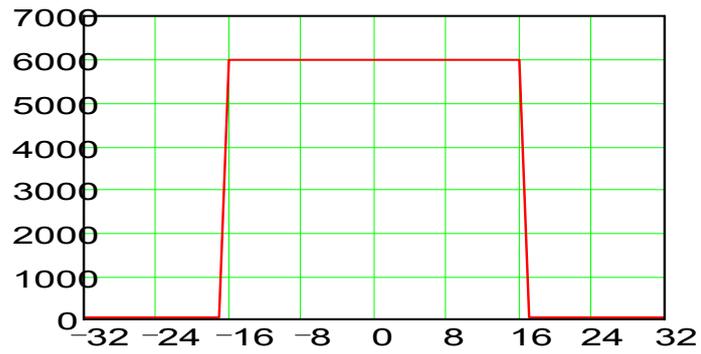


Рис. Д.1. Центральное сечение модели Солнца

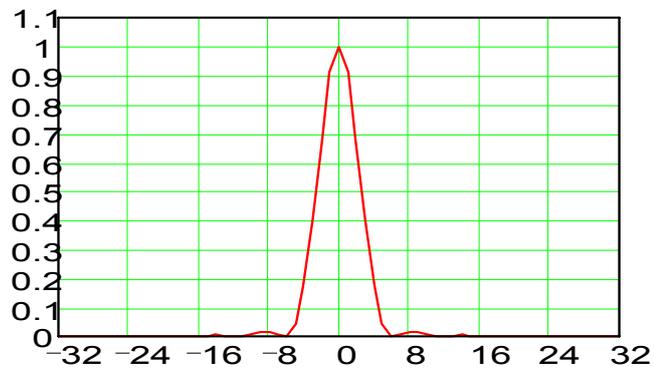


Рис. Д.2. Центральное сечение исходной ДН по мощности

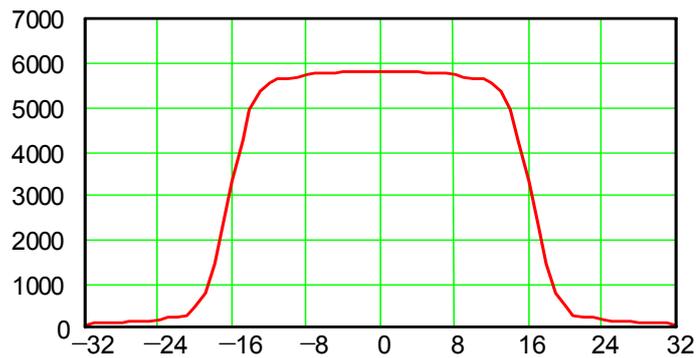


Рис.Д.3 Центральное сечение двумерной свертки исходной ДН с моделью Солнца

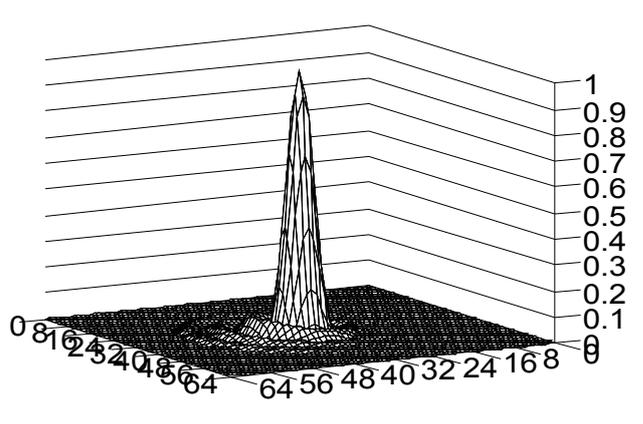


Рис. Д.4. Трехмерное нормированное изображение искаженной ДН

Этот рисунок демонстрирует существенное искажение изображения Солнца, которое трудно учесть при восстановлении активных образований на солнечном диске. Расчет дисперсии свертки для первого варианта асимметрии ДН показал увеличение её относительно симметричного случая на 1%, для второго – на 9% и для третьего – на 61%.

Первый вариант даёт незначительное искажение двумерной свертки и искажение формы центрального скана. Второй вариант оказывается с заметными искажениями. Эти расчеты показывают, что допустимые искажения ДН не должны превышать 2дБ отклонения уровня первых боковых лепестков от их расчетного значения.

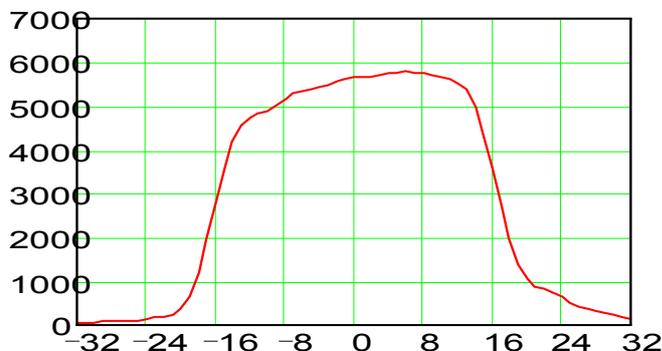


Рис. Д.5 Центральное сечение двумерной свертки искаженной ДН с моделью Солнца