

**Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского**

**Национальный исследовательский университет**

**Учебно-научный и инновационный комплекс**

**«Физические основы информационно-телекоммуникационных систем»**

**Основная образовательная программа**

011800 «Радиофизика»,

квалификация (степень) магистр

**Учебно-методический комплекс по дисциплине**

«Основы теории антенн»

**Основная образовательная программа**

090302 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем»,

квалификация (степень) специалист

**Учебно-методический комплекс по дисциплине**

«Антенны и распространение радиоволн»

**Гавриленко В.Г., Калинин А.В.**

## **МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНН ПО СИГНАЛАМ ВНЕЗЕМНЫХ РАДИОИСТОЧНИКОВ**

Электронное учебно-методическое пособие

Мероприятие 1.2. Совершенствование образовательных технологий, укрепление материально-технической базы учебного процесса

Нижний Новгород

2012

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНН ПО СИГНАЛАМ ВНЕЗЕМНЫХ РАДИОИСТОЧНИКОВ. Гавриленко В.Г., Калинин А.В. Электронное учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2012. – 58 с.

Данное учебно-методическое пособие посвящено изучению и практическому применению методов экспериментального исследования характеристик антенн СВЧ с использованием сигналов естественных и искусственных внеземных источников радиоизлучения. В теоретической части приведены определения основных радиотехнических характеристик антенн, описание конструкций антенн зеркального типа, используемых в радиосвязи, радиолокации и радиоастрономии, а также методики измерений по внеземным источникам радиосигнала. Рассмотрены также методики измерений по относительно мощным сигналам ИСЗ. Практическая часть содержит описание экспериментальной установки для приема сигналов естественных и искусственных внеземных радиоисточников на базе полноповоротной параболической антенны с зеркалом 2,5 метра и задания на проведение экспериментов по исследованию характеристик этой антенны в СВЧ диапазоне.

Электронное учебно-методическое пособие предназначено для студентов ННГУ, обучающихся по направлениям подготовки 010800 «Радиофизика», изучающих курс «Основы теории антенн», и по направлению подготовки 090302 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», изучающих курс «Антенны и распространение радиоволн».

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ОСНОВНЫЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕНН.....	8
2. ЗЕРКАЛЬНЫЕ АНТЕННЫ. СХЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ И ОСНОВЫ ТЕОРИИ.....	16
3. ОБЗОР МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНН ПО ВНЕЗЕМНЫМ РАДИОИСТОЧНИКАМ.....	23
4 МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ, ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ И ШУМОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ АНТЕННЫ .....	32
5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПРИЕМА И ИЗМЕРЕНИЯ СИГНАЛОВ ВНЕЗЕМНЫХ РАДИОИСТОЧНИКОВ НА БАЗЕ ПОЛНОПОВОРОТНОЙ ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ С ЗЕРКАЛОМ 2,5 МЕТРА.....	48
6. ЗАДАНИЯ НА ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ В ЧАСТОТНЫХ ДИАПАЗОНАХ 4 ГГЦ И 11 ГГЦ ПО СИГНАЛАМ ИСЗ И ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОИСТОЧНИКОВ.....	51
СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	53
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК ПО АНТЕННОЙ ТЕМАТИКЕ.....	54

## ВВЕДЕНИЕ.

Антенной (от латинского antenna –мачта, рея) называется преобразователь волновых полей, устройство, осуществляющее излучение волн, поступающих к антенне от передатчика (так называемая передающая антенна), либо устройство, преобразующее падающее излучение и направляющее его по линии передачи к приемнику (приемная антенна).

В данной работе рассматриваются радиоантенны, т.е. преобразователи электромагнитных волн радиодиапазона, с длинами волн от сотен километров до долей миллиметров. Такой широкий диапазон длин радиоволн обуславливает значительное разнообразие типов и конструкций антенн, а также многообразие областей их применения.

В диапазонах метровых и дециметровых волн (т.н. ДВ, СВ, КВ и УКВ диапазоны) широко используются вибраторные антенны и их совокупности – антенные решетки и поля. Примером таких антенн являются телевизионные антенны для приема сигналов городских телецентров. Схема антенны такого типа антенн показана на рисунке 1. Примером антенного поля из вибраторов может служить приемо-передающая антенна стенда «Сура», расположенная на полигоне «Васильсурск» ФГБНУ НИРФИ, фотография которой представлена на рисунке 2. У вибраторных антенн одни элементы-вибраторы выполняют функцию создания поля излучения, другие – формируют направленные свойства, т.н. диаграмму направленности.

Рис.1. Телевизионная антенна типа «волновой канал».

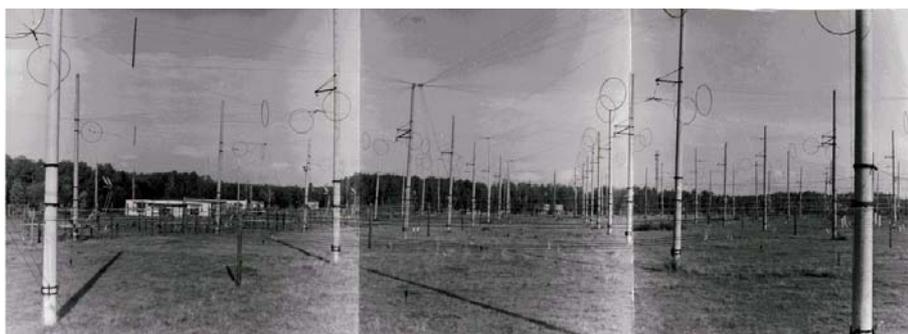
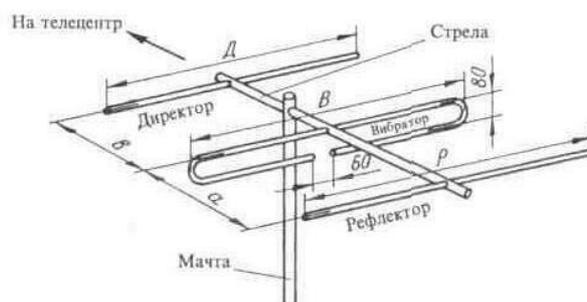


Рис.2. Приемо-передающая антенна стенда «Сура», размер  $300 \times 300 \text{ м}^2$ , полоса частот 4,3 ...9,5 МГц

В антеннах сантиметровых и миллиметровых волн (т.н. СВЧ и КВЧ диапазоны радиоволн) поле излучения также создается вибраторами, а диаграмма направленности формируется суперпозицией поля излучателя и поля, рассеянного на различных структурах – зеркале, линзе, щели, раскрыве рупора и т.п. Соответствующие типы антенн называются зеркальными, линзовыми, щелевыми, рупорными, рупорно-зеркальными, волноводно-щелевыми и т.д. Пример рупорной антенны показан на рисунке 3, а на рисунке 4 представлена фотография одной из крупнейших антенн с неподвижным сферическим зеркалом диаметром 305 метров, выложенным в кратере потухшего вулкана.



Рис.3. Рупорная измерительная антенна П6-23, диапазон рабочих частот 0,85...17,44 ГГц.

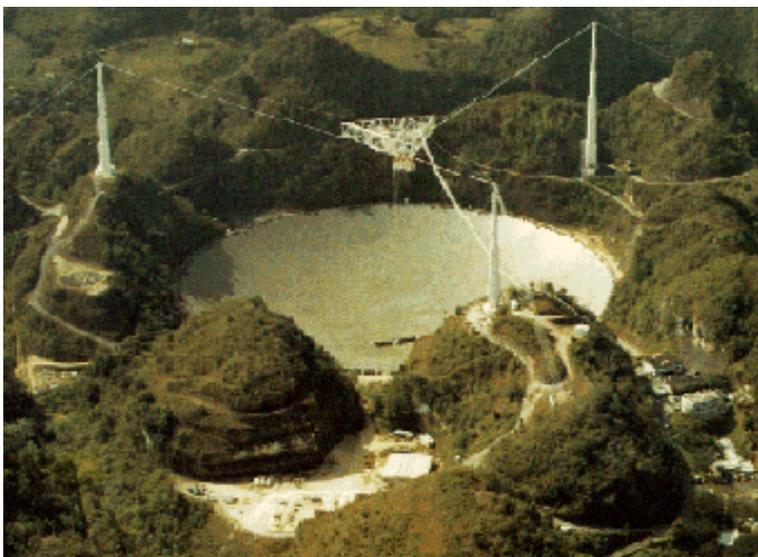


Рис.4. 305-метровая зеркальная сферическая антенна в Аресибо (Пуэрто-Рико), рабочая длина волны до 6 см.

При разработке и эксплуатации антенн возникает необходимость экспериментального определения их радиотехнических характеристик с целью проверки соответствия их расчетным значениям и, по-возможности, их улучшения. Для этого были разработаны соответствующие способы измерения характеристик антенн в ближней, промежуточной и дальней зонах, см., например, [1-3]

Зеркальные антенны являются одним из наиболее распространенных типов антенн, широко используемым в радиосвязи, радиолокации, радиоастрономии и многих других областях. Особенности измерения их характеристик обусловлены большими электрическими размерами этих антенн (большими значениями



Рис. 5. 70-метровая зеркальная полноповоротная параболическая антенна центра космической связи «Усурийск», Россия.

отношения размеров зеркал к длине волны) в отличие от, например, рупорных. Для зеркальных СВЧ антенн средних и крупных размеров с зеркалами от единиц до нескольких десятков метров, как правило, невозможно реализовать измерения по наземному генератору сигналов в дальней зоне. Поэтому для таких антенн были разработаны и успешно применяются до настоящего времени так называемые радиоастрономические способы измерений по сигналам внеземных радиоисточников, заведомо находящихся в дальней зоне любой наземной антенны.

В разработку радиоастрономических методов антенных измерений по естественным внеземным радиоисточникам значительный вклад внесли сотрудники известной Горьковской научной школы прикладных методов радиоастрономии, основателем которой были член-корреспондент АН СССР В.С. Троицкий и его ученики [4,5]. В последние годы для антенных измерений стало возможным использовать также гораздо более мощные сигналы передатчиков, установленных на космических аппаратах. В частности, подавляющее большинство так называемых радиоголографических измерений характеристик зеркальных антенн выполняются по сигналам геостационарных искусственных спутников Земли (ИСЗ) [6].

В данном учебно-методическом пособии изложены основы радиоастрономических методов измерения характеристик СВЧ антенн по внеземным радиоисточникам. Рассмотрены также наиболее современные методы таких измерений - корреляционный и радиоголографический.

Приведено описание созданной на кафедре распространения радиоволн и радиоастрономии по программе Национального исследовательского университета

экспериментальной установки для приема сигналов естественных и искусственных внеземных радиоисточников на базе полноповоротной параболической антенны с зеркалом 2,5 метра. В практической части пособия сформулированы задания на проведение экспериментов по исследованию характеристик этой антенны в частотных диапазонах 4 ГГц и 11 ГГц по сигналам естественных радиоисточников и геостационарных ИСЗ.

# 1. ОСНОВНЫЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕНН

Основные характеристики антенн – диаграмма направленности, коэффициент усиления и другие, определяются в дальней зоне. Напомним кратко основные свойства полей излучателей в дальней зоне.

## Поле излучающих систем в дальней зоне и диаграмма направленности.

Как известно (см., например [7]) векторный потенциал и поле, создаваемое в свободном пространстве гармоническими токами, сосредоточенными в объеме  $V$  (рис.6) , определяются соотношениями:

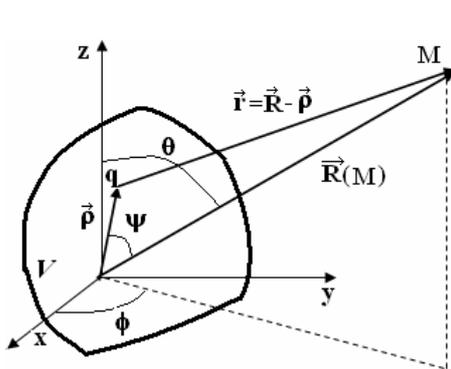


Рис. 6. Система координат.

$$\vec{A} ( R , \theta , \varphi ) = \frac{1}{4 \pi} \int_V \vec{J} \frac{e^{-ikr}}{r} dV \quad (1)$$

$$\vec{E} = \frac{1}{i\omega\epsilon_0} \text{grad div} \vec{A} - i\omega\mu_0 \vec{A}$$

$$\vec{H} = \text{rot} \vec{A}$$

где  $r = \sqrt{R^2 + \rho^2 - 2R\rho \cos\psi}$  , и при  $R > \rho$

$$r \approx R \left( 1 - \frac{\rho}{R} \cos\psi + \frac{\rho^2}{2R^2} (1 - \cos^2\psi) + \dots \right) \quad (2)$$

По мере удаления от излучателя пространство принято делить на три области – ближнюю, промежуточную и дальнюю зоны. На малых расстояниях от излучателя (в ближней зоне) для расчета поля по (1) используется точное выражение для  $r$ . В промежуточной зоне при  $r \sim D^2/\lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны,  $D$  – линейный размер излучателя, расстояние  $r$  в знаменателе подынтегрального выражения (1) принимается равным  $R$ , а в показателе экспоненты используется разложение (2), учитывающие только первые три члена. Для расчета полей в дальней зоне в показателе экспоненты (1) ограничиваются первыми двумя членами разложения (2).

В соответствии с этим можно определить границу дальней зоны. Для того чтобы использовать указанные приближения для  $r$  необходимо, чтобы возникающая при этом фазовая ошибка была мала по сравнению с  $2\pi$ . Разность между точным значением набега фазы и приближением, используемым в дальней зоне, составляет

$$k \left\{ \sqrt{R^2 + \rho^2 - 2R\rho \cos\psi} - (R - \rho \cos\psi) \right\} \cong \frac{k\rho^2 \sin^2\psi}{2R} \quad (3)$$

Следовательно, необходимо выполнение условия

$$\frac{k\rho^2 \sin^2\psi}{2R} < \frac{kD^2}{8R} \ll 2\pi \quad (4)$$

Принято считать допустимой максимальную фазовую ошибку на краю излучателя, равную  $\pi/8$ . Откуда следует условие дальней зоны

$$\frac{kD^2}{8R} \leq \pi/8, \quad \text{или} \quad R \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (5)$$

В дальней зоне векторный потенциал можно записать в виде

$$\vec{A}(\mathbf{R}, \theta, \varphi) = \frac{1}{4\pi} \frac{e^{-ikR}}{R} \int_V \vec{J} e^{-ik\rho \cos\psi} dV \equiv \frac{1}{4\pi} \frac{e^{-ikR}}{R} \vec{F}(\theta, \varphi) \quad (6)$$

А поле в сферической системе координат, с учетом  $R \gg \lambda$ , пренебрегая членами с зависимостями  $1/R^2$ ,  $1/R^3$  и т.д., можно представить в виде

$$\vec{E} = \frac{1}{i2\lambda} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \frac{e^{-ikR}}{R} (\mathbf{F}_\theta \vec{i}_\theta + \mathbf{F}_\varphi \vec{i}_\varphi), \quad \vec{H} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} [\vec{i}_R \vec{E}] = \frac{1}{i2\lambda} [\vec{i}_R \vec{F}] \frac{e^{-ikR}}{R} \quad (7)$$

Основные свойства поля в дальней зоне заключаются в следующем:

- вектора  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  имеют лишь поперечные компоненты, составляющие вдоль направления распространения пренебрежимо малы;
- в общем случае вектора  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  имеют обе поперечные компоненты ( $E_\theta$  и  $E_\varphi$ ,  $H_\theta$  и  $H_\varphi$ ) с возможным сдвигом фаз между ними – поле имеет эллиптическую поляризацию;
- компоненты  $E_\theta$  и  $H_\varphi$ ;  $H_\theta$  и  $E_\varphi$  колеблются в фазе и их отношение равно волновому сопротивлению среды  $\mathbf{E}_\theta / \mathbf{H}_\varphi = -\mathbf{E}_\varphi / \mathbf{H}_\theta = \sqrt{\mu_0 / \varepsilon_0}$ , – поле в окрестности точки наблюдения носит характер плоской электромагнитной волны;
- зависимость поля от расстояния  $R$  имеет вид расходящейся сферической волны;
- зависимость компонент поля от углов не зависит от расстояния и характеризуется **диаграммой направленности** излучателя  $F_\theta$ ,  $F_\varphi$ .

Таким образом, диаграмма направленности (ДН), важнейшая характеристика антенны, описывает угловую зависимость поля антенны в дальней зоне.

Различают диаграммы направленности на отдельных поляризациях  $F_\theta(\theta, \varphi)$ ,  $F_\varphi(\theta, \varphi)$  и диаграмму направленности по мощности  $F(\theta, \varphi) = |F_\theta(\theta, \varphi)|^2 + |F_\varphi(\theta, \varphi)|^2$

Часто используют нормированные диаграммы направленности  $F_\theta(\theta, \varphi)/F_{\theta max}$  и  $f(\theta, \varphi) = (|F_\theta(\theta, \varphi)|^2 + |F_\varphi(\theta, \varphi)|^2) / (|F_\theta|^2 + |F_\varphi|^2)_{max}$ .

Широко применяется представление диаграммы направленности в логарифмическом виде  $f(\theta, \varphi)[дБ] = 10 \log((|F_\theta(\theta, \varphi)|^2 + |F_\varphi(\theta, \varphi)|^2) / (|F_\theta|^2 + |F_\varphi|^2)_{max})$ , или  $f(\theta, \varphi)[дБ] = 20 \log(|F_\theta(\theta, \varphi)| / |F_\theta(\theta, \varphi)|_{max})$ .

Иногда используют представление диаграммы направленности в виде отдельных зависимостей амплитуды, фазы и поляризации поля от угловых координат в виде

$$\vec{F}(\theta, \varphi) = \sqrt{|\vec{F}(\theta, \varphi)|^2} \vec{p}(\theta, \varphi) \exp(i\Phi(\theta, \varphi)) \quad (8)$$

В этом случае зависимость  $\sqrt{|\vec{F}(\theta, \varphi)|^2}$  называют амплитудной диаграммой направленности, а  $\Phi(\theta, \varphi)$  – фазовой. Характеристика  $\vec{p}(\theta, \varphi)$  описывает зависимость поляризации поля от углов и может быть представлена в виде

$$\vec{p}(\theta, \varphi) = \vec{i}_\theta p_\theta(\theta, \varphi) + \vec{i}_\varphi p_\varphi(\theta, \varphi), \quad |p_\theta|^2 + |p_\varphi|^2 = 1 \quad (9)$$

На практике для описания поляризационных свойств антенн вместо базиса  $(\vec{i}_\theta, \vec{i}_\varphi)$  обычно используется базис из двух взаимно ортогональных единичных векторов  $(\vec{i}_{zл}, \vec{i}_{нар})$ , соответствующих так называемым главной (или основной) и паразитной (или кроссполяризационной) составляющей излучения. Главной поляризацией, в общем случае эллиптической, называется поляризация, на которую спроектирована антенна. Обычно она соответствует поляризации излучения в максимуме ДН. При этом паразитной является поляризация, ортогональная основной.

Фазовая ДН  $\Phi(\theta, \varphi)$ , в отличие от амплитудной, зависит от положения начала системы координат и характеризует изменение фазового сдвига компоненты основной поляризации при перемещении точки наблюдения по поверхности сферы радиуса  $R$ . Простейшей фазовой характеристикой является постоянная функция с точностью до скачков на  $\pi$  при переходе через ноль амплитудной характеристики:  $\Phi(\theta, \varphi) = Const \pm \pi \times n$ . В этом случае говорят, что антенна имеет фазовый центр, совпадающий с началом системы координат.

Двумерные зависимости амплитудной и фазовой ДН представляют в виде изометрических проекций, линий равного уровня, или, особенно в последнее время, в виде цветных карт. На рисунках 7–10 показаны примеры расчетных и измеренных двумерных ДН различных антенн.

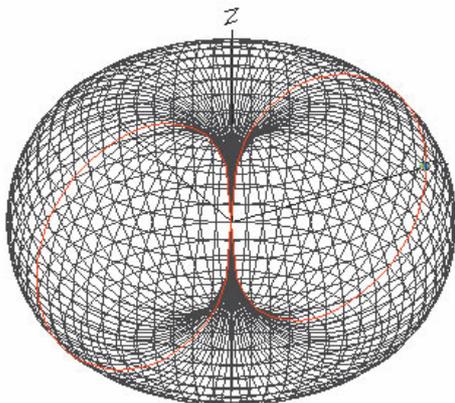


Рис. 7. Амплитудная ДН элементарного диполя (теория).

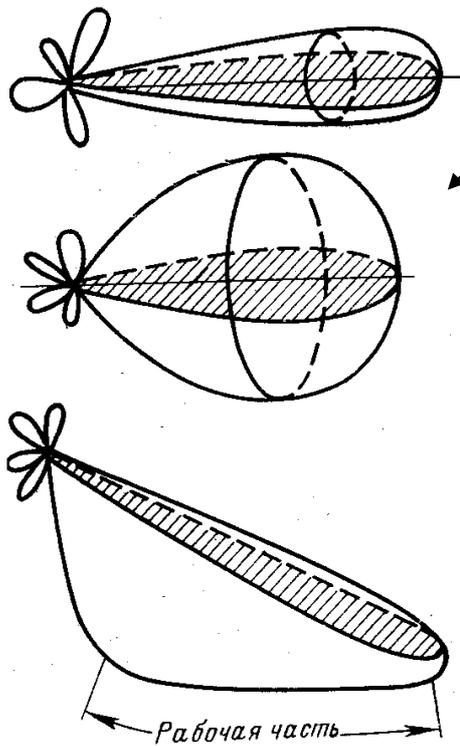


Рис. 8. Разные типы амплитудных ДН – игольчатая, веерная, косекансная (теория).

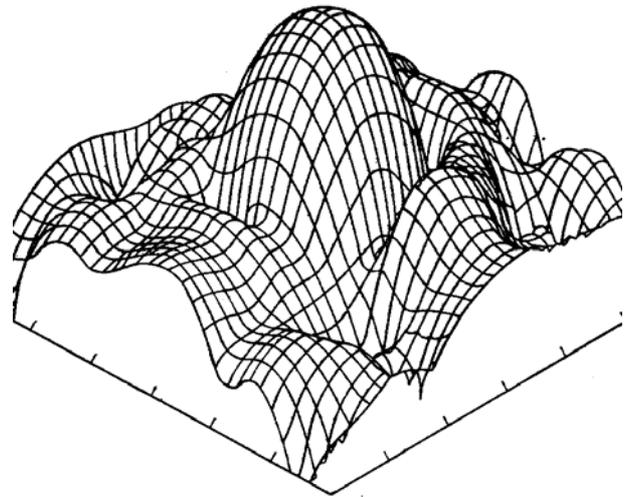


Рис. 9. Амплитудная ДН 7-метровой зеркальной антенны на частоте 540 МГц в секторе углов около  $\pm 15^\circ \times \pm 15^\circ$  (эксперимент).

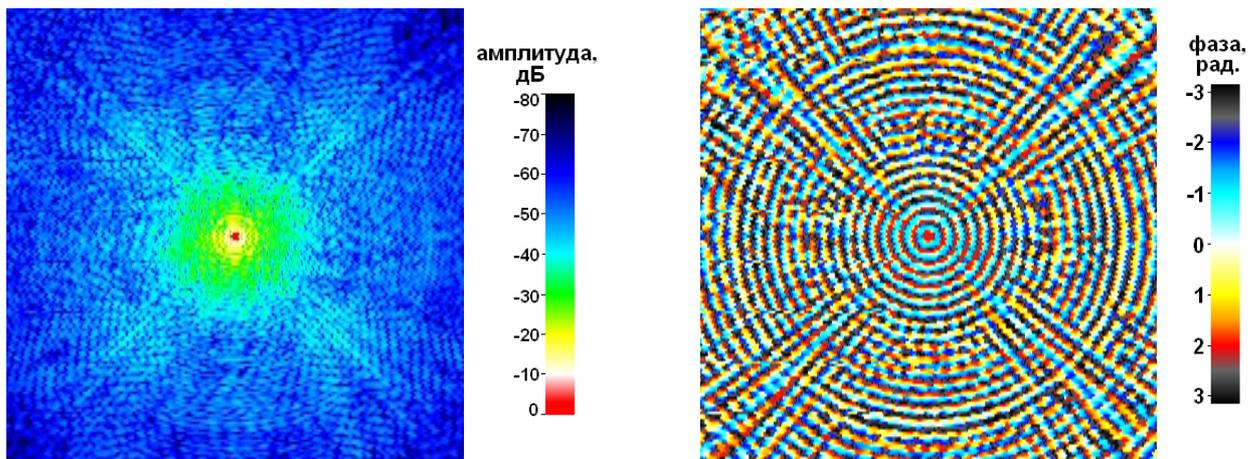


Рис. 10. Амплитудная (слева) и фазовая (справа) ДН 70-метровой зеркальной антенны на частоте 4 ГГц в секторе углов  $\pm 4^\circ \times \pm 4^\circ$  (эксперимент).

Как видно на рисунках, в ДН реальных антенн выделяется один глобальный максимум (т.н. главный лепесток, или луч ДН) и множество локальных максимумов – боковых лепестков.

Основными параметрами, описывающими ДН антенны, являются: положение (угловое направление) главного максимума в используемой системе координат, его ширина на определенном уровне (как правило, на уровне половинной мощности относительно максимума), положения и уровни первых боковых лепестков.

Поскольку измерение двумерных распределений поля антенны является весьма непростой задачей, обычно диаграмму направленности характеризуют двумя сечениями в ортогональных плоскостях, проходящих через главный максимум. На рисунках 11 – 13 показаны примеры сечений ДН разных антенн.

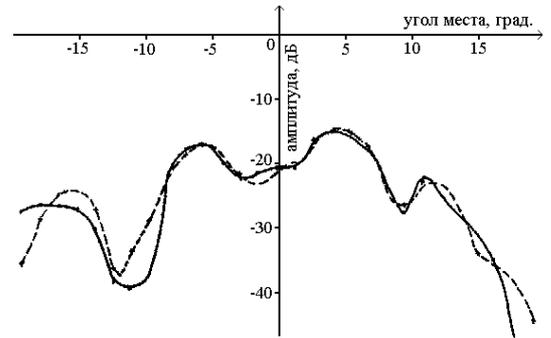
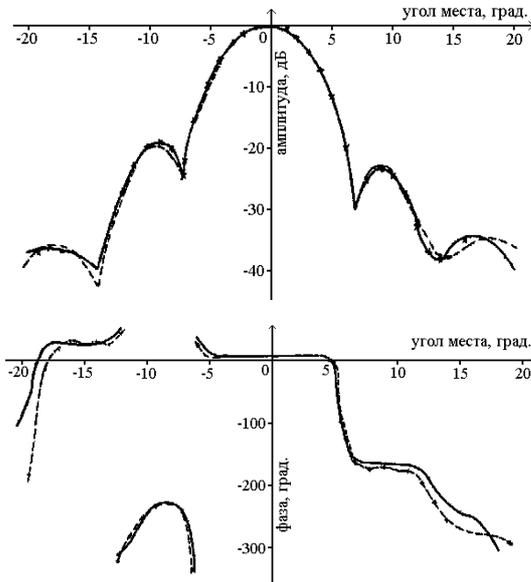


Рис. 11. Слева сечения амплитудной и фазовой ДН 7-метровой зеркальной антенны на частоте 540 МГц на основной поляризации, справа сечение ДН этой же антенны на ортогональной поляризации (эксперимент). На каждом графике показано по две реализации.

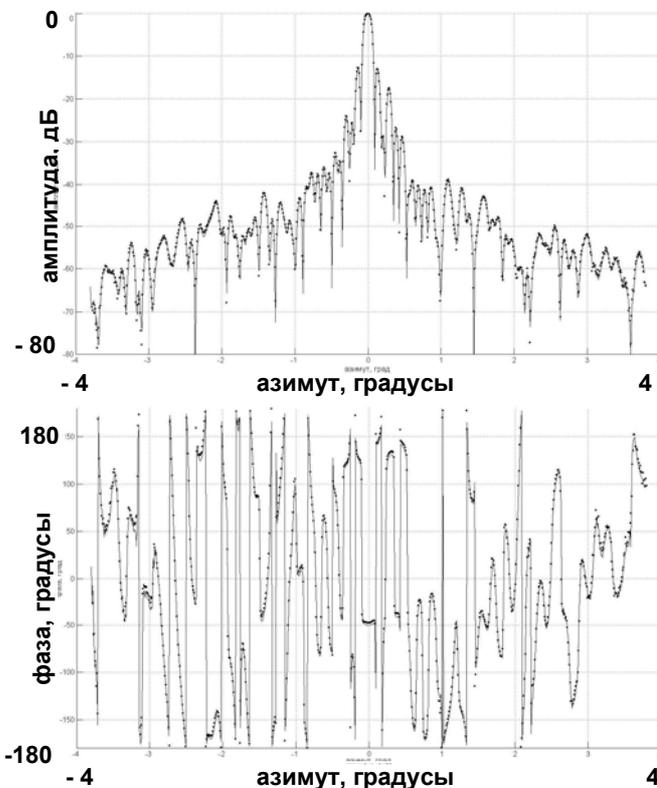


Рис. 12. Сечения амплитудной и фазовой ДН 70-метровой зеркальной антенны на частоте 4 ГГц на основной поляризации (эксперимент).

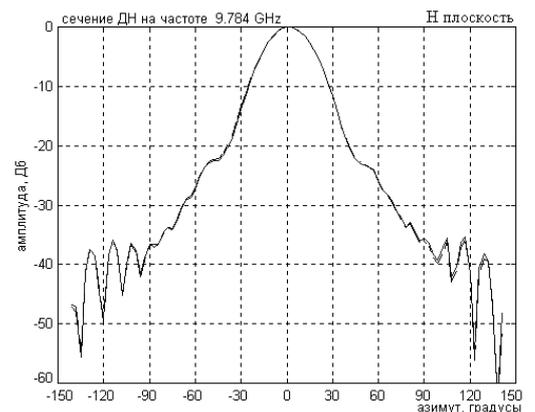


Рис. 13. Сечение амплитудной ДН рупорной антенны на частоте 10 ГГц на основной поляризации (эксперимент).

Энергетические параметры излучения антенн. Важными характеристиками антенны, связанными с диаграммой направленности, являются **коэффициент направленного действия** (КНД), **коэффициент усиления** (КУ) и **коэффициент рассеяния** (КР).

Коэффициентом направленного действия  $D(\theta, \varphi)$  называется отношение мощности, излучаемой антенной в единицу телесного угла в некотором направлении, к средней мощности, излучаемой антенной по всем направлениям:

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{\frac{P_{\Sigma}}{4\pi}} \quad (10)$$

КНД может быть определен по ДН антенны по мощности:

$$D(\theta, \varphi) = \frac{4\pi P(\theta, \varphi)}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} P(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi} = \frac{4\pi f(\theta, \varphi)}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} f(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi} \quad (11)$$

Как правило, в качестве характеристики антенны используют максимальное значение КНД:

$$D_{\max} = \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} f(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi} \quad (12)$$

При этом угловая зависимость КНД восстанавливается очевидным образом:

$$D(\theta, \varphi) = D_{\max} \times f(\theta, \varphi) \quad (13)$$

Поскольку определение ДН антенны во всем пространстве практически невозможно, иногда используют в качестве характеристики антенны КНД, рассчитанный по главному лепестку:

$$D_{\Omega_{gl}} = 4\pi / \int_{\Omega_{gl}} f(\theta, \varphi) d\Omega \quad (14)$$

где  $\Omega_{gl}$  – угловой сектор, занимаемый главным лепестком ДН.

Значения КНД у разных антенн составляет от 1,5 для элементарного диполя, 1,64 для полуволнового вибратора и до величин порядка  $10^8$  для больших зеркальных антенн миллиметрового диапазона.

Коэффициент усиления  $G(\theta, \varphi)$  учитывает потери в антенне, характеризуемые коэффициентом полезного действия (КПД)  $\eta = P_u/P_{ex}$  – отношением излучаемой мощности  $P_u$  к мощности, подводимой к антенне  $P_{ex}$ . По определению КУ показывает, во сколько раз должна быть увеличена входная мощность при замене реальной направленной антенны с потерями на ненаправленную антенну без потерь при

условии сохранения неизменной величины плотности потока мощности в данном направлении.

КНД, КУ и КПД антенны связаны соотношением:

$$G(\theta, \varphi) = \eta \times D(\theta, \varphi) \quad (15)$$

Иногда усиление антенны характеризуется таким параметром как *эффективная площадь*  $S_{эфф}$ . Эффективная площадь антенны связана с КНД соотношением:

$$S_{эфф} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \times D \quad (16)$$

Коэффициент рассеяния  $\beta_{\Omega}$  определяется как доля мощности, излучаемая антенной вне заданного телесного угла  $\Omega$ :

$$\beta_{\Omega} = \frac{\int_{\Omega} f(\theta, \varphi) d\Omega}{\int_{4\pi} f(\theta, \varphi) d\Omega} \quad (17)$$

Соответственно, доля мощности, излучаемая внутрь телесного угла  $\Omega$ , записывается как:

$$1 - \beta_{\Omega} = \frac{\int_{\Omega} f(\theta, \varphi) d\Omega}{\int_{4\pi} f(\theta, \varphi) d\Omega} \quad (18)$$

Например, КР вне главного лепестка ДН  $\beta_{зл}$  определяет долю мощности излучения антенны, приходящуюся на все боковые и задние лепестки ДН. Если каким-либо способом удастся измерить ДН в пределах главного лепестка и КР вне его (см., например, [2]), то КНД антенны может быть вычислен как:

$$D = D_{зл} (1 - \beta_{зл}) \quad (19)$$

где  $D_{зл}$  определяется (14).

Важнейшей характеристикой антенны является её *шумовая температура*. Шумовая температура приемной антенны  $T_{ш}$  вводится соотношением

$$kT_{ш}\Delta f = P_{шa} \quad (20)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $\Delta f$  – полоса частот приемника,  $P_{шa}$  – мощность шумов на выходе антенны при отсутствии полезного сигнала.

Шумовая температура антенны обусловлена как собственными шумами антенны  $T_{ш вн}$ , так внешними шумами  $T_{ш внеш}$ , вызванными радиоизлучением земли, атмосферы и окружающего пространства

$$T_{ш} = T_{ш вн} + \eta T_{ш внеш}; \quad T_{ш вн} = (1 - \eta) T_0, \quad (21)$$

где  $T_0$  – температура материала антенны.

Шумовая температура антенны вместе с шумовой температурой входных блоков приемника определяют чувствительность приемной системы.

Важными характеристиками антенны являются также рабочая полоса частот, средний уровень боковых лепестков ДН, сопротивление излучения, предельная величина излучаемой мощности и др.

На основании теоремы взаимности можно показать, что угловая и пространственная зависимость отклика приемной антенны на внешнее излучение совпадает с соответствующей зависимостью вектора Пойнтинга поля антенны при работе её на передачу. Вследствие этого все основные характеристики – ДН, КНД, КУ, КР,  $S_{эфф}$ , входной импеданс, КПД не изменяются (тождественны) при работе антенны в режиме приема и режиме передачи, и любая передающая антенна может использоваться в качестве приемной.

## 2. ЗЕРКАЛЬНЫЕ АНТЕННЫ. СХЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ И ОСНОВЫ ТЕОРИИ

Основным элементом зеркальной антенны является зеркало (либо несколько зеркал), собирающее приходящее от удаленного источника излучение в фокальную точку, в которой установлена слабонаправленная антенна, называемая облучателем<sup>1</sup>. ДН облучателя рассчитывается такой, чтобы собирать энергию со всего зеркала, но минимизировать прием излучения из окружающего пространства. При работе на передачу зеркало отражает сферическую волну, создаваемую облучателем, преобразуя её в плоский фазовый фронт, т.н. прожекторный луч, обеспечивающий высокую направленность в дальней зоне. Существуют зеркальные антенны различных типов с зеркалами разных форм [7,8]. Наиболее распространены зеркала в виде параболоида вращения.

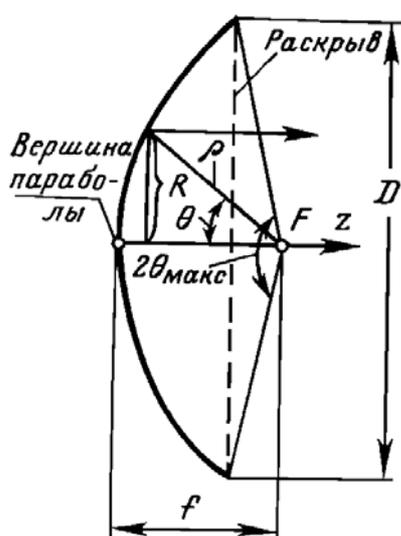


Рис. 14. Геометрия однозеркальной параболической антенны.

На рисунке 14 показана схема однозеркальной параболической антенны. Основные геометрические параметры такой антенны – диаметр зеркала  $D$  и его фокусное расстояние  $f$ . Поверхность зеркала описывается следующими уравнениями:

- в декартовой системе координат с началом в вершине параболоида и осью  $z$ , совпадающей с осью зеркала

$$x^2 + y^2 = 4fz \quad (22)$$

- в сферической системе координат с началом в фокусе параболоида

$$\rho = \frac{2f}{1 + \cos \theta} \quad (23)$$

Антенна характеризуется также углом раскрыва  $\theta_{\max}$ , под которым видно зеркало из фокуса

$$\operatorname{tg} \theta_{\max} = \frac{D}{2f(1 - D^2/16f^2)} \quad (24)$$

Различают **длиннофокусные** параболические антенны, у которых  $f > D/4$  и соответственно  $2\theta_{\max} < \pi$ , и **короткофокусные**, у которых  $f < D/4$  и  $2\theta_{\max} > \pi$ .

Важнейшее свойство параболической антенны заключается в том, что при расположении источника излучения в фокусе обеспечивается синфазность поля в раскрыве<sup>2</sup>. Нарушение синфазности возможно при смещении облучателя из фокуса, а

<sup>1</sup> Существуют также зеркала типа параболического цилиндра, собирающие падающее излучение на фокальной линии.

<sup>2</sup> Апертурный подход к описанию антенн рассмотрен ниже.

также при отклонении формы зеркала от расчетной. Требования к точности изготовления зеркал и установки облучателя (юстировки антенны) возрастают с уменьшением рабочей длины волны. Для оценки допустимых искажений поверхности зеркала используется соотношение [7,8]:

$$\sigma_3 \leq \frac{\lambda_{\min}}{16...20} \quad (25)$$

где  $\sigma_3$  – среднеквадратичная неровность зеркала,  $\lambda_{\min}$  – минимальная рабочая длина волны антенны.

Иногда для уменьшения затенения облучателем и удерживающими его конструкциями используют зеркала в виде несимметричной вырезки из параболоида вращения, рис. 15. Такие антенны называют офсетными (от английского off-set). Преимуществом офсетных антенн является также ослабление реакции зеркала на облучатель (отраженной волны в фидере) и в некоторых случаях уменьшение накапливания осадков (снега, льда) на нижнем краю зеркала. На рисунках 16 и 17 показаны примеры антенн офсетного типа.

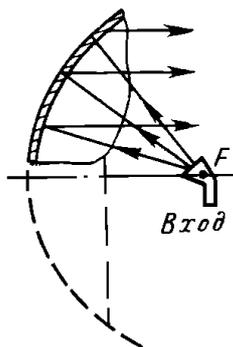


Рис. 15. Геометрия офсетной антенны.



Рис. 16. Приемная антенна спутникового телевидения Ku-диапазона (11ГГц).



Рис. 17. Новый 100-метровый радиотелескоп обсерватории Green Bank (США). Несимметричная вырезка 100м\*110м из 208- метрового параболоида. Рабочие частоты до 50 (100) ГГц.

Для обеспечения больших возможностей оптимизации характеристик зеркальные антенны строятся по двухзеркальным и многозеркальным схемам. Среди двухзеркальных наиболее распространенными являются так называемая система Грегори и система Кассегрена, изображенные на рисунке 18. В первом случае малое вспомогательное зеркало, называемое контррефлектором, имеет форму эллипсоида вращения, во втором – гиперboloида. Малые зеркала устанавливаются так, чтобы один из их фокусов совмещался с

фокусом параболоида, а второй находился вблизи вершины параболоида, где располагают облучатель антенны. Такая конструкция значительно облегчает доступ к облучателю, позволяя устанавливать приемники вблизи него, избегая потерь в линиях передач. Кроме того, двухзеркальные антенны имеют, как правило, меньшую шумовую температура за счет уменьшения прямого попадания радиоизлучения земли в облучатель.

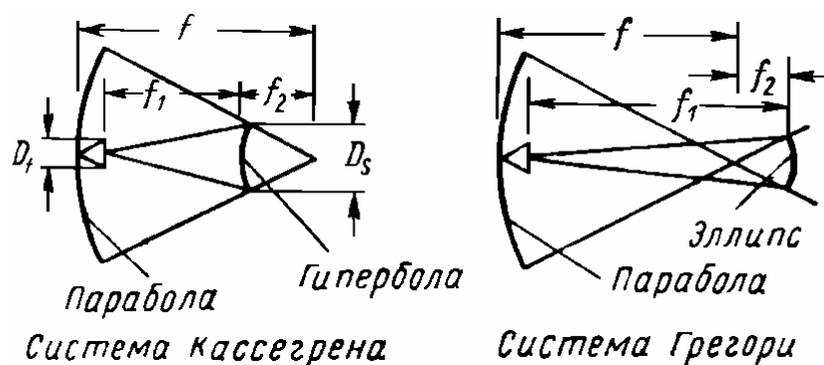


Рис. 18.Схемы построения двухзеркальных антенн.

У некоторых больших антенн зеркала изготавливают в форме квазипараболоида и квазиэллипсоида (квазигиперболоида). При этом для повышения усиления антенны формы обоих зеркал согласовано модифицируют таким образом, чтобы реализовать оптимальное распределение амплитуды поля в апертуре при сохранении его синфазности.

Обычно зеркальные антенны устанавливают на поворотном устройстве, позволяющем изменять их положение по угловым координатам. Наиболее распространенной является азимутально-угломестная монтировка антенны, обеспечивающая независимое вращение вокруг вертикальной оси – по азимуту и вокруг горизонтальной оси – по углу места. Антенны, предназначенные для работы с малоподвижными объектами, имеют ограниченные возможности вращения. Наземные полноповоротные антенны могут ориентироваться осью зеркала в любом направлении верхней полусферы.

На рисунках 5 и 19 – 23. представлены фотографии зеркальных антенн различного назначения.



Рис. 19. Приемная двухзеркальная антенна спутникового телевидения.



Рис. 20. 64-метровые полноповоротные антенны ТНА-1500, расположенные в центре космической связи «Медвежьи Озера» под Москвой и в г. Калязине, Тверской области. Первая построена по схеме Грегори, вторая – Кассегрена.

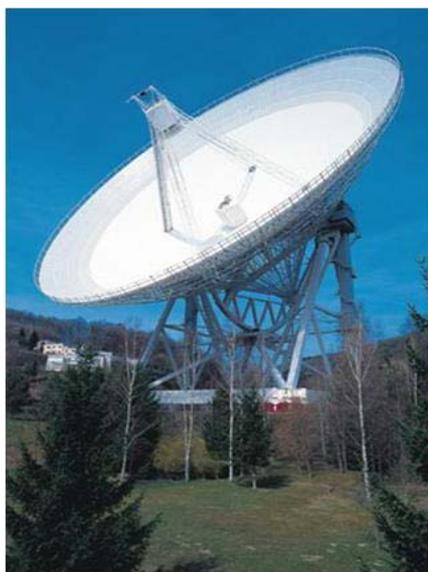


Рис. 21. 100-метровая полноповоротная зеркальная антенна в Эффельсберге, Германия.



Рис. 22. 30-метровая полноповоротная зеркальная антенна миллиметрового диапазона в Пико-Велета, Испания.

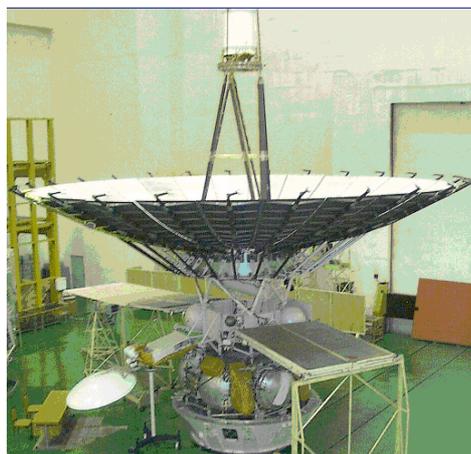


Рис. 23. 10-метровая складная космическая антенна проекта «Радиоастрон» во время наземных испытаний в НПО им. С.А.Лавочкина, г.Химки, Московской обл.

### Методы расчета параметров зеркальных антенн.

Как уже отмечалось, зеркальные антенны предназначены для работы в сантиметровом, миллиметровом и, отчасти, дециметровом диапазонах длин волн. Как правило, размеры и радиусы кривизны зеркал значительно превосходят длину волны. Поэтому для приближенного расчета (оценки) характеристик зеркальных антенн могут использоваться методы геометрической оптики.

Зеркальные антенны наряду с некоторыми другими типами антенн (рупорными, линзовыми, щелевыми и др.) относятся к классу апертурных, для расчета характеристик которых используется понятие *апертуры* (или *раскрыва*). Апертурой в общем случае называют ограниченный участок плоской поверхности вблизи антенны, через который проходит основная мощность её излучения. У зеркальной антенны под апертурой обычно понимают участок плоской поверхности, ограниченный кромкой основного зеркала.

При расчете характеристик антенн апертурным методом используется понятие эквивалентных электрических и магнитных поверхностных токов. Вместо реальных токов, индуцированных на зеркалах антенны, в качестве источников излучения рассматриваются эквивалентные токи на окружающей антенну замкнутой поверхности, частью которой является апертура. При этом токи вне границ апертуры полагаются равными нулю.

При альтернативном способе (т.н. токовый метод расчета) первоначально определяется распределение электрических токов на облучаемой поверхности основного зеркала, а вычисление излучаемых полей выполняется путем интегрирования по его криволинейной поверхности. Оба названных способа являются приближенными. Апертурный способ менее точен, но гораздо более прост в реализации. Остановимся на основных положениях апертурной теории зеркальных антенн [7].

Распределение поля в апертуре приближенно считается равным полю отраженной от зеркала первичной волны облучателя и находится методом геометрической оптики. Каждый элемент раскрыва представляет собой участок плоской неоднородной электромагнитной волны – так называемый элемент Гюйгенса, с известной характеристикой направленности. В идеально отъюстированной антенне распределение эквивалентных токов в апертуре считается синфазным, а их амплитуды задаются пропорциональными диаграмме направленности облучателя  $F(\theta, \varphi)$  и обратно пропорциональными расстоянию  $\rho$  от облучателя до соответствующей точки отражения на зеркале, определяемому в однозеркальной антенне соотношением (23).

В соответствии с теоремой перемножения диаграмма направленности системы идентичных элементарных излучателей представляет собой произведение векторной ДН одиночного элемента на скалярный множитель направленности системы, определяемый

расположением элементов в пространстве и распределением комплексных амплитуд токов по элементам.

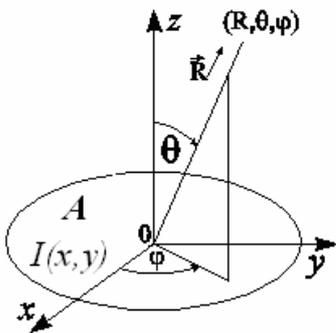


Рис. 24. Система координат в апертуре антенны.

Элементарный излучатель – элемент Гюйгенса, обладающий слабой направленностью, определяет поляризацию излучения антенны. Диаграмма направленности антенны формируется апертурным множителем:

$$F_{\Sigma}(\theta, \varphi) = \int_A I(x, y) \exp [ik \sin \theta (x \cos \varphi + y \sin \varphi)] dx dy, \quad (26)$$

где  $I(x, y) = |I(x, y)| e^{i\varphi(x, y)}$  – распределение комплексных амплитуд токов по апертуре.

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

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

Учитывая, что вне апертуры токи равны нулю и введя обозначения получаем, что диаграмма направленности связана с распределением поля в апертуре преобразованием Фурье

$$F_{\Sigma}(\theta, \varphi) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y) \exp [ik(\xi x + \eta y)] dx dy \quad (27)$$

Свойства преобразования Фурье хорошо изучены. Разработаны эффективные алгоритмы для вычислений. На основании этого могут быть достаточно легко рассчитаны характеристики антенн с различными распределениями поля в апертуре.

Например, для прямоугольного синфазного раскрыва с равномерным облучением диаграмма направленности получается в виде

$$F(\xi, \eta) = \frac{\sin(ka\xi/2)}{ka\xi/2} \times \frac{\sin(kb\eta/2)}{kb\eta/2}, \quad (28)$$

где  $a$  и  $b$  – размер раскрыва по координатам  $x$  и  $y$  соответственно.

Символьный вид такой ДН представлен на рисунке 25.

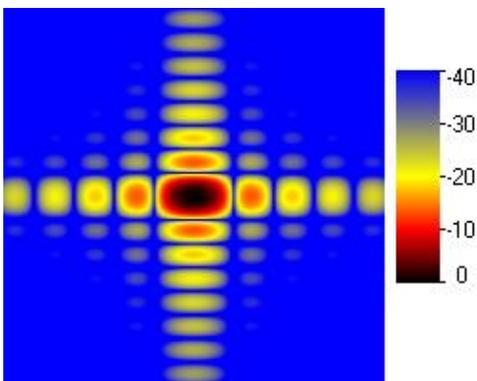


Рис. 25. ДН прямоугольного синфазного раскрыва с равномерным облучением.

Ширина главного лепестка по уровню половинной мощности в ортогональных плоскостях XOZ и YOZ составляет соответственно:

$$\Delta\theta_{0.5}^x = 51^\circ \lambda / a; \quad \Delta\theta_{0.5}^y = 51^\circ \lambda / b \quad (29)$$

Уровни первых боковых лепестков в этих плоскостях составляют -13,2 дБ.

При спадающих к краям распределения поля в апертуре ширина главного лепестка ДН увеличивается, а уровень первых боковых лепестков – понижается.

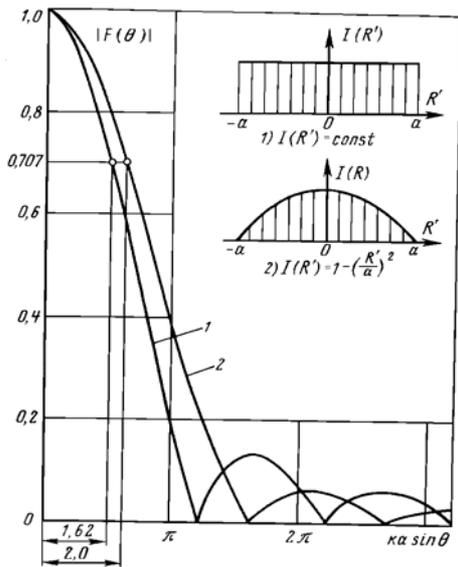


Рис. 26. ДН круглого синфазного раскрыва с равномерным и спадающим облучением.

Для круглой апертуры удобнее использовать полярную систему координат. При синфазном и не зависящем от угла распределении поля в апертуре ДН может быть выражена через функции Бесселя. Вид ДН такой антенны при равномерном, а также спадающем к краю амплитудных распределениях показан на рисунке 26.

Ширина главного лепестка представленных ДН составляет  $\Delta\theta_{0,5} = 59^\circ\lambda/D$  для равномерного и  $\Delta\theta_{0,5} = 73^\circ\lambda/D$  для спадающего облучения. Уровень первых боковых лепестков ДН составляет соответственно -17,6 дБ и -24,7 дБ

### 3. ОБЗОР МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНН ПО ВНЕЗЕМНЫМ РАДИОИСТОЧНИКАМ

#### Радиоастрономический метод измерения ДН, КУ и шумовой температуры.

Радиоастрономические методы антенных измерений, которым посвящено достаточное количество работ (например, [2,4,5]), позволяют экспериментально исследовать основные характеристики излучения антенн, такие как диаграмма направленности (ДН), точнее, её параметры - угловое положение главного максимума и его ширина, положение и уровни боковых лепестков, коэффициент усиления (КУ), а также шумовую температуру ( $T_{ш}$ ) и некоторые другие энергетические характеристики антенны.

Методы измерения ДН и КУ основаны на использовании естественных космических источников радиоизлучения в качестве «генераторов» сигнала. При измерении  $T_{ш}$  источники не используются, а принимаются меры для минимизации приема антенной излучения из окружающего пространства.

Поскольку все естественные внеземные радиоисточники находятся практически на бесконечном расстоянии от Земли (расстояние до т.н. дискретных источников измеряется тысячами и миллионами световых лет), то для антенны любых размеров заведомо обеспечивается условие дальней зоны, что весьма трудно реализовать при наземных измерениях, особенно для крупных антенн.

Излучение естественных радиоисточников, а также фоновое радиоизлучение неба и земли имеет шумовой характер и непрерывный спектр, что дает возможность экспериментально исследовать характеристики антенн непосредственно на их рабочих частотах.

Еще одно преимущество радиоастрономического метода заключается в том, что измерения могут выполняться на достаточно высоких углах места источника, при этом уменьшаются искажения, вносимые отражением от земли.

Основные недостатки радиоастрономических методов антенных измерений обусловлены относительной слабостью сигналов естественных радиоисточников. Для измерений приходится использовать специально разработанные приемники слабых шумовых сигналов - радиометры. При исследовании ДН динамический диапазон ограничен, в лучшем случае, уровнем первых боковых лепестков.

Поскольку излучение естественных радиоисточников, как правило, неполяризовано, «обычными» радиоастрономическими методами измеряется ДН по мощности, и не могут быть исследованы характеристики антенн на отдельных поляризациях. Кроме того, этими методами не измеряются фазовые характеристики антенны.

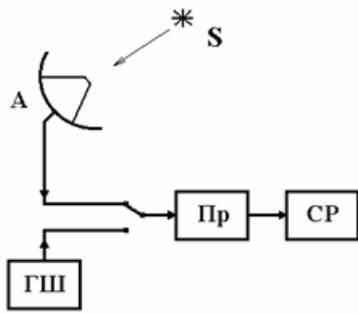


Рис.27.

На рисунке 27 представлена схема радиоастрономического метода измерения ДН и КУ антенны (А) по сигналам источника (S). Метод реализуется с использованием высокочувствительного приемника (Пр), измеряющего уровень мощности на выходе антенны, эталонного генератора шума (ГШ) и системы регистрации (СР). Методики измерений

отдельных характеристик антенн радиоастрономическим способом рассматриваются в разделе 4. Ниже приведены основные исходные соотношения [2].

Угловое распределение мощности излучения протяженных источников - неба, земли и т.п. - характеризуется яркостной температурой  $T_{я}$ , измеряемой в Кельвинах (К). Мощность сигналов от радиоисточников, ограниченных угловыми размерами, определяется плотностью потока  $S_{\nu}$ , измеряемой в Янских,  $1 \text{ Ян} = 10^{-26} \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{Гц})$

$$S_{\nu} = \frac{2k}{\lambda^2} \int_{\Omega_{и}} T_{я}(\theta, \varphi) d\Omega, \quad (30)$$

где  $S_{\nu}$  - спектральная плотность потока мощности на рабочей частоте,  $\Omega_{и}$  - телесный угол, занимаемый источником,  $T_{я}(\theta, \varphi)$  — распределение яркостной температуры по источнику,  $\lambda$  - длина волны,  $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Вт}/\text{град} \cdot \text{Гц}$  — постоянная Больцмана.

При наведении антенны максимумом ДН на радиоисточник с угловыми размерами, много меньшими ширины лепестка ДН («точечный» источник), и плотностью потока  $S_{\nu}$  на выходе антенны возникает приращение мощности сигнала, которое в радиоастрономии принято характеризовать изменением эквивалентной шумовой температуры антенны  $\Delta T_a$ :

$$\Delta T_a = \frac{\lambda^2}{8\pi k} S_{\nu} \cdot G \cdot e^{-\gamma_{и}}, \quad (31)$$

где  $G$  – КУ антенны в максимуме ДН. Множитель  $e^{-\gamma_{и}}$  характеризует поглощение радиоволн в атмосфере, существенное в диапазоне частот выше 3 ГГц.

Из (31) получаем соотношение для определения КУ антенны при измерениях по «точечному» радиоисточнику:

$$G = \frac{8\pi k}{\lambda^2} \frac{\Delta T_a}{S_{\nu}} \cdot e^{\gamma_{и}}. \quad (32)$$

Из соотношения (31) очевидно, что при смещении антенны от направления на выбранный точечный радиоисточник приращение антенной температуры изменяется пропорционально диаграмме направленности антенны по мощности.

Если угловые размеры источника сравнимы с шириной диаграммы направленности антенны, выражение (31) представляется в более общем виде:

$$\Delta T_a = \frac{1}{4\pi} \cdot G \cdot e^{-\gamma_n} \int_{\Omega_{ист}} F(\theta, \varphi) T_n(\theta, \varphi) d\Omega, \quad (33)$$

где  $F(\theta, \varphi)$  – нормированная диаграмма направленности антенны по мощности.

В частном случае равномерного распределения яркостной температуры по источнику соотношение (33) может быть записано в виде:

$$\Delta T_a = \frac{\lambda^2}{8\pi k} \cdot S_v G \cdot e^{-\gamma_n} \frac{\int F(\theta, \varphi) d\Omega}{\Omega_{ист}} \quad (34)$$

Нетрудно убедиться в том, что в последнем случае приращение мощности на выходе антенны будет несколько меньше, чем при приеме всего излучения источника с таким же потоком  $S_v$  через главный максимум ДН (при «точечном» источнике). В соответствии с (33) и (34) изменяются формулы для расчета КУ антенны при измерениях по радиоисточникам с конечными угловыми размерами. На практике отличие по сравнению с формулой (32) сводится к введению корректирующего множителя, рассчитываемого по известным угловым распределениям яркостной температуры источника и ДН антенны.

**Корреляционный радиоастрономический метод.** Блок-схема корреляционного метода измерения характеристик антенн показана на рисунке 28. Способ предусматривает использование расположенной рядом вспомогательной (опорной) антенны и

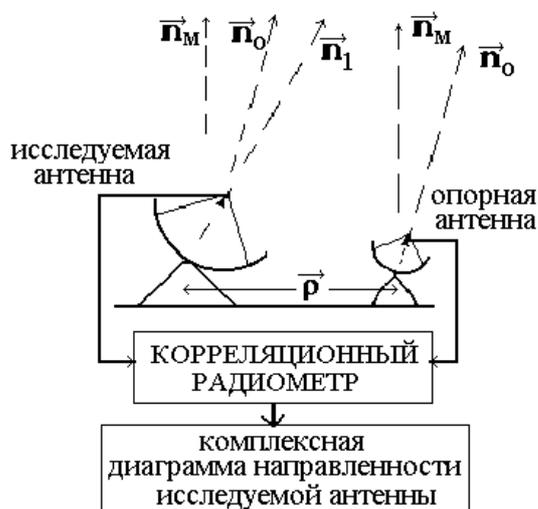


Рис.28.

двухканального корреляционного радиометра. Очевидно, что он сравнительно просто реализуется для исследования характеристик антенн, входящих в состав интерферометров. При измерениях производится перемещение (сканирование) ДН исследуемой антенны относительно выбранного внеземного радиоисточника. Опорная антенна постоянно направлена максимумом своей ДН на источник, в качестве которых используются естественные радиоисточники, а также ИСЗ.

Выходной сигнал представленного на рисунке 28 корреляционного интерферометра, принимающего излучение точечного радиоисточника, записывается в виде (см., [2,8]):

$$U = g \sqrt{G_1 G_2} F_1(\vec{n}_0 - \vec{n}_1) F_2(\vec{n}_0) S_0 \Delta\omega \Gamma(\tau) \quad (35),$$

где  $g$  – коэффициент пропорциональности, характеризующий усиление приемника;

$G_{1,2}$  – максимальные КУ исследуемой и опорной антенн;

$F_{1,2}(\vec{n})$  – ДН по напряжению исследуемой и опорной антенн;

$S_0$  – спектральная плотность потока радиоисточника;  
 $\Delta\omega$  – полоса частот приемных каналов до коррелятора;  
 $\vec{n}_0$  – направление на используемый радиоисточник;  
 $\vec{n}_1$  – направление главного максимума ДН исследуемой антенны;  
 $\Gamma(\tau)$  – временная корреляционная функция сигнала.

Если приемные каналы интерферометра имеют одинаковые полосы пропускания  $\omega = \omega_0 \pm \Delta\omega$  прямоугольной формы, то:

$$\Gamma(\tau) = \frac{\sin(\Delta\omega\tau)}{\Delta\omega\tau} \times \exp(i\omega_0\tau). \quad (36)$$

Очевидно, что для получения максимального сигнала на выходе приемника следует вводить в один из его каналов временную задержку, компенсирующую «геометрическую» задержку  $\tau_g = \vec{n}_0 \vec{\rho} / c$ , где  $\vec{\rho}$  – базовое расстояние между антеннами (см. рис 28).

Поскольку при измерениях источник перемещается относительно базовой линии интерферометра, вводимая аппаратная задержка должна быть переменной.

Из соотношения (35) видно, что выходной сигнал корреляционного радиометра пропорционален ДН по напряжению исследуемой антенны. При постоянном значении функции корреляции  $\Gamma(\tau)$  модуль сигнала  $U$  определяет амплитудную ДН, а фаза – фазовую диаграмму. Обычно корреляционный приемник регистрирует не амплитуду и фазу функции  $U$ , а ее квадратурные составляющие.

Известно, что с точки зрения обнаружения минимального сигнала корреляционный интерферометр не дает выигрыша по сравнению с одиночным радиотелескопом. Однако в антенных измерениях при одинаковом отношении сигнал/шум в максимуме ДН выигрыш в реализуемом динамическом диапазоне достигается за счет того, что выходной сигнал корреляционного радиометра пропорционален ДН по напряжению, а не по мощности. Так, например, в корреляционных измерениях уменьшение выходного сигнала приемника на 30 дБ соответствует изменению уровня ДН исследуемой антенны на 60 дБ, тогда как в традиционном радиоастрономическом методе – на 30 дБ. Корреляционный метод имеет преимущества при измерении уровней дальнего бокового излучения антенны. Для абсолютных измерений, например КУ, проще использовать обычный радиоастрономический способ.

Выигрыш при измерении боковых лепестков ДН обеспечивается, помимо чувствительности, тем, что в корреляционном методе существенно ослабляется влияние мешающих радиоисточников, а также распределенного фонового радиоизлучения.

Можно ввести угловую избирательность, как отношение выходных сигналов приемника от полезного и мешающего точечных источников одинаковой интенсивности [2, 9]. Для обычных радиоастрономических измерений:

$$I_p = \frac{|F_1(\vec{n}_o - \vec{n}_1)|^2}{|F_1(\vec{n}_m - \vec{n}_1)|^2} \quad (37)$$

$n_m$  - направление на мешающий источник (см. рис 28).

Для корреляционных измерений, в случае, когда разность хода скомпенсирована в направлении на полезный источник:

$$I_K = \frac{F_1(\vec{n}_o - \vec{n}_1) F_2(\vec{n}_o)}{F_1(\vec{n}_m - \vec{n}_1) F_2(\vec{n}_m - \vec{n}_o) \Gamma((\vec{n}_m - \vec{n}_o) \vec{\rho} / c)} \quad (38)$$

Из сравнения соотношений (37) и (38) видно, что угловая избирательность при корреляционных измерениях определяется параметрами ДН опорной антенны и корреляционной функции. Если ширина главного лепестка ДН опорной антенны меньше углового расстояния между источниками, корреляционный метод обеспечивает выигрыш в угловой избирательности по сравнению с обычными измерениями. Ширина главного лепестка корреляционной функции определяется произведением  $\Delta\varphi$ . Чем больше полоса частот приемника и базовое расстояние, тем меньше влияние мешающих источников.

Очевидно, что для измерений следует выбирать наиболее мощные источники, однако, при этом надо учитывать следующие обстоятельства. Для реального естественного радиоисточника с конечными угловыми размерами  $\Delta\vartheta$  выходной сигнал коррелятора принимает вид [2,9]:

$$U_{\Delta\vartheta} = \text{const} \times \int_{\Delta\vartheta} F_1(\vec{n} - \vec{n}_1) F_2(\vec{n}) S \Gamma(\tau) d\vartheta \quad (39)$$

Поскольку обычно при измерениях используются источники с угловыми размерами, меньшими, чем ширина лепестка диаграммы направленности антенны, то (39) можно записать как:

$$U_{\Delta\vartheta} = \text{const} \times F_1(\vec{n}_o - \vec{n}_1) F_2(\vec{n}_o) \times v(\vec{n}_o \vec{\rho} / \lambda), \quad (40)$$

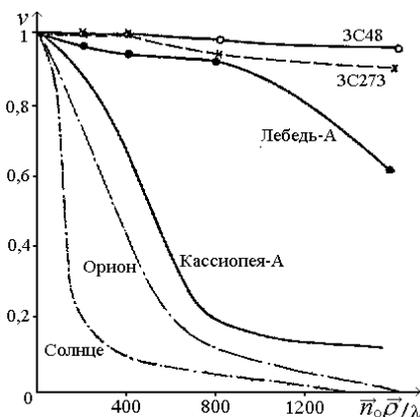


Рис. 29.

где  $v(\vec{n}_o \vec{\rho} / \lambda) = \int_{\Delta\vartheta} S(\vartheta) \Gamma(\tau(\vartheta)) d\vartheta$  – функция видности.

В результате конечные размеры источника приводят к уменьшению уровня выходного сигнала корреляционного приемника из-за осциллирующей зависимости функции  $\Gamma(\tau)$ . С учетом (40) следует выбирать источники для корреляционных антенных измерений. При измерениях по источнику с большими

угловыми размерами выбор места установки опорной антенны должен также проводиться с учетом соотношения (40). С точки зрения получения максимального сигнала следует устанавливать опорную антенну ближе к исследуемой таким образом, чтобы базовая линия имела наименьшую проекцию в направлении на источник. На рисунке 29 приведены зависимости функции видности от величины и ориентации линии базы для источников с разными угловыми размерами.

Таким образом, основные преимущества корреляционного радиоастрономического метода заключаются в возможности измерения дальних боковых лепестков ДН и измерения комплексной (амплитудной и фазовой) ДН антенны. Знание двумерного распределения комплексной ДН антенны дает возможность проведения радиоголографических исследований её характеристик.

Кроме того, корреляционный способ позволяет измерять ДН антенны на отдельных поляризациях по неполяризованному сигналу естественных радиоисточников за счет того, что ортогональные компоненты такого сигнала некоррелированы. Тип поляризации измеряемой ДН исследуемой антенны задается в этом случае поляризацией в главном максимуме ДН опорной антенны. Управляя соответствующим образом основной поляризацией опорной антенны, можно выполнять измерения ДН исследуемой антенны на её основной, либо ортогональной поляризациях.

Пример ДН, измеренных корреляционным методом, представлен на рисунке 11, где изображены сечения ДН семиметровой антенны на отдельных поляризациях, измеренные по радиоизлучению естественного радиоисточника. На рисунке 30 дополнительно приведен результат измерения корреляционным способом по радиоисточнику Лебедь-А амплитудной и фазовой ДН 25-метровой зеркальной антенны [11]

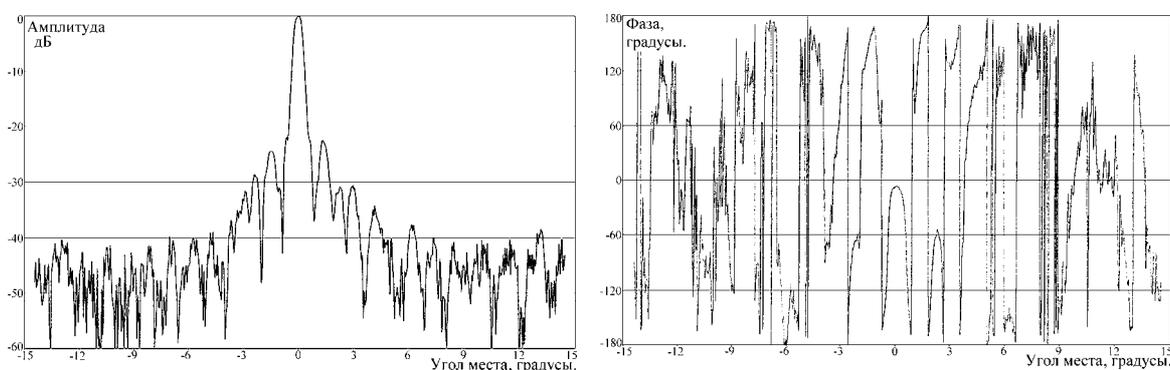


Рис.30.

Представленный результат демонстрирует, что динамический диапазон измерения ДН составил в данном случае около 45–50 дБ, что соответствует ожидаемому значению..

Следует отметить, что с использованием модуляционного радиометра на данной антенне удавалось измерить в лучшем случае уровень первого бокового лепестка ДН. Теоретическое значение динамического диапазона практически было не реализуемо из-за изменений уровня фона при сканировании, превышающих порог чувствительности радиометра.

**Радиолографический метод.** Блок-схема радиолографического способа измерения характеристик антенн показана на рисунке 31. Способ предусматривает использование вспомогательной (опорной) антенны и двухканального фазометрического приемника. При измерениях производится перемещение (сканирование) ДН исследуемой антенны относительно выбранного радиоисточника, опорная антенна постоянно направлена на этот источник максимумом своей ДН. Опорной антенной может служить расположенная рядом антенна на отдельном опорно-поворотном устройстве или небольшое зеркало, установленное на исследуемую антенну. В последнем случае угловой сектор измерений ограничен размерами главного лепестка ДН опорной антенны.

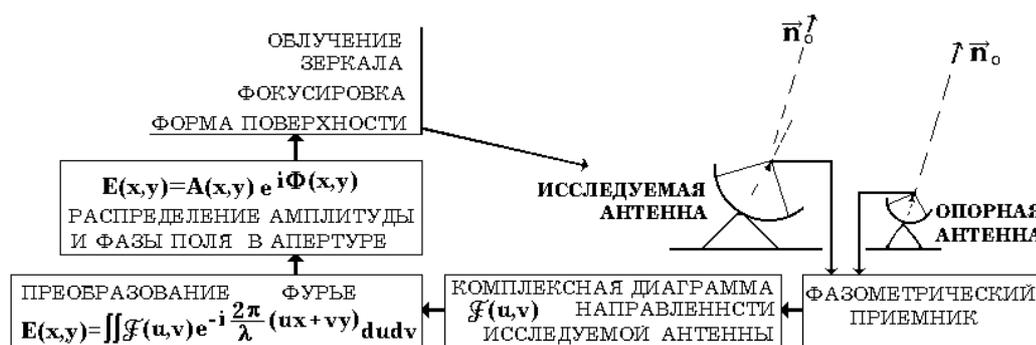


Рис. 31.

Источниками сигналов служат естественные радиоисточники, а также геостационарные ИСЗ. Измерения по ИСЗ выполняются либо по узкополосным маякам (CW beacons), присутствующим в передаваемых спутниками сигналах, либо по квазишумовым сигналам связанных каналов (телефонных, радиовещательных, телевизионных и т.п.). Для антенных измерений такие сигналы рассматриваются как очень сильные внеземные точечные источники со спектром, близким к равномерному в полосе частот приемника (единицы МГц).

В качестве приемника используется корреляционный радиометр, либо другой фазометрический приемник (амплифазометр, анализатор цепей и т.д.). В первом случае измерения могут проводиться как по шумовым, так и по квазисинусоидальным сигналам. Во втором - измерения проводятся лишь по узкополосным сигналам ИСЗ.

По измеренной двумерной комплексной ДН антенны  $F(u,v)$ , используя преобразование Фурье, можно восстановить распределение поля в апертуре  $E(x,y)$  (или

распределение токов по поверхности зеркала). Основанием для этого являются известные соотношения типа (27), связывающие поле антенны в дальней зоне с распределением поля в ее апертуре или распределением токов на поверхности зеркала.

Восстановленное распределение поля в апертуре может быть использовано для анализа дефектов облучающей и зеркальной систем антенны. При этом преобразование полей зеркальной системой антенны рассматривается в приближении геометрической оптики. Например, по отклонениям  $\Delta\Phi(x,y)$  фазы поля в апертуре могут быть определены локальные смещения  $\Delta S$  соответствующего участка параболоида с фокусным расстоянием  $F$ . Для малых отклонений (см. рис. 32):

$$\Delta S(x, y) = \frac{\lambda}{4\pi \cos\psi} \Delta\Phi(x, y) = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{1 + \frac{x^2 + y^2}{4F^2}} \Delta\Phi(x, y) \quad (41)$$

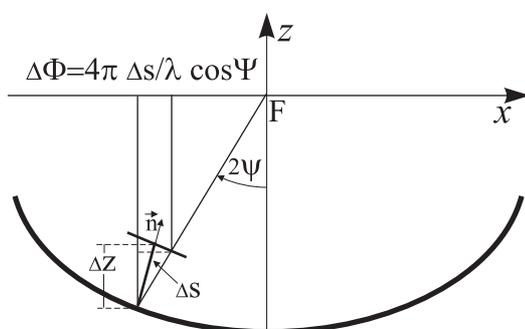


Рис. 32.

Примеры распределений поля в апертурах разных антенн, восстановленных радиоголографическим способом, приведены на рисунках 33 –

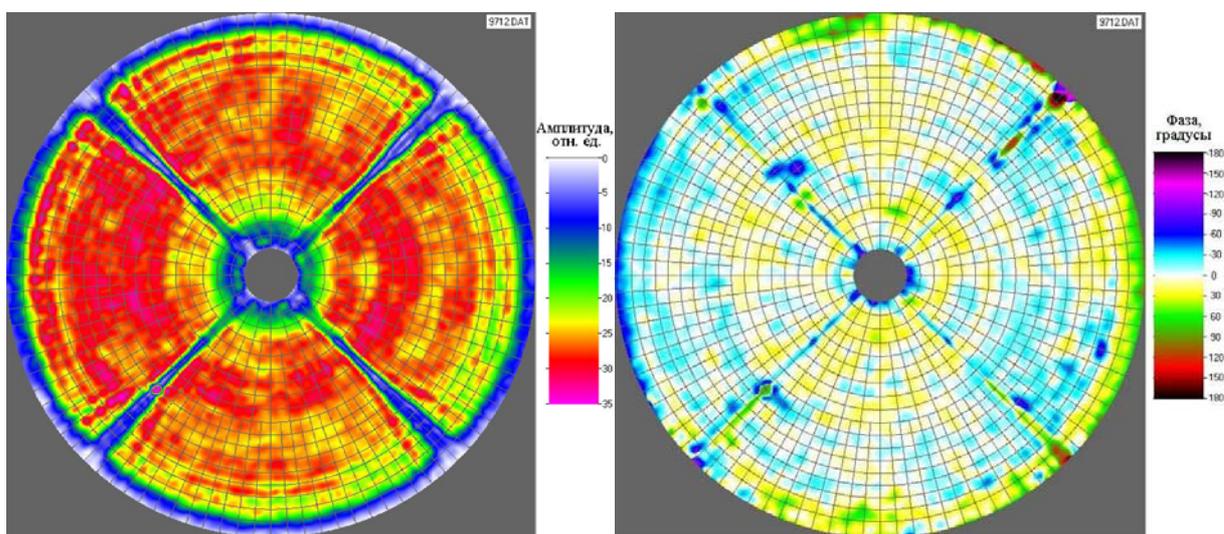


Рис. 33. Распределение амплитуды и фазы поля в апертуре 64-метровой антенны ТНА-1500. Измерения по ИСЗ в С-диапазоне

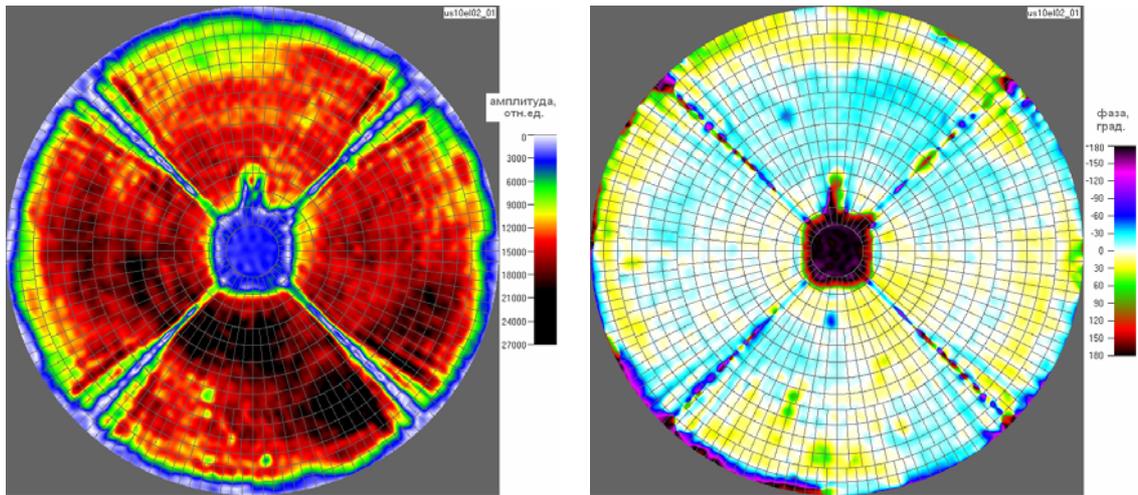


Рис. 34. Распределение поля в апертуре 70-метровой антенны П-2500.  
Измерения по ИСЗ в С-диапазоне

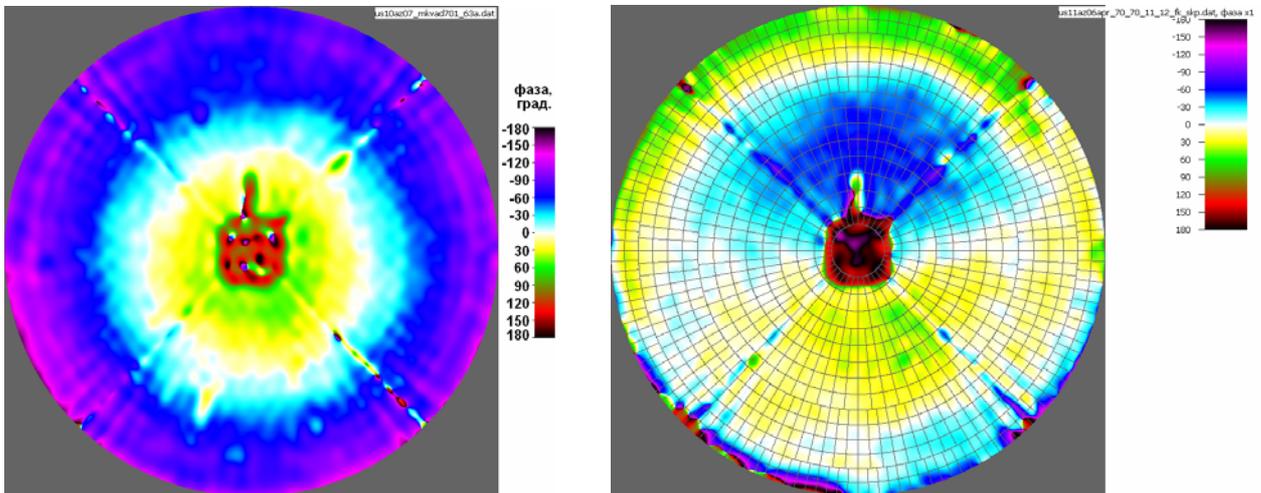


Рис. 35. Распределение фазы поля в апертуре двухзеркальной антенны при смещении  
контррефлектора из фокуса.  
Слева – смещение вдоль оси зеркала, справа – поперек оси.

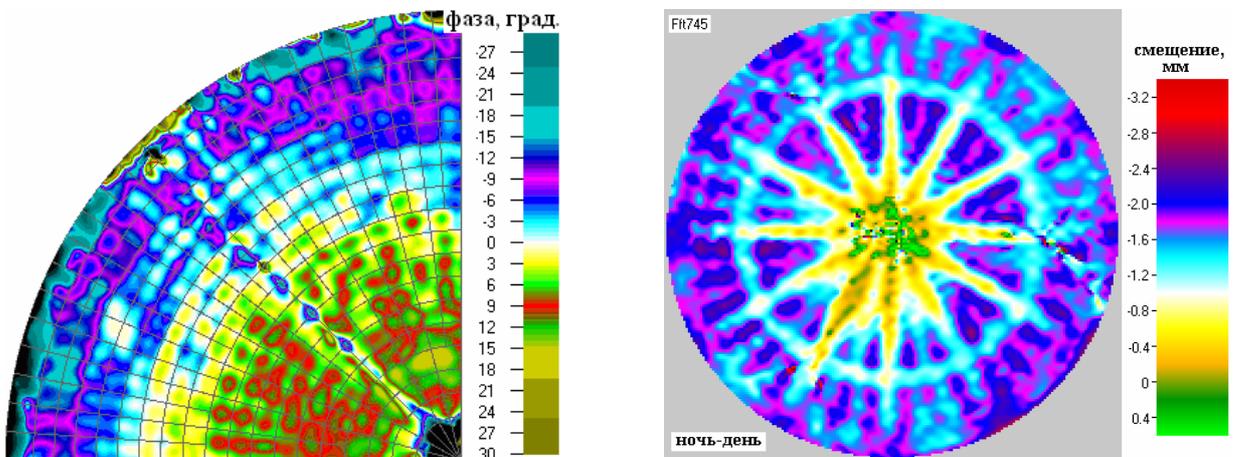


Рис. 36. Исследование суточных деформаций зеркал путем сравнения распределений  
фазы поля в апертуре в дневное и ночное время.  
Слева – 64-метровая антенна, справа – ?-метровая.

#### 4. МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ, ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ И ШУМОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ АНТЕННЫ

Аппаратура для измерений. Модуляционные радиометры предназначены для измерения уровней мощности слабых шумовых и синусоидальных сигналов в радиоастрономических наблюдениях, измерениях характеристик антенн, а также при других видах радиоизмерений. Упрощенная блок-схема модуляционного радиометра показана на рисунке 37.

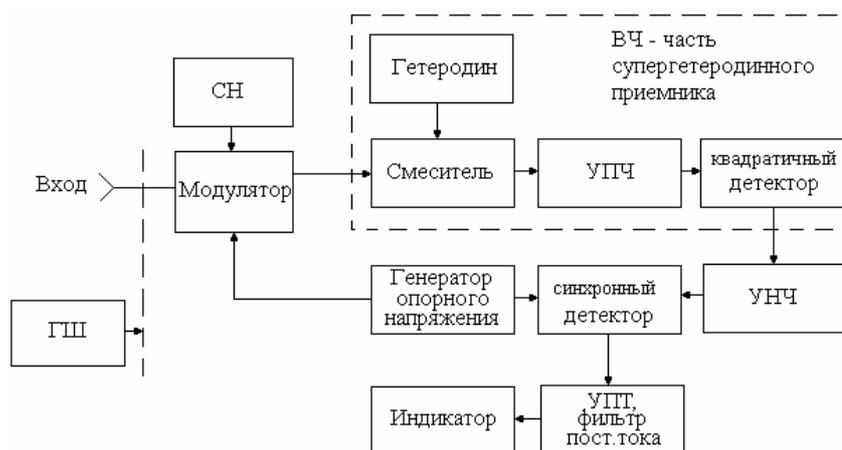


Рис. 37.

Принцип действия модуляционного радиометра заключается в следующем. Измеряемый сигнал на входе приемника модулируется с частотой, задаваемой генератором опорного напряжения (порядка нескольких десятков Гц). Модуляция состоит в попеременном подключении к входу прибора измеряемого сигнала и сигнала известной мощности (так называемого опорного сигнала). В качестве источника опорного уровня, как правило, используется согласованная нагрузка (СН) с шумовой температурой, равной её 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 (УПЧ). Промодулированный сигнал, а также собственные шумы прибора после преобразования в смесителе на промежуточную частоту (ПЧ) 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. Затем сигнал

фильтруется фильтром постоянного тока, и полученное напряжение индицируется на выходе прибора, а также выдается на внешний выход.

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

Конструктивно промышленно выпускавшиеся радиометры серии ПК7-\*\* состоят из следующих блоков:

- блок высокой частоты, предназначенный для приема входных сигналов на два идентичных входных разъема, 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 15000-20000 К, и «холодный» - охлаждаемая жидким азотом согласованная нагрузка – с шумовой температурой порядка 80К.

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

Блок-схема аппаратного комплекса для измерений характеристик антенн с использованием приборов ПК7-\*\* показана на рисунке 38.

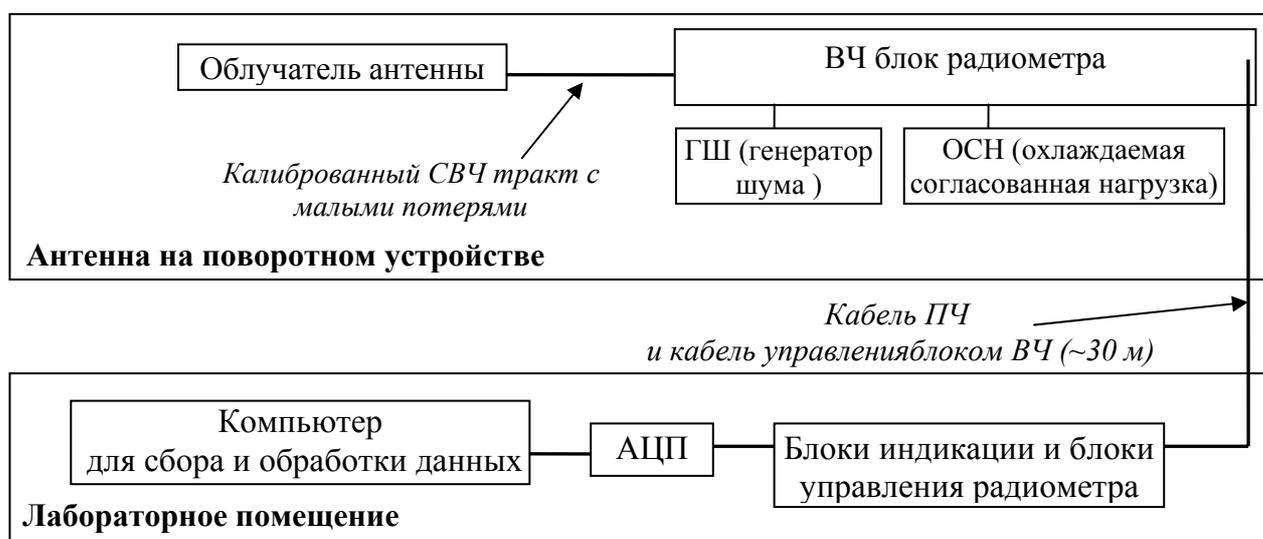


Рис.38.

**Корреляционные радиометры.** Для реализации корреляционного способа антенных измерений необходим корреляционный радиометр. Укрупненная блок-схема корреляционного радиометра приведена на рисунке 39 [10].

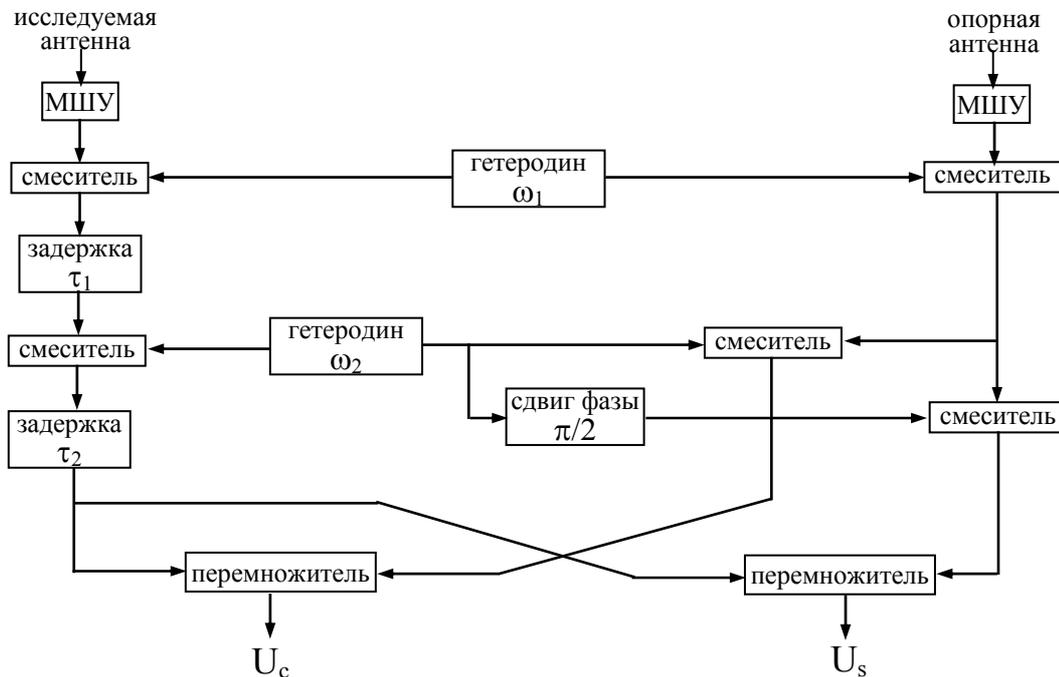


Рис. 39.

Двухканальный приемник с двойным преобразованием частоты имеет два аналоговых перемножителя, 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. Преобразование спектра частот в приемнике показано на рисунке 40. 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.



Рис. 40.

**Выбор калибровочных источников** при измерениях параметров антенн радиоастрономическим методом является одной из основных задач, от которой зависит точность измерений.

Достаточно условно все известные внеземные источники радиоизлучения по величине интенсивности излучения можно разделить на три группы.

1. Солнце – ближайшая к Земле звезда, наиболее мощный радиоисточник, но излучение крайне нестабильно, а угловые размеры велики (около 32 угл. минут), что позволяет использовать его для небольших антенн на достаточно низких частотах, для абсолютных измерений – непригодно.

Луна имеет достаточно сильное тепловое излучение, зависимость которого от фазы хорошо изучено, однако угловые размеры такие же, как у Солнца, что ограничивает ее использование.

2. Дискретные радиоисточники: Кассиопея А (ЗС 461), Лебедь А (ЗС 405), Телец А (Крабовидная туманность, ЗС 144), Дева А (ЗС 274), а также Орион А, Геркулес (ЗС 348), ЗС 353. Они имеют достаточно сильное излучение и угловые размеры в единицы угловых минут, что позволяет широко использовать их в радиоастрономических методах измерений. В течение многих лет проводились работы по измерению плотностей потоков этих источников в зависимости от частоты и по определению их структуры. Были достигнуты погрешности калибровки потоков менее 5 %, на системах апертурного синтеза получены радиокарты распределения излучения.

Остатки взрывов сверхновых звезд (ОСН) Кассиопея А и Телец А имеют ярко выраженный "вековой ход" – плавное уменьшение плотности потока во времени. Имеются данные о кратковременных изменениях их интенсивности, что требует достаточно регулярных контрольных абсолютных измерений. Кроме того, угловые размеры в 4' уже считаются большими для измерений параметров крупных антенн в см диапазоне.

Радиогалактика Лебедь А слабее ОСН, но имеет постоянный поток и известную структуру – двойной источник с разнесением компонент чуть менее 2'.

Радиогалактика Дева А имеет "точечное" ядро с выбросами и большое гало, что существенно затрудняет ее применение.

3. "Точечные" радиоисточники с небольшими (менее 50 Ян) плотностями потоков (квазары, радиогалактики, мазеры и др.). Из этой группы выделяются 10—15 объектов с плотностями потоков 10-50 Ян, которые наиболее часто используются при калибровке крупных антенных комплексов и радиоинтерферометров.

В таблице 1 приведены данные по плотности потоков на трех частотах С, Х и Ку диапазонов для наиболее мощных радиоисточников, используемых для абсолютных измерений

Таблица 1

Источник	$S_v$ [Ян] 3,7 ГГц	$S_v$ [Ян] 8,4 ГГц	$S_v$ [Ян] 11,5 ГГц
3C123	22	11	7
3C144 Телец А	618	509	472
3C273	40	38-40	45
3C274 Дева А	100	50	38
3C405 Лебедь А	525	190	127
3C461 Кассиопея А	814	445	349

**Методика измерения коэффициента усиления.**

Для определения коэффициента усиления антенны радиоастрономическим способом производится регистрация мощности сигнала на выходе антенны (приращения антенной температуры) при приеме радиоизлучения внеземного источника с известной спектральной плотностью потока. Расчет усиления антенны выполняется по формуле:

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} \times \frac{2k \Delta T_{уст}^A}{S_v} \times K_{атм} \times K_{уст}, \quad (42)$$

где  $\Delta T_{уст}^A$  - приращение антенной температуры, обусловленное приемом сигнала радиоисточника, измеряемое в Кельвинах (К);

$S_v$  - спектральная плотность потока радиоисточника, измеряемая в  $\frac{Вт}{м^2 Гц}$ ,  
или в Янских,  $1 Ян = 10^{-26} \frac{Вт}{м^2 Гц}$  ;

$\lambda$  – длина волны;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Вт}/(\text{К Гц})$  – постоянная Больцмана;

$K_{атм}$  – поправочный коэффициент, компенсирующий затухание сигнала при прохождении через атмосферу Земли;

$K_{уст}$  – поправочный коэффициент, компенсирующий ослабление принятого сигнала, обусловленное спадом ДН антенны в пределах угловых размеров источника.

Для определения приращения антенной температуры  $\Delta T_{уст}^A$ , обусловленной излучением радиоисточника, производится измерение разности сигналов на выходе системы регистрации («ступеньки» по напряжению  $\Delta V_{ист}$ ) при наведении антенны максимумом ДН на источник и на опорную область. В качестве опорной области используется направление, отстоящее от направления на источник по одной из координат (желательно, по азимуту) на угол, равный нескольким (порядка 3-5) размерам лепестка

ДН. При измерении характеристик остронаправленных антенн в СВЧ диапазоне угол отведения от источника составляет от единиц градусов до нескольких десятков минут<sup>1</sup>.

Возможно два типа перемещения (сканирования) антенны относительно источника при измерении КУ. В первом случае производится запись сигнала радиометра при прохождении источника через максимум ДН антенны. Сканирование осуществляется за счет вращения антенны относительно движущегося источника, либо используется только движение источника относительно антенны, выставленной в упреждающую точку. Таким образом, процедура измерения КУ совмещается с измерением одного из главных сечений её ДН. Необходимо отметить, что в данном случае точность измерений ограничена малой продолжительностью регистрации сигнала в максимуме ДН антенны.

В случае, если система наведения антенны обеспечивает программное сопровождение радиоисточника, целесообразно, особенно при измерениях по слабым источникам, использовать специальный алгоритм измерений, заключающийся в наведении антенны на источник, сопровождении его максимумом ДН в течение некоторого времени (одной–двух минут), отведении антенны и сопровождении опорной области. Повторение данной процедуры 5-10 раз и усреднение полученных при этом данных позволяет существенно повысить точность измерения приращения сигнала радиометра  $\Delta V_{ист}$ , обусловленное излучением радиоисточника.

На рис. 41 показаны примеры записей «ступенек» сигнала при наведении на источники разной интенсивности, полученные при измерении Ку остронаправленной антенны

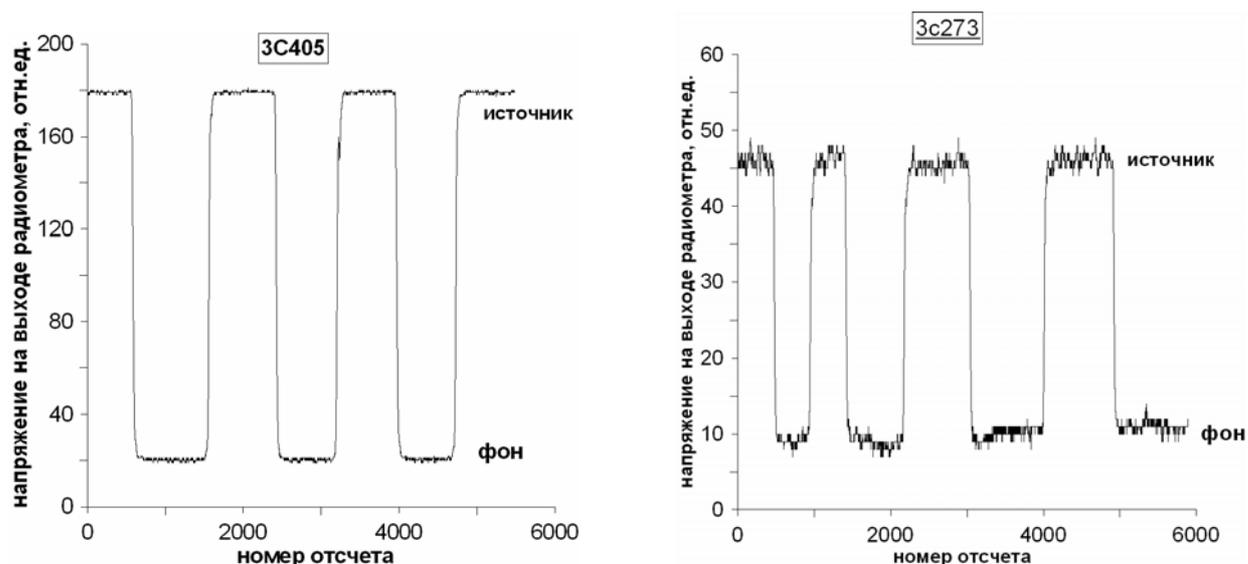


Рис.41.

<sup>1</sup> При отведении по азимуту угол следует увеличить в  $1/\cosh$  раз,  $h$  – высота источника.

**Калибровки.** Пересчет измеренных значений  $\Delta V_{ист}$  в приращение антенной температуры проводится по результатам калибровок с использованием эталонов шумовой температуры. В качестве эталонов применяются охлаждаемые (заправляемые жидким азотом) согласованные нагрузки (ОСН) и внешние «горячие» генераторы шума (ГШ).

**Калибровка по ОСН.** Процедура калибровки по ОСН заключается в измерении разности показаний радиометра («ступеньки» по напряжению  $\Delta V_{ОСН}$ ) при подключении на его вход внутренней согласованной нагрузки и ОСН.

По результатам калибровки приращение антенной температуры  $\Delta T_{ист}^A$  определяется

по формуле:

$$\Delta T_{ист}^A = (T_{СН} - T_{ОСН}) \times \frac{\Delta V_{ист}}{\Delta V_{ОСН}}, \quad (43)$$

где  $T_{СН}$  – температура внутренней согласованной нагрузки модуляционного радиометра (измеряется и индицируется прибором);

$T_{ОСН}$  – шумовая температура ОСН, заправленной жидким азотом (приведена в формуляре прибора).

В качестве эталонного источника сигнала может также использоваться внешний генератор шума (ГШ) с калиброванной шумовой температурой.

**Учет потерь в измерительном тракте.** При использовании для подключения входа радиометра к выходу облучателя антенны дополнительного измерительного кабеля (не входящего в штатный СВЧ тракт антенны) расчет приращения антенной температуры  $\Delta T_{ист}^A$  проводится по формуле:

$$\Delta T_{ист}^A = (T_{СН} - T_{ОСН}) \times \frac{\Delta V_{ист}}{\Delta V_{ОСН}} \times \frac{1}{\eta_{каб}}, \quad (44)$$

где  $\eta_{каб}$  – КПД дополнительного кабеля, определяемый из вспомогательных измерений.

**Учет поглощения в атмосфере.** Для повышения точности измерения КУ, особенно на низких углах места антенны, требуется проводить коррекцию с целью компенсации поглощения сигнала источника в атмосфере Земли. При этом коэффициент, используемый в соотношении (42) вычисляется по формуле:

$$K_{атм} = e^{-\Gamma_0 \csc h}, \quad (45)$$

где  $\Gamma_0$  – полное вертикальное поглощение на рабочей частоте;

$h$  – угол места источника (высота над горизонтом).

Для уменьшения влияния поглощения в атмосфере следует проводить измерения КУ антенн в сухую малооблачную погоду при высоких углах места источника (на высотах 30-70° над горизонтом).

**Методика измерения шумовой температуры.** Для определения шумовой температуры антенны радиоастрономическим способом производится измерение мощности сигнала на выходе антенны при направлении главного лепестка ее ДН в область неба с минимальными значениями яркостной температуры. Обычно в качестве такой области выбирается направление в зенит. Одновременно проводится калибровка по охлаждаемой согласованной нагрузке. По результатам измерений шумовая температура антенны рассчитывается по формуле:

$$T_{ш}^A = T_{СН} - (T_{СН} - T_{ОСН}) \times \frac{\Delta V_{зенит}}{\Delta V_{ОСН}}, \quad (46)$$

где  $T_{СН}$  – температура внутренней согласованной нагрузки радиометра;

$T_{ОСН}$  – шумовая температура ОСН, заправленной жидким азотом;

$\Delta V_{зенит}$  - разность показаний системы регистрации при подключении на вход радиометра внутренней согласованной нагрузки и выхода антенны, направленной в зенит;

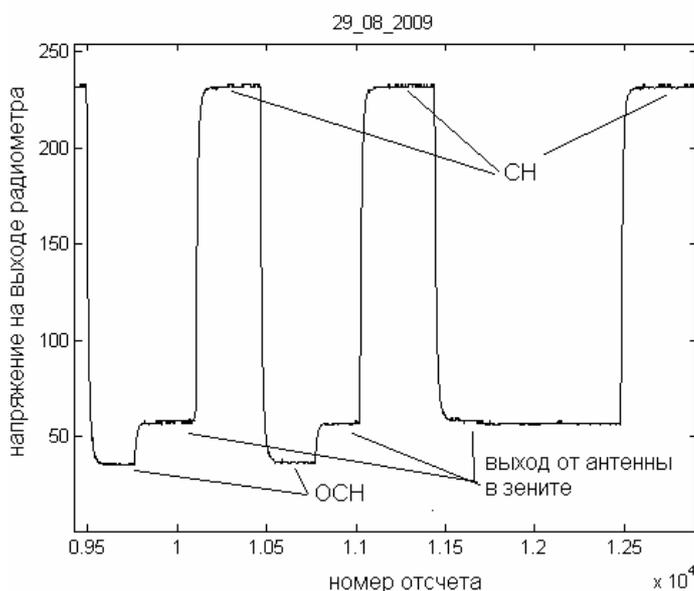
$\Delta V_{ОСН}$  - разность показаний системы регистрации при подключении на вход радиометра внутренней согласованной нагрузки и ОСН.

**Учет потерь в кабеле.** Для исключения шумов, вносимых дополнительным кабелем, соединяющим выход облучателя с входом радиометра, расчет шумовой температуры антенны следует выполнять по формуле:

$$T_{ш}^A = T_{СН} - \frac{T_{СН} - T_{ОСН}}{\eta_{каб}} \times \frac{\Delta V_{зенит}}{\Delta V_{ОСН}} + (T_{СН} - T_{кабеля}) \times \frac{1 - \eta_{каб}}{\eta_{каб}}, \quad (47)$$

где  $T_{кабеля}$  - температура кабеля (температура окружающего воздуха);

$\eta_{каб}$  – КПД дополнительного кабеля.



На рисунке 42 приведен пример записи процедуры измерения шумовой температуры. По результатам подобных измерений определяются значения ступенек напряжений  $\Delta V_{зенит}$  и  $\Delta V_{ОСН}$ , входящих в соотношение (47).

Рис. 42.

### Методика измерения параметров главного лепестка ДН.

Для определения параметров главного лепестка ДН (углового направления, соответствующего максимуму ДН, и ширины главного лепестка по уровню половинной мощности) проводится измерение главных сечений ДН антенны. При этом желательно, чтобы система управления антенной обеспечивала следующие режимы: наведение на радиисточник и его сопровождение по программе, сканирование относительно движущегося источника независимо по каждой из угловых координат с заданными скоростями.

Процедура измерений начинается с наведения антенны на расчетные угловые координаты выбранного радиисточника и его сопровождения. Затем осуществляется сканирование антенны относительно источника по одной из координат в угловом секторе  $\pm 3 \dots 5$  лепестков ДН с заданной скоростью, при сопровождении антенной расчетных координат источника по другой (несканируемой) координате. Для повышения точности измерений и обеспечения возможности выполнения не менее десяти независимых отсчетов на лепестке ДН устанавливается соответствующая скорость вращения антенны. По полученной при обработке зависимости мощности сигнала на выходе радиометра от разности угловых координат антенны и источника определяется угловое положение максимума – разъюстировка (поправка) по сканируемой координате. После этого антенна наводится на источник с найденной поправкой и производится сканирование сечения ДН по второй координате в соответствующем угловом секторе. При обработке второго сечения определяется величина разъюстировки по второй координате. При необходимости проводится повторное сканирование сечения ДН по первой координате с найденной поправкой по второй координате. По измеренным таким образом двум главным сечениям ДН определяется ширина главного лепестка ДН по уровню половинной мощности в двух ортогональных плоскостях. При обработке может производиться аппроксимация измеренных зависимостей полиномами. За уровень фона принимается значения сигнала на краях сектора сканирования.

**Система координат.** При исследовании параметров ДН используется система координат, связанная с зеркалом антенны. На рисунке 43 показана связь системы координат зеркала с осями опорно-поворотного устройства антенны – ось Z совпадает с геометрической осью зеркала (антенны), ось Y совпадает с угломестной осью вращения антенны, азимутальная ось вращения антенны, совпадающая с направлением в зенит, лежит в плоскости XZ, угол между

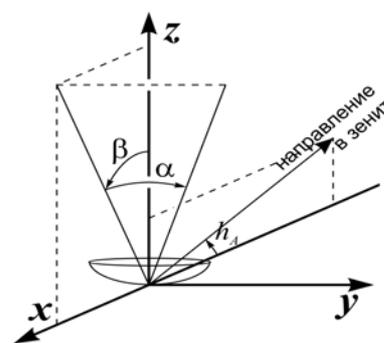


Рис. 43.

азимутальной осью вращения и осью X равен угломестной координате антенны  $h_A$  в наземной системе. При наведении антенны на источник ось Z направлена на него, а координаты азимут и угол места антенны  $h_A, Az_A$  совпадают с координатами источника  $h_{ист}, Az_{ист}$  в наземной системе.

Угловые направления задаются в выбранной системе координат углами  $\alpha, \beta$ . При построении угловых зависимостей ДН и определении параметров ДН в обеих плоскостях (отклонения главного максимума ДН от оси Z - разбюстировки, ширины главного лепестка, положений боковых лепестков) пересчет координат проводится по формулам:

$$\begin{aligned} \beta &= h_A - h_{ист} \\ \alpha &= (Az_A - Az_{ист}) \times \cos h_{ист} \end{aligned} \quad (48)$$

Сечение ДН по координате  $\beta$  называются угломестным, сечение по координате  $\alpha$  - азимутальным.

На рисунке 44 приведены примеры измерения сечений ДН остронаправленной антенны в С-диапазоне по радиоисточнику 3С273. На правой части рисунка показан результат аппроксимации главного лепестка ДН с целью определения положения главного максимума и ширины на уровне -3 дБ.

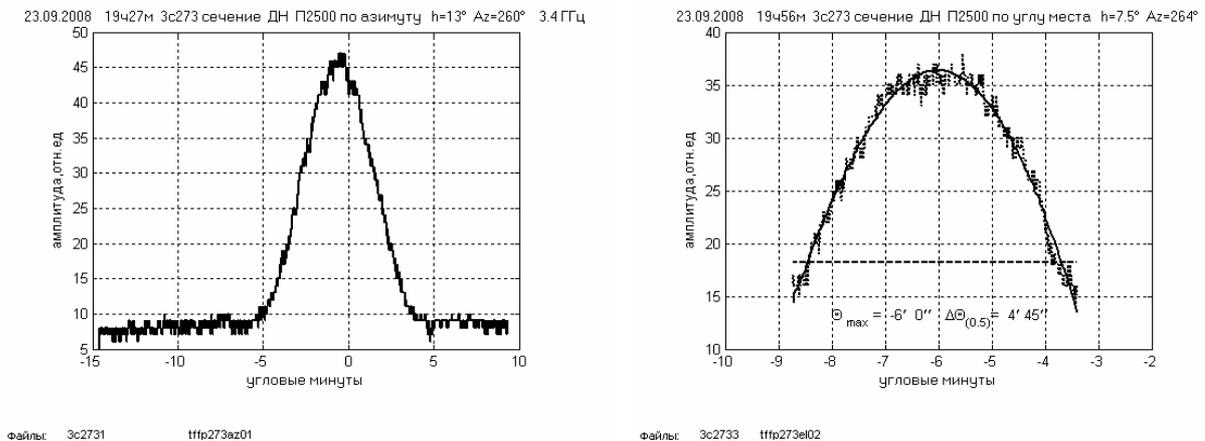


Рис. 44.

В случае, если система управления наведением антенны не обеспечивает необходимые режимы сканирования относительно радиоисточников, может применяться методика сканирования сечений ДН с использованием собственного перемещения источника по небесной сфере. При этом антенна выставляется с упреждением на расчетные координаты и производится запись сигнала на выходе радиометра при прохождении источника через главный лепесток ДН. Данный режим измерений обеспечивает меньшую точность и требует гораздо большего времени, особенно в случае узкой ДН антенны. Источник быстро «пролетает» через максимум ДН (скорость

движения, как правило, составляет порядка 5-20 угл.сек/сек), что не позволяет увеличивать время накопления сигнала и вызывает необходимость многократных повторов измерений. Кроме того, в данном случае измеряется сечение ДН в произвольной плоскости относительно зеркала антенны, определяемой траекторией движения источника, и практически невозможно выполнить измерение сечений ДН в двух ортогональных плоскостях.

**Особенности измерений корреляционным способом.** Продолжительность сеанса измерений параметров антенн корреляционным способом определяется необходимым временем накопления сигнала и объемом измеряемых данных. Измерение по естественным радиоисточникам даже одного сечения ДН в предельно широком динамическом диапазоне может потребовать нескольких часов. Для двумерных распределений (матриц) ДН объемом до нескольких десятков тысяч комплексных отсчетов необходимое время достигает десятков часов. При исследовании характеристик крупных антенн желательно, чтобы за время сеанса угол места источника менялся незначительно во избежание искажений, вносимых переменными гравитационными деформациями. Практически это ограничивает продолжительность одного сеанса несколькими часами (не более 2–3). В результате измерение больших матриц ДН приходится разбивать на несколько сеансов и выполнять их по частям в течение нескольких суток (как правило, в ночное время) на близких углах места источника.

При большой продолжительности измерений значительные погрешности могут возникать из-за медленных изменений (дрейфов) параметров аппаратуры и трактов. Поэтому особое внимание следует уделять организации калибровок. При проведении корреляционных измерений используются калибровки различных типов. Часть из них аналогична калибровкам в обычных радиоастрономических измерениях с подключением на вход приемника согласованной нагрузки, генератора шума, наведением исследуемой антенны на источник. В измерениях по естественному источнику дополнительные возможности для калибровок появляются из-за его постоянного смещения относительно базовой линии интерферометра. Рассмотрим подробнее возможности таких калибровок.

На рисунках 45 приведены примеры записи выходного сигнала корреляционного радиометра при сопровождении радиоисточников Кассиопея–А и Лебедь–А двумя 25–метровыми антеннами, с базовым расстоянием около 100 метров [11]. Зависимость на рисунке 45а получена при сопровождении источника, проходящего вблизи направления вдоль базовой линии, данные рисунка 40б - вблизи направления, перпендикулярного базе. Приведенные результаты демонстрируют характер изменения выходного сигнала интерферометра за время прохождения источником углового сектора от направления

вдоль базовой линии до перпендикулярного ему. Заметна переменность периода интерференционного сигнала, а также неравенство усиления косинусного и синусного выходов приемника. На рисунке 45б хорошо видны периодические изменения амплитуды выходных сигналов, обусловленные уменьшением значения корреляционной функции из-за изменения геометрической задержки и регулярной коррекцией уровня сигнала введением соответствующей аппаратной задержки.

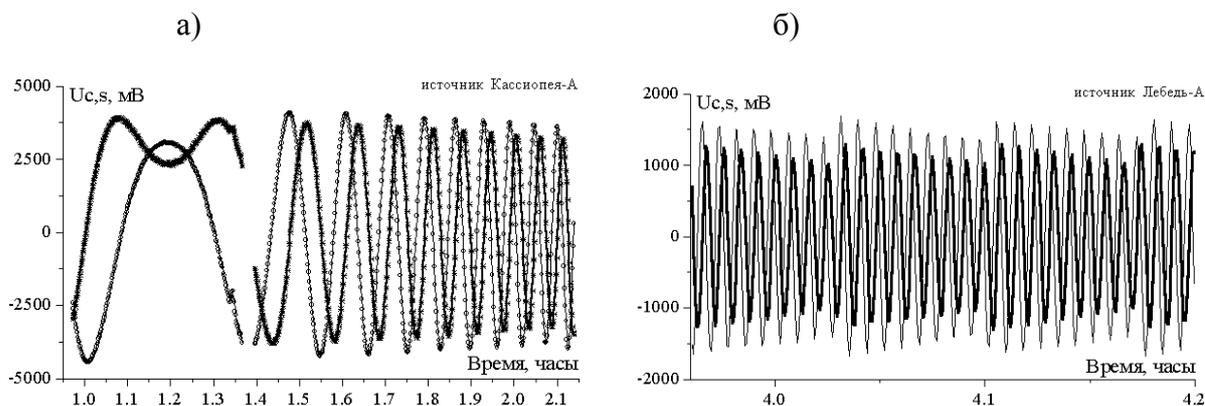


Рис. 45.

Значения вводимой переменной аппаратной задержки могут определяться по расчетной зависимости изменений геометрической задержки в случае, если параметры базы (три проекции на оси декартовой системы координат) известны. При неизвестных параметрах базы зависимость задержки от координаты источника определяется по максимуму сигнала интерферометра в предварительных измерениях.

Во время сеансов измерения характеристик антенн медленное (и линейное на коротких интервалах времени) изменение фазы сигнала, обусловленное изменением геометрической задержки, предоставляет возможность реализовать простую и эффективную калибровку путем сопровождения источника обеими антеннами в течение времени, необходимого для записи, как минимум, одного интерференционного периода. По записи определяются текущие значения таких параметров, как разность усиления каналов приемника, неортогональность выходных сигналов и «нулевые» уровни в обоих каналах. Пример подобной калибровки показан на рисунке 46. Представленные звездочками и кружками измеренные временные зависимости выходных напряжений обоих каналов корреляционного приемника аппроксимированы методом наименьших квадратов функцией вида

$$U_{c,s} = A_{c,s} \sin(2\pi t / T + \varphi_{c,s}) + a_{c,s}. \quad (49)$$

По найденным таким образом значениям  $A_{c,s}$ ,  $\varphi_{c,s}$  и  $a_{c,s}$  определяются параметры коррекции измеренных значений показаний приемника.

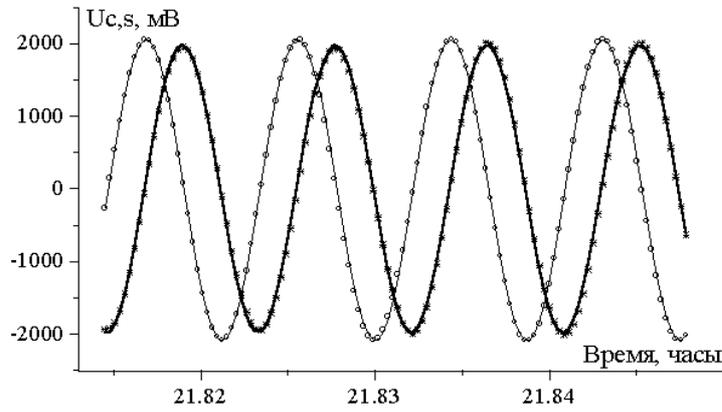


Рис.46.

Период проведения калибровок определяется характерным временем изменения параметров аппаратуры и трактов и составляет порядка нескольких десятков минут. По результатам калибровок, выполненных до начала, в процессе и по окончании измерения характеристик исследуемой антенны, производится линейная интерполяция зависимости от времени параметров коррекции. Выходные сигналы приемника, измеренные в процессе сканирования ДН, преобразуются с использованием текущих значений этих параметров:

$$\begin{aligned}
 U_c^c &= (U_c - \delta_c) / A_c \\
 U_s^c &= \frac{(U_s - \delta_s) / \alpha - (U_c - \delta_c) \sin(\delta\varphi)}{A_c \cos(\delta\varphi)}
 \end{aligned}
 \quad (50)$$

После этого характеристики исследуемой антенны рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned}
 F(\theta) &= \sqrt{(U_c^c)^2 + (U_s^c)^2} \\
 \Phi(\theta) + \omega_0 \tau_g(t) &= \arctg(U_s^c / U_c^c)
 \end{aligned}
 \quad (51)$$

Очевидно, что для определения фазовой ДН антенны  $\Phi(\theta)$  необходимо исключить из фазовой зависимости измеренного сигнала т.н. «интерференционную» компоненту, обусловленную изменением геометрической задержки за время измерений. Для этого применяются разные методики. В одних случаях используются результаты рассмотренных выше калибровок и определяемые в них параметры – период интерференционной составляющей. По двум последовательным калибровкам, определяются начальная фаза  $\varphi_1$ , период интерференции  $T_1$  и его производная  $dT/dt = (T_2 - T_1) / (t_2 - t_1)$ , где  $t_1$  и  $t_2$  – время первой и второй калибровок. После этого фазовая зависимость значений ДН, измеренных в моменты времени  $t_n$  между этими калибровками подвергается коррекции:

$$\Phi(\theta) = \Phi(\theta(t_n)) - \varphi_1 - 2\pi(t_n - t_1)(1/T_1 + (1/T_2 - 1/T_1)(t_n - t_1)/(t_2 - t_1)) \quad (52)$$

Очевидно, что погрешность восстановления фазовой ДН  $\Phi(\theta)$  зависит в данном случае от погрешности определения периода интерференции и его производной. Опыт показывает, что такая методика может использоваться на участках движения источника с

плавным изменением периода интерференции, т.е. вдали от направления вдоль базовой линии.

Более универсальной является коррекция фазовой зависимости по расчетным значениям изменения задержки. Для этого опять же необходимо знание параметров базы интерферометра. Эти значения могут быть известны из предварительных геодезических измерений. Существуют также специальные радиоастрономические методики определения параметров базы интерферометра, обладающие высокой точностью.

Присутствие рассмотренной выше интерференционной составляющей накладывает ограничения на время накопления сигнала при измерениях. Очевидно, что время накопления должно быть много меньше периода интерференции. Для увеличения времени накопления при измерениях низких уровней ДН можно использовать методику т.н. «остановки» интерференционных лепестков. При этом выходные сигналы перемножителя (до сумматора) после коррекции в соответствии с (50) подвергаются преобразованию типа:

$$\begin{aligned} U_c^{c'} &= U_c^c \cos(\omega_0 \tau_g) + U_s^c \sin(\omega_0 \tau_g) \\ U_s^{c'} &= -U_c^c \sin(\omega_0 \tau_g) + U_s^c \cos(\omega_0 \tau_g) \end{aligned} \quad (53)$$

#### **Некоторые вопросы радиологических измерений.**

Реализация высокоточных радиологических измерений на крупных антенных системах требует, помимо специальной аппаратуры, разработки полностью автоматизированных методик измерений с тщательным анализом возможных источников погрешностей.

Как уже отмечалось, радиологические измерения могут быть выполнены по сигналам естественных радиоисточников, а также по сигналам геостационарных ИСЗ. Очевидно, что для восстановления карты зеркала с высоким разрешением предпочтительнее использовать при измерениях мощные сигналы ИСЗ. Однако угол места наблюдения геостационарных спутников ограничен. Для наземного пункта, расположенного на широте  $\varphi$  и долготе  $\theta$ , азимут  $Az_s$  и угол места  $h_s$  ИСЗ с координатой на геостационарной орбите  $\theta_s$  определяются по формулам:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} Az_s &= \operatorname{tg} \Delta\theta / \sin \varphi \\ \operatorname{tg} h_s &= \frac{a \cos \Delta\theta \cos \varphi - 1}{a \sqrt{\cos^2 \Delta\theta \sin^2 \varphi + \sin^2 \Delta\theta}}, \end{aligned} \quad (54)$$

где  $\Delta\theta = \theta - \theta_s$ ,  $a = 6,622$  – отношение радиуса орбиты к радиусу Земли.

Для антенн на территории России наблюдаемый угол места ИСЗ  $h_s$ , как правило, не превышает  $25^\circ$ – $40^\circ$ . Следовательно, исследование гравитационных деформаций зеркал, возникающих при более высоких углах, может быть выполнено только по естественным радиоисточникам. То обстоятельство, что такие деформации имеют, как правило, средние и крупномасштабный характер, позволяет использовать для их измерений более слабые сигналы и восстанавливать поле в апертуре с меньшим разрешением, чем это требуется для получения карты положений щитов. Для полного исследования разного рода деформаций рефлектора целесообразно сочетать измерения по ИСЗ и по радиоисточникам.

Частота, на которой выполняются голографические измерения, определяется требуемой точностью восстановления формы зеркала. Как правило, чем меньше длина волны, тем выше точность измерения деформаций. К примеру, в диапазоне 11 ГГц при реализации точности фазовых измерений около  $1^\circ$ – $3^\circ$  достижима точность восстановления формы поверхности порядка 40–100 мкм (см. (41)), что на практике вполне достаточно. Однако с ростом частоты возрастают технические сложности реализации точных фазовых измерений. Кроме того, при измерениях по ИСЗ выбор

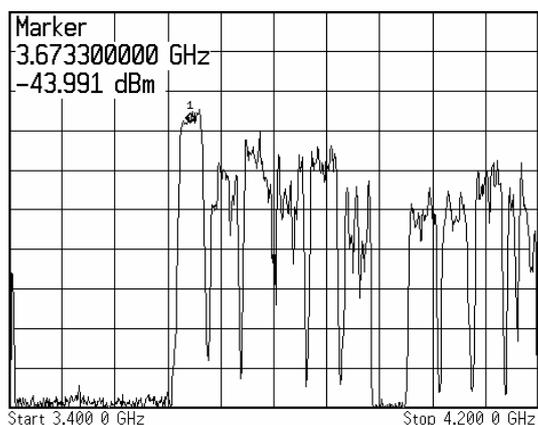


Рис.47. Спектр сигнала ИСЗ Express AM33 (96,5E).

частоты ограничен имеющимися на спутниках каналами. На многих геостационарных ИСЗ имеется по несколько мощных связных каналов в диапазонах 4 и 11 ГГц, поэтому значительное число голографических измерений выполняются именно на этих частотах. Пример спектра излучения ИСЗ в С диапазоне представлен на рисунке 47.

Размер сектора измерения ДН  $\theta_{изм}$  определяется требуемым разрешением поля в апертуре  $\Delta x$ :  $\sin\theta_{изм} \sim \Delta u \cdot N \geq \lambda/\Delta x$ . К примеру, для реализации разрешения  $\Delta x \approx 1$  м угловой сектор измерений должен составлять около  $\pm 1^\circ$  и  $\pm 2,5^\circ$  в диапазоне частот 11 ГГц и 4 ГГц соответственно. Дискрет измерения ДН зависит от размера области восстановления поля в апертуре и должен удовлетворять условию  $\Delta u < \lambda/D$ . Общий объем массива измеряемых данных должен соответствовать объему восстанавливаемых значений. Например, для восстановления поля в апертуре 70-метровой антенны с разрешением около 1 метра требуется измерить не менее  $70 \times 70 \approx 5000$  комплексных значений ДН. Реально для

исключения влияния краевых эффектов и повышения отношения сигнал/шум измеряются гораздо большие массивы.

Значительные объемы измеряемых массивов ДН определяют большую продолжительность голографических измерений. Для уменьшения влияния на измеряемые характеристики внешних возмущающих факторов желательно, чтобы длительность сеанса не превышала нескольких часов. Измерения с целью определения карты зеркала для последующей его регулировки проводятся обычно в ночное время в пасмурную безветренную погоду. При большой продолжительности измерений медленные изменения (дрейфы) параметров аппаратуры, трактов и сигналов могут существенно повлиять на точность. Поэтому, как отмечалось выше, серьезное внимание должно уделяться организации калибровок..

При голографических измерениях по ИСЗ выполняются калибровки с целью контроля не только медленных изменений уровней сигналов в трактах комплекса, но также изменений угловых координатам ИСЗ, обусловленных его суточным дрейфом. Основная калибровка заключается в наведении антенны на ИСЗ и сканировании относительно этого положения по обеим угловым координатам на медленной скорости в пределах главного лепестка ДН. По окончании калибровки по максимуму сигнала определяется текущее угловое положение ИСЗ.

На рис. 48 показаны данные суточного дрейфа ИСЗ для двух последовательных ночей, полученные по изложенной методике при измерениях характеристик антенны в Калязине в диапазоне 11 ГГц. При ширине ДН антенны около 2' суточные изменения координат ИСЗ достигали значений около 4–5'. Очевидно, что такие изменения координат спутника должны тщательно контролироваться. Приведенный рисунок демонстрирует достаточно высокую точность контроля дрейфа ИСЗ по разработанной методике. Между калибровками, проводимыми с интервалом около 30 мин, смещение спутника составляет около 10–15". На продолжительном временном интервале разброс измеренных значений от плавной зависимости не превышает единиц угловых секунд.

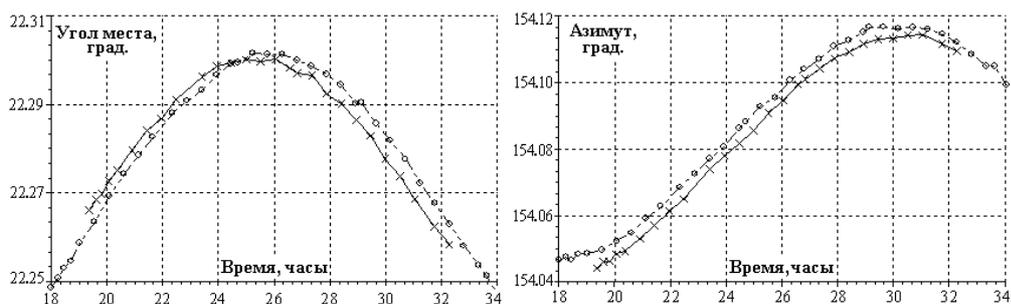


Рис. 48.

## 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПРИЕМА И ИЗМЕРЕНИЯ СИГНАЛОВ ВНЕЗЕМНЫХ РАДИОИСТОЧНИКОВ НА БАЗЕ ПОЛНОПОВОРОТНОЙ ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ С ЗЕРКАЛОМ 2,5 МЕТРА

Блок-схема аппаратного комплекса для лабораторных и научно-исследовательских работ по антенной технике и радиоастрономии приведена ниже .

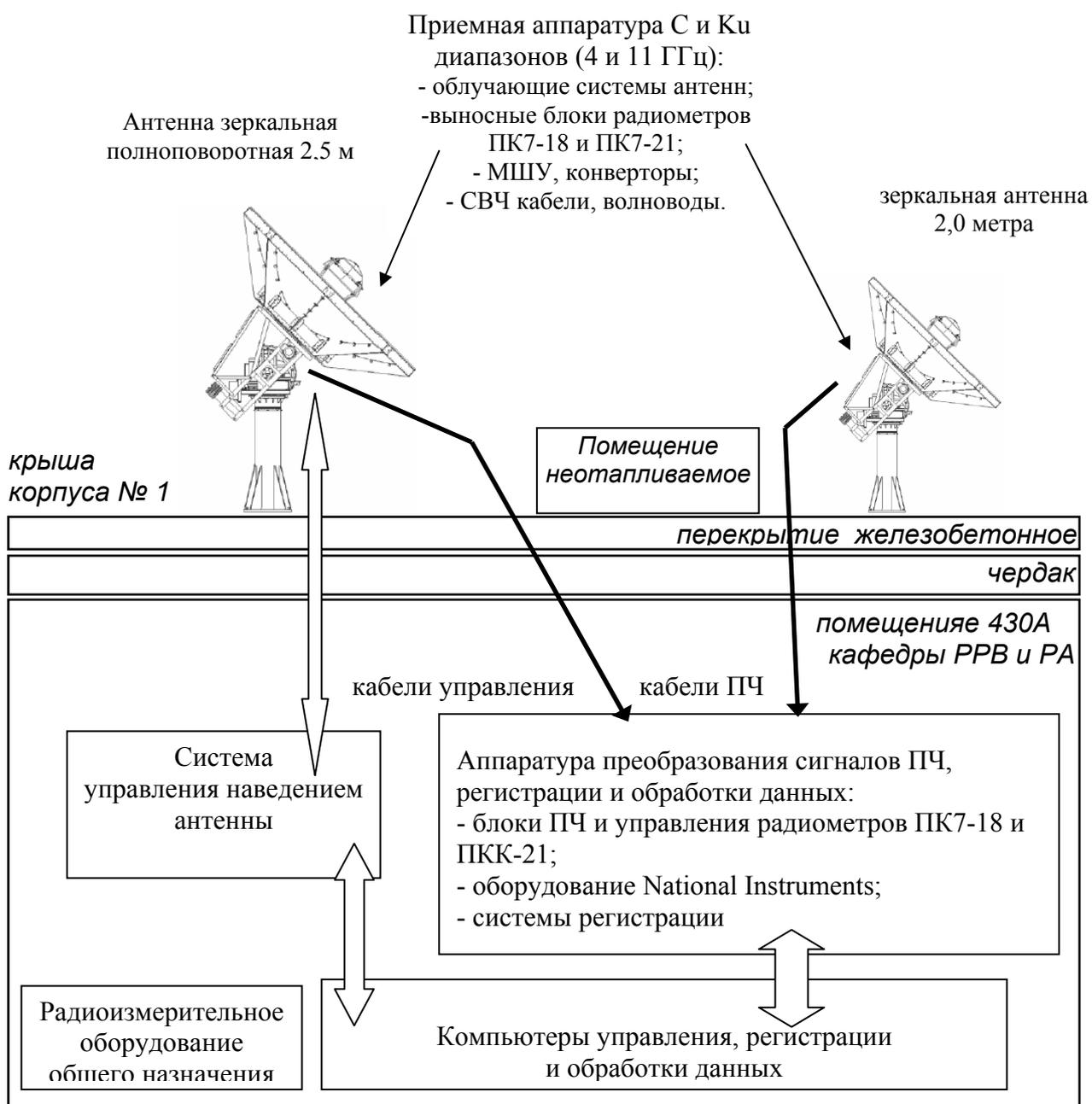


Рис. 49

Комплекс содержит две осесимметричные параболические антенны: двухзеркальную с основным зеркалом диаметром 2,5 метра и однозеркальную с зеркалом 2,0 метра, фотографии которых приведена на рисунке 50.



Рисунок 50.

Полноповоротная зеркальная антенна с зеркалом 2,5 метра производства Красноярского предприятия НПО «ПМ Развитие» (показанная на переднем плане фотографии) укомплектована сменными облучающими системами Ku- и C- частотных диапазонов и управляемой от компьютера системой наведения (фото 51), обеспечивающей программное вращение антенны, сопровождение радиисточники и сканирование относительно них в заданном секторе углов .



Рисунок 51.

Измерительный комплекс содержит также сменные облучатели других частотных диапазонов, комплекты маломощных усилителей и СВЧ конверторов, коаксиальные фазостабильные кабели и другие узлы, необходимые для измерений.

В состав установки входят два комплекта модуляционных радиометров ПК7-18 и ПК7-21, обеспечивающих возможность измерения характеристик любой из антенн в С= и Кu частотных диапазонах.

Имеющееся оборудование позволяет реализовать измерения в режиме малобазового корреляционного интерферометра. Для этого может быть задействован разработанный в ННГУ цифровой корреляционный радиометр, описание которого дано в работе [12].

## **6. ЗАДАНИЯ НА ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ В ЧАСТОТНЫХ ДИАПАЗОНАХ 4 ГГц И 11 ГГц ПО СИГНАЛАМ ИСЗ И ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОИСТОЧНИКОВ**

На лабораторной установке студентам может быть предложено выполнить 2-3 задания их нижеприведенного перечня

а) измерение ДН сфокусированных антенн:

1. Измерить центральные сечения ДН антенны с зеркалом 2,5 метров в двух ортогональных плоскостях (по азимуту и по углу места) по радиоизлучению Солнца в С-диапазоне (около 4 ГГц). Выполнить сравнение результатов с теоретическими оценками параметров ДН.
2. Измерить центральные сечения ДН антенны с зеркалом 2,5 метров в двух ортогональных плоскостях (по азимуту и по углу места) по радиоизлучению Солнца в Ку-диапазоне (около 11ГГц). Выполнить сравнение результатов с теоретическими оценками параметров ДН.
3. Измерить центральные сечения ДН антенны с зеркалом 2,5 метров в двух ортогональных плоскостях (по азимуту и по углу места) по радиоизлучению геостационарного ИСЗ в С-диапазоне (около 4 ГГц). Выполнить сравнение результатов с теоретическими оценками параметров ДН.
4. Измерить центральные сечения ДН антенны с зеркалом 2,5 метров в двух ортогональных плоскостях (по азимуту и по углу места) по радиоизлучению геостационарного ИСЗ Ку-диапазоне (около 11ГГц). Выполнить сравнение результатов с теоретическими оценками параметров ДН.
5. Измерить центральные сечения ДН антенны с зеркалом 2,0 метров в двух ортогональных плоскостях (по азимуту и по углу места) по радиоизлучению Солнца в С-диапазоне (около 4 ГГц). Выполнить сравнение результатов с теоретическими оценками параметров ДН.
6. Измерить центральные сечения ДН антенны с зеркалом 2,0 метров в двух ортогональных плоскостях (по азимуту и по углу места) по радиоизлучению Солнца в Ку-диапазоне (около 11ГГц). Выполнить сравнение результатов с теоретическими оценками параметров ДН.
7. Измерить центральные сечения ДН антенны с зеркалом 2,0 метров в двух ортогональных плоскостях (по азимуту и по углу места) по радиоизлучению

геостационарного ИСЗ в С-диапазоне (около 4 ГГц). Выполнить сравнение результатов с теоретическими оценками параметров ДН.

8. Измерить центральные сечения ДН антенны с зеркалом 2,5 метров в двух ортогональных плоскостях (по азимуту и по углу места) по радиоизлучению геостационарного ИСЗ Ку-диапазоне (около 11ГГц). Выполнить сравнение результатов с теоретическими оценками параметров ДН.

б) измерение ДН расфокусированных антенн

9. Выполнить расфокусировку однозеркальной антенны путем смещения облучателя из фокуса вдоль оси. Измерить центральные сечения ДН антенны с зеркалом 2,0 метра в двух ортогональных плоскостях (по азимуту и по углу места) по радиоизлучению геостационарного ИСЗ в С- , либо Ку- диапазоне. Выполнить сравнение результатов с ДН сфокусированной антенны.
10. Выполнить расфокусировку двухзеркальной антенны путем смещения вторичного зеркала вдоль оси. Измерить центральные сечения ДН антенны с зеркалом 2,5 метра в двух ортогональных плоскостях (по азимуту и по углу места) по радиоизлучению геостационарного ИСЗ в С- , либо Ку- диапазоне. Выполнить сравнение результатов с ДН сфокусированной антенны.

в) измерение шумовой температуры антенны

11. Измерить шумовую температуру одной из зеркальных антенн в С- , либо Ку- диапазоне. Измерения выполнить с использованием калиброванного генератора шума.

г) измерение плотности потоков внеземных радиоисточников

12. Измерить приращение шумовой температуры одной из зеркальных антенн при приеме радиоизлучения Солнца в С- , либо Ку- диапазоне. Исходя из теоретической оценки КУ соответствующей антенны, произвести расчет спектральной плотности потока радиоизлучения Солнце на рабочей частоте. Измерения выполнить с использованием калиброванного генератора шума.

## СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фрадин А.З., Рыжков Е.В. Измерение параметров антенно-фидерных устройств. – М.: Связь, 1972. —352с
2. Захарьев Л.Н., Леманский А.А., Турчин В.И., Цейтлин Н.М., Щеглов К.С. Методы измерения характеристик антенн СВЧ. /Под ред. Н.М.Цейтлина. – М. Радио и связь, 1985.–368с.
3. Бахрах Л.Д., Кременецкий С.Д., Курочкин А.П., Усин В.А., Шифрин Я.С. Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне.– Л.:Наука, 1985.—272с.
4. Троицкий В.С. Радиоастрономические методы исследования антенн. Радиотехника и электроника. 1956, т.1., №5,с 601.
5. Цейтлин Н.М. Развитие и разработка радиоастрономических методов антенных измерений в научно-исследовательском радиофизическом институте (НИРФИ). Препринт N 357, НИРФИ, Нижний Новгород, 1993, 14с.
6. Радиоголографический контроль крупных радиотелескопов. Материалы международного совещания. Нижний Архыз, 1990. – Л.: Наука, 1991. — 135с.
7. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. Учебник для ВУЗов. М.: Энергия, 1975. —528с.
8. Христиансен У., Хегбом И. Радиотелескопы/ Перевод с англ. под ред. А.А.Пистолькорса. – 2-ое изд. – М.: Мир, 1988. – 304с.
9. Smith P. Measurement of the complete far-field pattern of large antennas by radio sources. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1966, v.AP-14, n.1, p.6–16.
10. Мальцев В.П., Щеглов К.С. Корреляционные радиометры в технике антенных измерений. Антенны, 1997, в.2(39), с.57–62.
11. Калинин А.В., Мальцев В.П., Щеглов К.С. Исследование характеристик крупногабаритной зеркальной антенны корреляционным радиоастрономическим методом. Радиотехника и электроника, №5, 2007г., с.545-562.
12. Калинин В.А., Беагон В.С., Калинин А.В. Корреляционный радиометр для антенных и интерферометрических измерений. Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского, 2011г., №5(3), с.88-94

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК ПО АНТЕННОЙ ТЕМАТИКЕ

1. Кузьмин А.Д., Саломонович А.Е. Радиоастрономические методы измерений параметров антенн. – М.: Сов. радио, 1964.— 184с.
2. Цейтлин Н.М. Применение методов радиоастрономии в антенной технике. – М.: Сов. радио, 1966.— 214с.
3. Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. Радиотелескопы и радиометры. –М.: Наука, 1973. –416с.
4. Цейтлин Н.М. Антенная техника и радиоастрономия.– М: Сов. радио, 1976.–350с.
5. Христиансен У., Хегбом И. Радиотелескопы/ Перевод с англ. под ред. А.А.Пистолькорса. – 2-ое изд. – М.: Мир, 1988. – 304с.
6. Томпсон А.Р., Моран Д.М., Свенсон Д.У. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии/ Перевод с англ. под ред. Л.И.Матвеевко. – 2-ое изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 624с.
7. Антенны сантиметровых волн: Перевод с англ. под ред. Я.Н.Фельда. В 2-х ч. М.: Сов радио, 1950, ч.1, 320с, ч.2, 258с.
8. Фельд Я.Н., Бененсон Л.С. Антенны сантиметровых и дециметровых волн. В 2-х ч. Ч.1. М.: ВВИА им. Н.Е.Жуковского, 1955.—208с.
9. Фельд Я.Н., Бененсон Л.С. Основы теории антенн. Учебное пособие для вузов. 2-изд., М., Дрофа, 2007г., 491с.
10. Айзенберг Г.З., Ямпольский В.Г., Терешин О.Н. Антенны УКВ./Под. ред. Г.З. Айзенберга. В 2-х ч. Ч1. М.: Связь, 1977.— 384с.
11. Кюн Р. Микроволновые антенны. – М.: Судостроение, 1967.
12. Бахрах Л. Д., Галимов Г. К. Зеркальные сканирующие антенны. Теория и методы расчета– М.: Наука, 1981. 302с.
13. Справочник по антенной технике: Справ. в 5 т. Т.1./ Л.Д.Бахрах, Л.С.Бененсон, Е.Г.Зелкин и др.; Под. ред. Я.Н.Фельда, Е.Г.Зелкина. М.: ИПРЖР, 1997. 256с.
14. А.Г.Кисляков, В.А.Разин, Н.М.Цейтлин. Введение в радиоастрономию. Часть 1. Основы радиоастрономии. Учебник для ВУЗов. Нижний Новгород: издательство Нижегородского университета. М: ФИЗМАТЛИТ.1995.-212с.
15. А.Г.Кисляков, В.А.Разин, Н.М.Цейтлин. Введение в радиоастрономию. Часть 2. Техника радиоастрономии. Учебник для ВУЗов. Нижний Новгород: издательство Нижегородского университета. М: ФИЗМАТЛИТ.1996.196с.
16. Д. И. Воскресенский, В. Л. Гостюхин, В. М. Максимов, Л. И. Пономарёв. Устройства СВЧ и антенны. Учебник для ВУЗов. Изд.3. 2008, 384с.

17. 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, pp. 461–474.
18. Куммер В.Х., Джиллеспи Э.С. Антенные измерения –78. *ТИИЭР*, 1978, т.66, №4, с.143–173.
19. Турчин В.И., Цейтлин Н.М. Амплифазометрический метод антенных измерений (обзор). – *Радиотехника и электроника*, 1979, т.24, №12, с.2381–2413.
20. Курочкин А.П. Состояние и перспективы развития методов измерений внешних параметров антенн (обзор). В сб. *Антенны/Под ред. А.А.Пистолькорса*. – М.: Радио и связь, 1982, №30, с.46–65.
21. Воронин Е.Н., Нечаев Е.Е. Современные методы антенных измерений. – *Зарубежная радиоэлектроника*, 1984, №1, с.26–42.
22. Воскресенский Д.И., Воронин Е.Н., Комаров В.М., Нечаев Е.Е. Измерение внешних характеристик антенн с учетом искажающих факторов (обзор). *Изв. ВУЗов. Сер. Радиоэлектроника*, 1984, т.27, №2, с.4–19.
23. Пистолькорс А.А., Бахрах Л.Д., Курочкин А.П. Развитие отечественной антенной техники (к 100-летию изобретения радио). *Радиотехника*, 1995, № 7–8, с. 26–41// *Антенны* 1997, № 1 (38), с.85–100.
24. Курочкин А.П. Антенные измерения–97. *Антенны*, 1997, № 1(38), с.5–24.
25. Hartsuijker A.P., Baars J.W.M., et al. Interferometric measurements at 1415 MHz of radiation pattern of paraboloidal antenna at Dwingeloo radio observatory. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1972, v.AP-20, p.166-176.
26. Bennet J.C., Anderson A.P., McInnes P.A., Whitaker A.J.T. Microwave holographic metrology of large reflector antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1976, v.AP-24, n.3, p.295–303.
27. Scott P.F., Ryle M. A rapid method for measuring the figure of a radio telescope reflector. *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, 1977, v.178, p.539–545.
28. Godwin M.P., Whitaker A.J.T., Bennett J.C., Anderson A.P. Microwave diagnostics of the Chilbolton 25 m antenna using the OTS satellite. *Proc. IEE Int. Conf.*, York, England, 1981, p.232–236.
29. Rahmat-Samii Y., Gulkis S., Levy G.S., Seidel B.L. et al. Microwave holographic surface measurement of the Tidbinbilla 64-m antenna. *Proc. Astron. Society of Australia*, 1983, n.5(2), p.270–272
30. Elder J., Lundahl L., Morris D. Test of phase-retrieval holography on the Onsala 20-m radiotelescope. *Electronics letters*, August 1984, v.20, n.17, p.709–710.
31. Morris D. Phase retrieval in the radio holography of reflector antennas and radio

- telescopes. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1985, v.AP-33, n.7, p.749-755.
32. Rahmat-Samii Y. Microwave holography of large reflector antennas –simulation algorithms. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1985, v. AP-33, n.11, p.1194-1203.
  33. Rahmat-Samii Y. Surface diagnosis of large reflector antennas using microwave holographic metrology — an iterative approach. Radio Science, 1984, v.13, n.4, p.1205—1217.
  34. Godwin M.P., Schoessow E.P., Grahl B.H. Improvement of the Effelsberg 100 meter telescope based on holographic reflector surface measurements. Astron. and Astrophys., 1986, p.390-394.
  35. Padin S., Davis R.J., Lasenby A.N. The Jodrell Bank wide-band interferometers and their application to surface profile measurements of the telescopes. Monthly Notices Roy. Astron. Soc., 1987, v.227, p.685-699.
  36. Morris D., Baars J.W.M., Hein H. et al. Radio-holographic reflector measurement of the 30-m millimeter radio telescope at 22 GHz with a cosmic signal source. – Astronomy and Astrophysics, 1988, v.203, n.2, p.399-406.
  37. Wellington K.J., Kesteven M.J., Calabretta M. et al. A holography study of the Parkes 64m reflector. Proc. Astron. Society of Australia, poster paper, august 1988.
  38. Thomas B.M., Schafer J.T., Sinclair M.W., Kesteven M.J., Hall P.J. The Parkes radio telescope modified for rapid receiver changes. IEEE Antennas and Propagation Magazin, 1997, v.39, n.2, p.54-63.
  39. Rochblatt D.J., Rahmat-Samii Y. Effects of measurement errors on microwave antenna holography. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1991,v.AP-39,n.7,p.933-942.
  40. Rochblatt D.J., Seidel B.L. Microwave antenna holography. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1992, v. MTT-40, n.6, p.1294-1300.
  41. James G.C., Poulton G.T., McCulloch P.M. Panel setting from microwave holography by the method of successive projections. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1993, v. AP-41, n.11, p.1523-1529.
  42. Tarchi D., Comoretto G. Holographic measurements on Medicina radio telescope using artificial satellites at 11 GHz. Astronomy and Astrophysics, 1993, p.679-685.
  43. Ukita N., Tsuboi M. A 45-meter telescope with a surface accuracy of 65 mkm. Nobeyama radio observatory report N 346, 1994.
  44. Bucci O.M., Elia G.D., Romito G. Reflector distortions diagnosis from far-field

- amplitude pattern. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1995, v. AP-43, n.11, p.1217–1225.
45. Leone G., Pierri R. Reflector antenna diagnosis from phaseless data. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1997, v. AP-45, n.8, p.1236–1244.
  46. Serabyn E., Phillips T.G., Mason C.R. Surface figure measurements of radio telescopes with a shearing interferometer,” Applied optics, vol. 30, pp. 1227–1241, April 1991.
  47. Богомолов А.Ф., Попереченко Б.А., Соколов А.Г. Следящий параболический радиотелескоп ТНА–1500 диаметром 64м. В сб. Антенны/Под ред. А.А.Пистолькорса. –М.: Радио и связь, 1982, №30, с.3–13.
  48. Поляк В.С., Соколов А.Г. Конструкция зеркального радиотелескопа ТНА–1500. В сб. Антенны/Под ред. А.А.Пистолькорса. –М.: Радио и связь, 1982, №30, с.13–26.
  49. Попереченко Б.А. Большие зеркальные антенны.– В кн.: Проблемы антенной техники. Под ред. Л.Д.Бахраха и Д.И.Воскресенского. –М.: Радио и связь, 1989.
  50. Гришмановский В.А., Козлов А.Н., Тарасов В.Б. Зеркальная система радиотелескопа РТ–70. Известия ВУЗов Радиофизика, 1973, т.16, №12, с.1909–1913.
  51. Асланян А.М., Гулян А.Г., Козлов А.Н. и др. Измерение основных параметров антенны РТ-70. Изв. ВУЗов Радиофизика, 1984, т.27, №5, с.543–549
  52. 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
  53. Калинин А.В. Радиоголографический метод измерения характеристик антенн радиотелескопов. Антенны, 1998, №2(41), с.51–67.
  54. Калинин А.В., Беагон В.С., Кисляков Г.А., Мальцев В.П. Разработка радиоастрономического корреляционного метода измерения характеристик зеркальных антенн. Изв. ВУЗов Радиофизика, 2002, т.45, №4, с.279–288.
  55. Калинин А.В., Попереченко Б.А., Беагон В.С., Калинина Е.Е., Мальцев В.П., Сапожников Б.Д. Результаты голографических измерений характеристик 64-метровой антенны ТНА–1500 в Калязине. Электромагнитные волны и электронные системы, 2004г, №11, с.30-34.
  56. Калинин А.В., Попереченко Б.А. Технологии высокоточных голографических измерений характеристик 64-метровых антенн ТНА–1500. Электромагнитные волны и электронные системы, 2004г, №12, с.33—39.
  57. J.W.M.Baars, R.Lucas, J.G.Mangum, J.A.Lopez-Perez. Near field holography of large

reflector antennas. IEEE Ant. and Propagation Magazine. Oct. 2007, v.49, n.5, 14p.

58. Nolic B., Prestage R.M., Balser D.S., Chandler C.J., Hills R.E. Out-of-focus holography at the Green Bank telescope.- Astronomy and Astrophysics, 2007, v.465, n2(April II), p.685–693.
59. Калинин А.В. Радиоголография больших антенн. Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского, 2011г., №5(3), с.175-182.