

Министерство науки и технологии
Государственный астрономический институт им. П.К Штернберга
Специальная астрофизическая обсерватория
Учебно-научный центр коллективного пользования на базе САО –
“Наземная астрономия”

В.К. Конникова

Конспект лекций по практической радиоастрономии

Нижний Архыз
1999

УДК 52.77
ББК 22.63
К64

В.К Конникова. Конспект лекций по практической
К 64 радиоастрономии. – Нижний Архыз: Компьютерный
информационно-издательский центр “CYGNUS”, 1999. – 84 с.

Издание представляет собой конспект лекций по практической радиоастрономии, читаемых автором на астрономическом отделении физического факультета МГУ. В конспекте кратко изложены основные понятия радиоастрономии, рассмотрены различные типы антенн и приемников, на которых проводятся наблюдения источников радиоизлучения, в том числе и антенн апертурного синтеза, методы наблюдения и обработки полученных материалов. Основная цель издания – дать студентам необходимые для практической работы понятия, формулы, графики, методы. Конспект может также помочь астрономам, специализирующимся в других областях, более эффективно провести наблюдения на радиотелескопе и обработать полученные материалы. Библ. 11.

ББК 22.63

*Издание осуществлено при содействии программы
государственной поддержки интеграции высшего
образования и фундаментальной науки.*

Оглавление

1 Основные открытия в радиоастрономии. Основные понятия радиоастрономии. Прохождение радиоволн через атмосферу.	5
1.1 Основные открытия в радиоастрономии	5
1.2 Основные понятия радиоастрономии	6
1.2.1 Поток радиоизлучения	7
1.2.2 Яркость и яркостная температура радиоисточника	7
1.2.3 Шумовая температура	8
1.2.4 Радиоспектр	8
1.2.5 Радиополнии межзвёздных молекул	9
1.2.6 Поляризация радиоволн	9
1.2.7 Угловое разрешение	10
1.3 Прохождение радиоволн через атмосферу	10
1.3.1 Ослабление излучения	11
1.3.2 Собственное излучение атмосферы	11
1.3.3 Радиорефракция	12
2 Антенны радиотелескопов	15
2.1 Основные параметры антенн	15
2.1.1 Ближняя и дальняя зоны антенны	15
2.1.2 Диаграмма направленности радиотелескопа.	16
2.1.3 Эффективная площадь антенн.	17
2.1.4 Шумовая температура антенны.	19
2.2 Антенна – объект – изображение	21
2.2.1 Два способа получения изображения	24
2.2.2 Второй подход к формированию изображения	25
2.3 Типы антенн с заполненной апертурой	27
2.3.1 Параболоиды вращения	27
2.3.2 Антенны с плоским отражателем	29
2.3.3 Земляные чаши.	30
2.3.4 Рефракторы (синфазные антенны).	31
2.4 Путаница	32

3	Приёмники космического радиоизлучения	35
3.1	Отличие космического сигнала от телерадиовещания	35
3.2	Элементы радиометров	43
3.2.1	Генератор шума полупроводниковый (ГШП)	43
3.2.2	Модулятор (М)	44
3.2.3	Генератор опорного напряжения (ГОН)	44
3.2.4	Усилители высоких и сверхвысоких частот (УВЧ)	44
3.2.5	Синхронный детектор (СД)	45
3.2.6	Выходной фильтр	46
3.3	Приёмники для радиолиний	47
3.3.1	Акусто-оптические спектрометры	48
3.4	Приёмники миллиметрового диапазона	49
4	Апертурный синтез	51
4.1	Двухэлементный интерферометр с переменной базой	51
4.2	Основные схемы интерферометров	55
4.3	Радиотелескопы апертурного синтеза (или радиотелескопы с незаполненной апертурой)	57
4.4	Радиотелескоп РАТАН-600	61
5	Методы наблюдения и обработка	63
5.1	Измерение параметров антенн	63
5.2	Методы наблюдений радиоисточников	65
5.3	Обработка наблюдений	66
5.4	Абсолютные измерения потоков	71
5.5	Измерение поляризации	72
5.5.1	Линейная поляризация	72
5.5.2	Круговая поляризация	73
5.5.3	Параметры Стокса	73
6	Радиообзоры неба	75
6.1	Методы проведения обзоров. Имена радиоисточников	75
6.1.1	Методика проведения обзора	75
6.1.2	Имена радиоисточников	76
6.2	Полнота обзора	76
6.3	Подсчёты радиоисточников	77
6.4	Оптические отождествления радиоисточников	80
6.5	Наиболее известные и полные обзоры неба	81

Глава 1

Основные открытия в радиоастрономии. Основные понятия радиоастрономии. Прохождение радиоволн через атмосферу.

1.1 Основные открытия в радиоастрономии

1932 г. Первая публикация о радиоизлучении от источника, расположенного за пределами Земли примерно в области центра нашей Галактики. Американский радиоинженер Карл Янский обнаружил это излучение при исследовании помех для фирмы Bell с помощью вращающейся антенной решетки 30.5 x 3.7 м на волне $\lambda = 14.6$ м. Ширина луча антенны составляла 27° .

1944 г. Опубликованы первые радиокарты неба на волне 1.87 м. Обнаружено радиоизлучение Солнца. В 1937 г. Грот Ребер, радиоинженер из США заинтересовавшись работой Янского, сконструировал во дворе своего дома антенну с параболическим рефлектором диаметром 9.5 м и приемник на 9.1 см. Тогда считалось, что радиоизлучение может иметь только тепловую природу и, следовательно, на коротких волнах должно быть сильнее.

Однако на волне 9.1 см не удалось обнаружить радиоизлучение Галактики. Только перестроив приемник на волну 1.87 м, Ребер обнаружил это радиоизлучение.

Статья Ребера сначала была отклонена редакцией *Astrophysical Journal* и опубликована лишь в 1944 г. решением редактора журнала Отто Струве.

Голландский ученый Ван де Хюлст предсказал возможность радиоизлучения межзвездного нейтрального водорода на волне 21 см.

1946 г. Обнаружено радиоизлучение из области в созвездии Лебедя, впоследствии отождествленной с галактикой.

1947 г. В Англии закончено строительство частично подвижного 67-м параболического радиотелескопа.

1951 г. Первый космический радионисточник отождествлен с другой галактикой – Лебедь-А, 17 зв.вел. (Бааде, Минковский).

Обнаружена радиолиния нейтрального водорода 21 см. Гарвардский университет, США, Юэн и Перселл.

1957 г. Пуск первого подвижного радиотелескопа – параболоида диаметром 76 м в Джодрелл Бэнк, Англия.

1961 г. Дискретный космический радионисточник отождествлен со звездообразным оптическим объектом (3С 48). Мэттьюз и Сэидейдж, обсерватории Маунт Вилсон и Маунт Паломар, США.

1963 г. Обнаружена линия гидроксила ОН 18 см.

1965 г. Открытие переменности потока ряда космических источников радиоизлучения на сантиметровых волнах Дентом, США.

Открытие фонового микроволнового радиоизлучения в эксперименте по программе спутниковой связи ТЕЛСТАР. Излучение с температурой примерно 3 град. предсказано в 1948 г. Гамовым и Альфвенем, исходя из теории "горячей Вселенной".

1967 г. Открытие пульсаров в обсерватории Джодрелл Бэлл, Англия. При исследовании спинцилляций радиоизлучения на солнечной плазме аспирантка профессора Хьюиша Джоцелин Белл обнаружила неизвестный источник, который показывал спинцилляцию ночью! Наблюдались короткие (длительностью примерно 50 миллисекунд) импульсы, повторяющиеся через строго постоянный период около 1 сек. Предположений было много, в том числе и внеземные цивилизации.

До выяснения природы импульсов публикация результатов была задержана. Открытые источники получили название пульсары. Только в 1968 г. были опубликованы результаты и первый пульсар отождествлен со звездой в остатке сверхновой.

В дальнейшем развитие радиоастрономии шло по пути открытий новых и исследований известных объектов, расширения методов наблюдений (например, метод апертурного синтеза, межконтинентальная интерферометрия). С развитием техники многократно увеличилась чувствительность приемных устройств и возросло угловое разрешение радиотелескопов.

1.2 Основные понятия радиоастрономии

Объекты, исследуемые в радиоастрономии:

Галактические объекты:

– Эмиссионные и планетарные туманности, имеющие тепловые спектры.

- Остатки вспышек сверхновых звезд, имеющие синхротронные спектры.
- Планеты солнечной системы, имеющие тепловые и нетепловые (планеты-гиганты) спектры.
- Пульсары – нейтронные звезды.
- Вспыхивающие звезды, дающие короткие редкие вспышки нетеплового радиоизлучения.
- Межзвездный газ, дающий излучение в линиях в радиодиапазоне.
- Синхротронное излучение релятивистских электронов в магнитных полях Галактики.

Дискретные внегалактические объекты, излучение которых имеет синхротронную природу:

Абсолютные радиосветимости

Объекты	Вт/Гц на частоте 178 МГц	$L_{\text{радио}}/L_{\text{опт}}$	число на Мпс ³
Активные квазары	$10^{27} - 10^{29}$	$10^2 - 10^4$	$3 \cdot 10^{-7}$
Радиоспокойные квазары	$< 10^{22}$	$\leq 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-7}$
Радиогалактики	$10^{23} - 10^{28}$	$10^2 - 10^4$	$2 \cdot 10^{-4}$
Нормальные галактики	$10^{17} - 10^{23}$	$10^{-2} - 10^1$	$2 \cdot 10^{-4}$
Лацертиды	$10^{23} - 10^{28}$	$10^2 - 10^4$	

Помимо дискретных объектов наблюдается тепловое фоновое излучение с температурой 2.7 К.

1.2.1 Поток радиоизлучения

Длину волны мы обозначаем через λ , а частоту — посредством ν . Поток радиоизлучения — это энергия, приносимая за 1 сек на площадку 1 м² волнами, частоты которых находятся в интервале 1 Гц. Потоки измеряются в Янских, 1 Ян = 10^{-26} Вт/м² Гц. Самый яркий источник — Солнце. Его интегральный поток на сантиметровых волнах достигает 10^8 Ян. С помощью современных антенн и приемников, используя накопление сигнала, регистрируют потоки до микроянских.

1.2.2 Яркость и яркостная температура радиоисточника

Яркость $B(\theta, \varphi)$ — это энергия излучения, приходящего из единичного телесного угла в единичном интервале частот на единицу поверхности за одну секунду. Она измеряется в единицах Вт/(м² Гц · стер). Интеграл от яркости по всему источнику дает полный поток радиоизлучения:

$$S = \int \int_{\Omega_{\text{ист}}} B(\theta, \varphi) \cos \theta d\Omega, \quad d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi - \text{элемент телесного угла}$$

Так как почти все радиоисточники имеют небольшие угловые размеры, то $\cos \theta \approx 1$, и часто встречается формула:

$$S = \int \int_{\Omega_{\text{ист}}} B(\theta, \varphi) d\Omega,$$

При равномерном распределении яркости по источнику:

$$S = B \cdot \Omega_{\text{ист}}$$

Яркостная температура T_* — это температура черного тела, которое на данной частоте дает такую же плотность потока радиоизлучения, что и рассматриваемый источник. Она вводится формально по формуле Релея-Джинса, даже если излучение нетепловое.

$$B(\theta, \varphi) = \frac{2kT_*(\theta, \varphi)}{\lambda^2} ; S = \frac{2k}{\lambda^2} \int \int_{\Omega_{ист}} T_*(\theta, \varphi) d\Omega .$$

Если распределение яркости по источнику постоянно, то

$$S = \frac{2kT_*}{\lambda^2} \cdot \Omega_{ист} .$$

1.2.3 Шумовая температура

При проведении наблюдений любое излучение, кроме исследуемого, является для нас помехой. Обычно мешающее излучение (атмосферы, Галактики, приемников, и т.д.) является широкополосным и характеризуется мощностью шума $P_{ш}$.

Чаше вместо мощности шума используют понятие шумовой температуры, которое вводится формально по формуле Найквиста: на сопротивлении, нагретом до температуры $T_{физ}$, выделяется спектральная мощность $P = kT_{физ}(B/\Gamma)$. По этой формуле, зная шумовую температуру, можно рассчитать мощность шума.

Если источник излучения оптически плотный, то ^{яркости} шумовая температура равна температуре источника. Пример — излучение Земли. В общем случае

$$T_{ш} = T_{физ} (1 - e^{-\tau}) .$$

Таким образом, при одинаковых значениях температуры Земли и воздуха, ^{шумовая} шумовая температура атмосферы значительно ниже, чем Земли.

Шумовая температура состоит из постоянной и флуктуационной составляющих. Постоянную составляющую всегда можно измерить и скомпенсировать, а флуктуация $\delta T_{ш}$ дает шумовой фон, на котором мы принимаем исследуемое излучение.

1.2.4 Радиоспектр

Спектр объекта — это зависимость потока от частоты. В радиодиапазоне спектр получается по большому числу отдельных наблюдений на разных частотах. Каждая точка в спектре получается с помощью отдельного приемника, настроенного на данную частоту. Для получения полного спектра в радиодиапазоне от десятков Мегагерц до сотен Гигагерц приходится проводить наблюдения на разных антеннах, так как ни один радиотелескоп не перекрывает весь радиодиапазон.

Спектр источника отражает природу его радиоизлучения. Введём спектральный индекс по формуле:

$$S \sim \nu^\alpha .$$

В логарифмическом масштабе величина α равна тангенсу угла наклона спектра.

Форма спектра теплового радиоизлучения зависит от температуры и оптической глубины источника. Спектр оптически плотного тела описывается универсальной формулой Рэлея-Джинса, в которой поток пропорционален ν^2 . Этот участок соответствует области слева от частоты максимума на рис.1.1(а). На высоких частотах (справа от частоты максимума) газ становится прозрачным и излучает не как чёрное тело: его спектр зависит от конкретного механизма. Например, в случае тормозного излучения $\alpha \approx 0.1$. В случае синхротронного излучения, то есть излучения релятивистских элек-

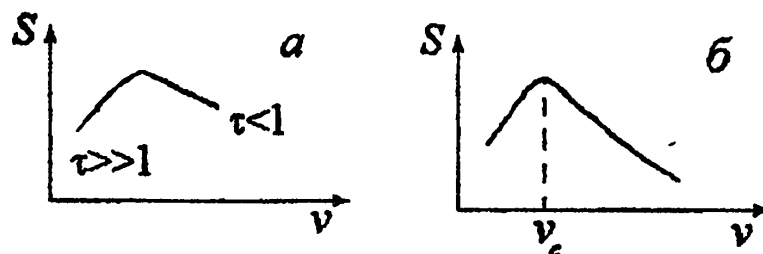
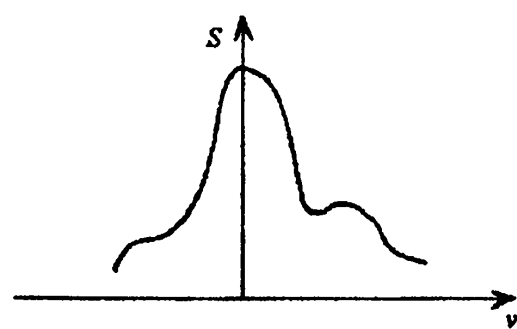


Рис. 1.1: Спектры радиоисточников: а – тепловой, б – синхротронный.

тронов в магнитном поле, величина α определяется показателем спектра электронов γ , а именно, $\alpha = -(\gamma - 1)/2$. При малой оптической глубине внутри источника ($\tau < 1$) поток уменьшается с увеличением частоты; значение спектрального индекса у большинства источников находится в пределах от -0.5 до -1.2 . Но если на частотах $\nu < \nu_c$ источник становится оптически плотным ($\tau > 1$), то поток радиоизлучения падает с уменьшением частоты. Это явление называется синхротронным самопоглощением. На рис. 1.1(б) показан спектр источника синхротронного излучения с самопоглощением. Частота ν_c зависит от углового размера источника, потока его радиоизлучения и величины магнитного поля в источнике.

1.2.5 Радиолинии межзвёздных молекул

Профиль линии – это зависимость интенсивности излучения от частоты. Собствен-



ная ширина линии излучения одной молекулы очень мала. Однако тепловое движение отдельных молекул и движение излучающих облаков g за приводит к доплеровскому уширению линии. Поэтому профиль и ширина линии отражают распределение скоростей излучающего газа. Профиль оцифровывается в единицах лучевой скорости, связанной с частотой формулой Доплера $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$.

Рис. 1.2: Профиль радиолинии.

1.2.6 Поляризация радиоволн

Степень поляризации p — это отношение мощности поляризованной компоненты к полной мощности излучения. Поляризация может быть вызвана самим механизмом радиоизлучения источника или возникать при прохождении радиоволн к наблюдателю.

Волны, излучаемые радиисточниками, обычно бывают частично линейно поляризованными и характеризуются степенью поляризации и позиционным углом поляризации. Позиционный угол ψ поляризации – угол на небесной сфере между электрическим вектором поляризованного излучения и кругом склонений, проходящий через источник, отсчитывается от точки юга против часовой стрелки (рис. 1.3.) Любое состояние поля-

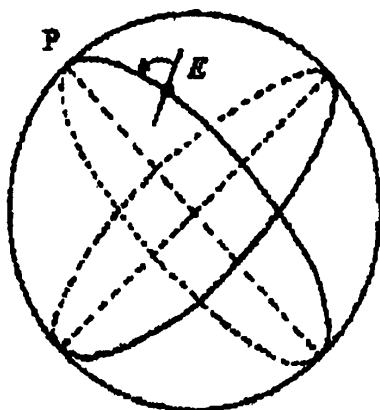


Рис. 1.3: Направление вектора поляризации.
Степень поляризации

$$p = \frac{I_x - I_y}{I_x + I_y}$$

I_x и I_y – интенсивность радиоизлучения в направлении совпадающем с плоскостью поляризации и в ортогональном направлении.

ризации, как линейной, так и круговой, характеризуется четырьмя параметрами Стокса, которые будут рассмотрены позже.

1.2.7 Угловое разрешение

Угловое разрешение телескопа определяется отношением длины волны к диаметру зеркала. Использование методов интерферометрии и апертурного синтеза позволяет исследовать структуру радиисточников с разрешением в тысячные доли угловой секунды. Например, с помощью межконтинентальной интерферометрии на длине волны 6 см достигнуто разрешение 0''0006.

1.3 Прохождение радиоволн через атмосферу

На рис. 1.4 представлена относительная прозрачность атмосферы в зависимости от длины волны: Длинноволновая граница окна пропускания определяется отражением от

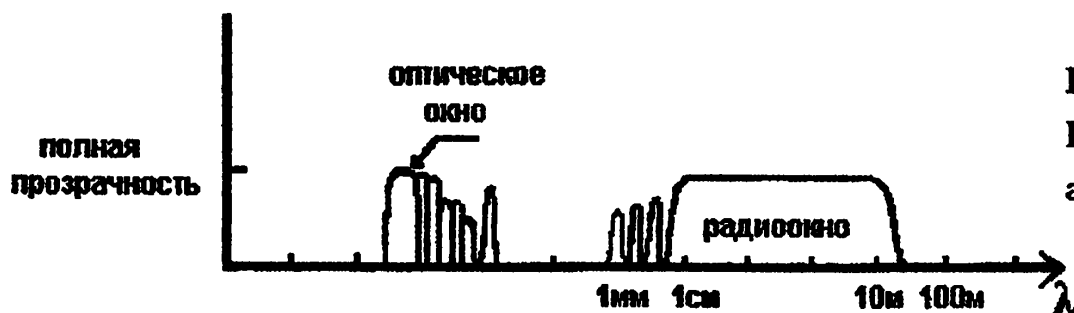


Рис. 1.4:
Прозрачность атмосферы.

ионосферы. В зависимости от условий в ионосфере граница пропускания может смещаться до длин волн 15–20 м. Коротковолновая граница определяется поглощением молекулами воздуха. В области миллиметровых волн есть несколько полос пропускания. В пределах полосы пропускания влияние атмосферы сказывается двояким способом:

ослабление радиоизлучения объекта и собственное излучение атмосферы. Рассмотрим оба эффекта.

1.3.1 Ослабление излучения

Ослабление космического радиоизлучения на фиксированной длине волны зависит от давления, влажности и температуры атмосферы. Поглощение радиоволн обусловлено в основном наличием в атмосфере кислорода и воды. На рис. 1.5 показано поглощение

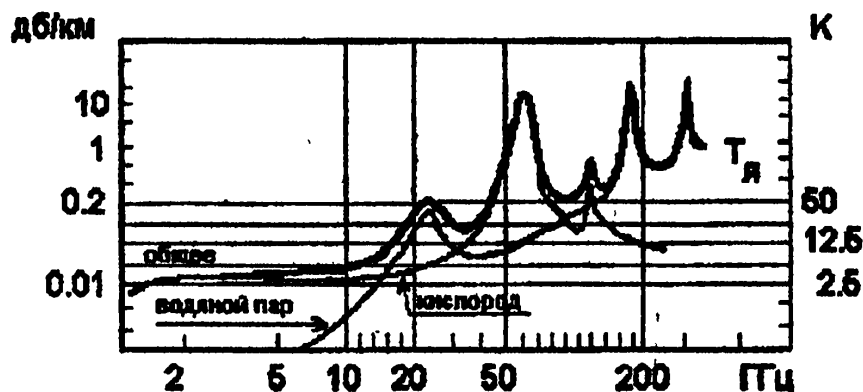


Рис. 1.5:
Поглощение
радиоволн
в атмосфере.

этим компонентами и общее поглощение атмосферы в зависимости от частоты.

1.3.2 Собственное излучение атмосферы

Атмосфера сама является источником шумов. Величину этого шума принято характеризовать яркостной температурой на уровне Земли — $T_{\text{атм}}$:

$$T_{\text{атм}} = \bar{T}_{\text{физ}}(1 - e^{-\tau}), \quad \tau = \int_0^{\infty} \kappa dr,$$

где τ — оптическая глубина атмосферы, κ — коэффициент поглощения радиоволн в атмосфере, $\bar{T}_{\text{физ}}$ — среднее значение температуры атмосферы (температура изотермической атмосферы). Для малых значений оптической глубины верно $T_{\text{атм}} \approx T_{\text{физ}} \cdot \tau$,

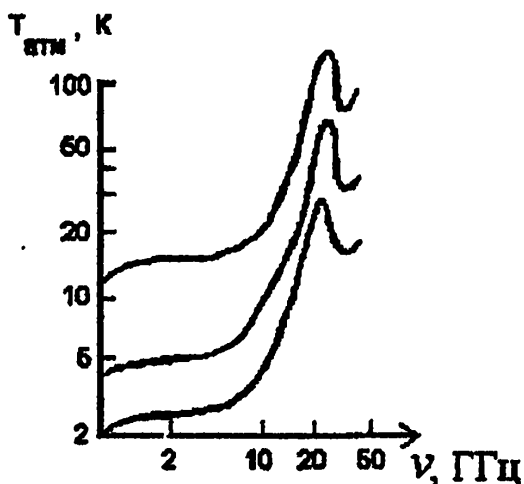


Рис. 1.6: Излучение атмосферы.

где $T_{\text{физ}}$ — температура атмосферы. Наиболее сильно шумы атмосферы сказываются в миллиметровом диапазоне волн. На рис. 1.6 приведены графики яркостной температуры стандартной атмосферы в зависимости от частоты для разных высот. Для углов места $5^\circ \leq h \leq 90^\circ$ температура излучения на разных высотах h равна: $T_{\text{атм}}(h) \approx \frac{T_{\text{атм}}^z}{\sin h}$, где $T_{\text{атм}}^z$ — температура излучения в зените. Если бы шумовая температура атмосферы была строго постоянной, ее можно было бы учесть.

Реально $T_{\text{атм}}$ состоит из двух частей – постоянной составляющей $T_{\text{атм}}^0$ и флуктуаций $\delta T_{\text{атм}}$. Для безоблачной атмосферы флуктуации яркостной температуры атмосферы примерно равны $\delta T_{\text{атм}} \approx T_{\text{атм}} \cdot \sqrt{\cos z} \cdot 10^{-2}$, где z – зенитное расстояние. Наличие облачности резко увеличивает флуктуации шумовой температуры. Специальные методы приема радиоизлучения и обработки данных позволяют значительно уменьшить эти флуктуации.

Кроме излучения атмосферы, в суммарную шумовую температуру неба включаются шумы Метагалактики (реликтовый фон 2.7 К) и шумы Галактики – $T_{\text{косм}}$, которые при исследовании отдельных радиоисточников являются помехой. Суммарная шумовая температура неба равна:

$$T_{\text{ш}}^{\text{н}} = \underbrace{T_{\text{косм}} \cdot e^{-\tau}}_{\text{ослабленное космическое излучение}} + \underbrace{\bar{T}_{\text{физ}} \cdot (1 - e^{-\tau})}_{\text{излучение атмосферы}}$$

На рис. 1.7 приведена суммарная шумовая температура неба в зависимости от частоты (сплошные линии) для различных областей неба. Итак, суммарная шумовая температура атмосферы складывается из излучения самой атмосферы и ослабленных атмосферой шумов Галактики и Метагалактики. На длинных волнах основную долю в шумовую температуру вносит синхротронное излучение Галактики, на коротких – сама атмосфера.

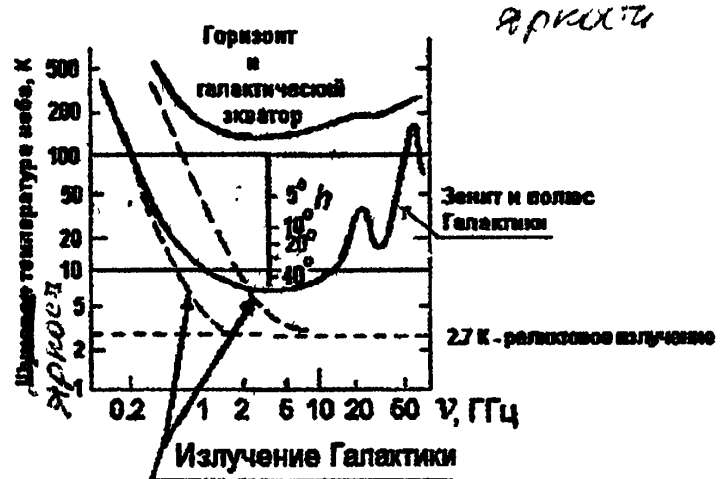


Рис. 1.7:
Суммарная шумовая температура неба.

Космическая составляющая радиоизлучения накладывает принципиальный предел на чувствительность радионаблюдений. Даже после выноса радиотелескопа за атмосферу и снижения всех остальных компонент шумов до величины близкой к нулю, шумовая температура радиотелескопа будет больше 2.7 К в миллиметровом и сантиметровом диапазонах длин волн. На длинах волн больше 30 см чувствительность будет ограничиваться, в основном, излучением Галактики.

Излучение Земли. Излучение Земли, попадающее в боковые лепестки диаграммы направленности, увеличивает шумовую температуру радиотелескопа. Эффективно излучающий слой Земли имеет небольшую толщину, поэтому его температуру можно считать постоянной, равной температуре земной поверхности. Яркостная температура Земли зависит от температуры поверхности, поляризации волны и её угла падения.

1.3.3 Радиорефракция

Рефракция в радиодиапазоне обусловлена градиентом диэлектрической проницаемости атмосферы. Тропосферная рефракция определяется нижней атмосферой и практически не зависит от длины волны (для $\lambda > 1\text{ см}$). На рис. 1.8 показана её зависимость от

высоты наблюдения на волнах 3 см – 1.5 м. Ионосферная рефракция обусловлена верхней

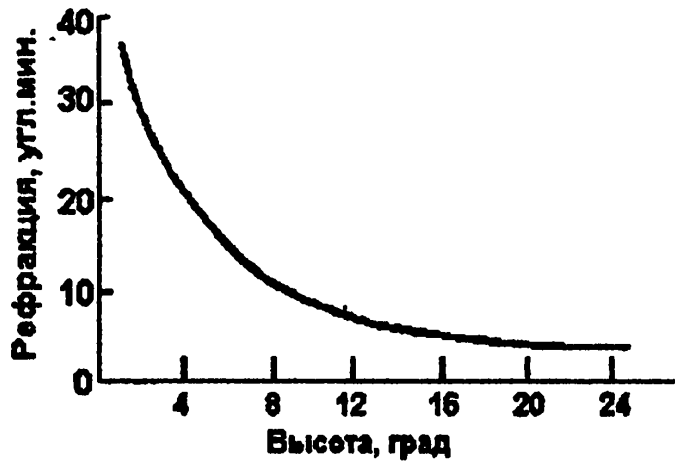


Рис. 1.8: Зависимость тропосферной рефракции от высоты наблюдения.

атмосферой, она значительна только на метровых волнах.

Видимая высота источника равна: $h^B \approx h^H + R$. Рефракция в радиодиапазоне примерно в 1.2 раза больше, чем в оптическом. До зенитных расстояний $z < 70^\circ$ её можно оценить по формуле:

$$R \approx (58''2 \operatorname{tg} z) \cdot 1.2$$

Для каждой обсерватории существует своя таблица рефракций, так как условия (высота, влажность, давление) везде разные. Место расположения радиотелескопа выбирается не только с учетом параметров атмосферы, но и с учетом помеховой обстановки в районе. Индустриальные помехи, сигналы от локаторов, спутников, автомобилей сильно ограничивают возможности радиотелескопа.

Рассеяние излучения Солнца атмосферой в радиодиапазоне практически отсутствует. Интенсивность света I , рассеянного единицей объема оптически неоднородного идеального газа (релеевское рассеяние), равна: $I = \frac{(n-1)^2}{\lambda^4 N_0}$, где n – показатель преломления среды, N_0 – число молекул в единице объема.

Ясно, что на радиоволнах интенсивность рассеянного излучения близка к нулю. Поэтому в радиодиапазоне, в отличие от оптического, можно наблюдать круглосуточно.

Приведенные формулы и графики относятся к безоблачному небу. Наличие облаков увеличивает шумовую температуру неба, но применение специальных методов приема радиоизлучения (например, диаграммная модуляция) позволяет исключить или значительно уменьшить влияние излучения облаков.

Рассеяние радиоволн на пылинках незначительно, но на коротких миллиметровых волнах начинает сказываться излучение пыли.

Антенны радиотелескопов

2.1 Основные параметры антенн

Принцип обратимости антенн: все характеристики антенны на прием и излучение абсолютно одинаковы – как антенна излучает, так и принимает.

Самым распространенным типом радиоастрономической антенны является полноповоротный параболический рефлектор. Он может использоваться как одиночная антенна или в качестве элемента больших радиотелескопов типа антенной решетки.

На примере параболоида рассмотрим основные характеристики антенн.

2.1.1 Ближняя и дальняя зоны антенны

Для очень удаленного источника можно пренебречь сферичностью фронта излучаемой волны (фронт волны – геометрическое место точек с одинаковой фазой) и считать, что принимаемое излучение имеет плоский фронт. Это дальняя зона радиотелескопа. Плоский фронт волны, приходящей из бесконечности, преобразуется в сферический поверхностью параболоида и вся энергия собирается в фокусе F радиотелескопа.

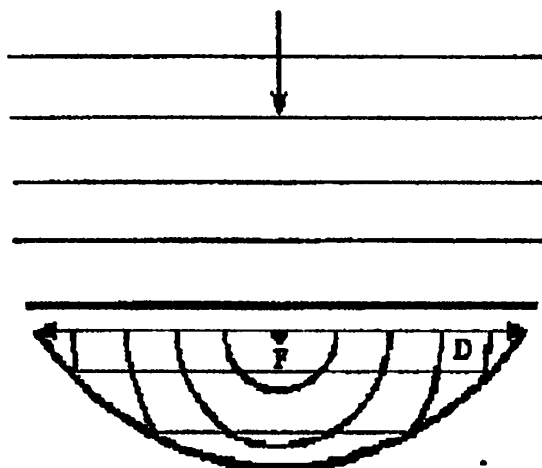


Рис. 2.1: Параболоид вращения. D – раскрыв (апертура) параболоида.

Когда сферичностью фронта волны нельзя пренебречь, то есть мы можем зарегистри-

сгруппировать разность фаз и амплитуд между излучением, падающим на центр и края антенны, речь идет о ближней зоне радиотелескопа. Граница между дальней и ближней зоной зависит от диаметра антенны D , длины волны и от нашей возможности измерять малые величины. Эту границу можно определить по формуле:

$$R \leq \frac{D^2}{\lambda} \cdot \frac{S}{N}$$

где S/N – отношение сигнал/шум.

Астрономические наблюдения проводятся в дальней зоне телескопа. В ближней зоне положение фокуса, разность фаз и амплитуд волны в центре и на краях антенны зависит от расстояния. Это может быть использовано для измерения расстояния до объекта. Сделать это можно, например, смещая положение приемника и находя положение фокуса по максимуму сигнала или вводя по раскрыву антенны компенсирующую разность фаз до получения плоского фронта.

Любой радиотелескоп может быть использован как *пассивный радиолокатор*, то есть может измерять расстояния до объектов, находящихся в его ближней зоне, не посылая к объекту сигнал. Пока для астрономических целей эта возможность не реализуется, однако при очень больших размерах антенны некоторые космические объекты могут оказаться в ближней зоне радиотелескопа.

2.1.2 Диаграмма направленности радиотелескопа.

Диаграмма направленности – кривая зависимости мощности на выходе антенны от положения источника относительно оси радиотелескопа. На рис. 2.2 показана диаграмма направленности в прямоугольных и полярных координатах и сечение диаграммы по половине мощности.

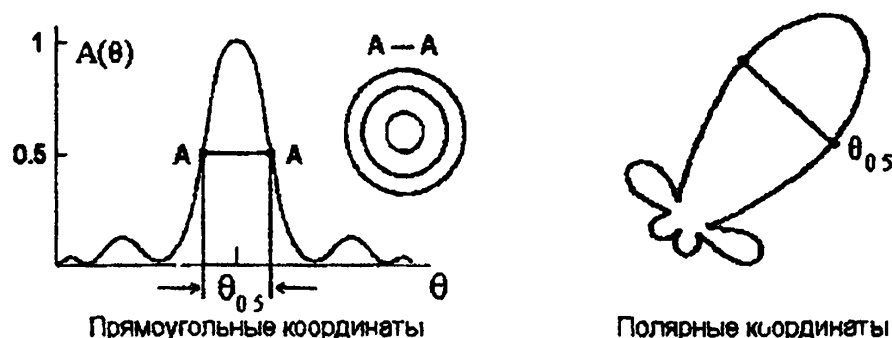


Рис. 2.2: Диаграмма направленности антенны.

Диаграмма направленности состоит из главного лепестка-луча и боковых лепестков, из которых первый самый большой. Ширина главного и боковых лепестков обычно считается по уровню половины (максимальной) мощности. Это фактически дифракционная картина за счет ограничения диаметра D телескопа. Ширина главного лепестка по по-

ловинной мощности из теории дифракции равна $\theta_{0.5} \approx \lambda/D$, уровень первого бокового лепестка 17.6 дБ (2%).

Боковые лепестки при приеме сигнала являются помехой, и их стремятся уменьшить.

Диаграмма направленности по всему телесному углу для параболоида получается вращением правой фигуры вокруг оси симметрии на полный оборот. Диаграмма обычно нормируется так, чтобы максимум кривой равнялся единице.

Для параболоидов вращения сечение главного лепестка – круг (карандашная диаграмма), для других видов антенн ширина диаграммы по двум координатам разная (ножевая форма).

Антенна принимает одновременно все излучение, попадающее в диаграмму, с соответствующим коэффициентом. Если при наведении главного луча антенны на исследуемый источник в боковой лепесток попадет очень яркий объект, то мы не сможем их различить. Для исключения таких случаев, регистрируется прохождение источника через диаграмму либо за счет вращения Земли, либо движения самой антенны.

При прохождении через диаграмму точечного источника запись мощности на выходе приемника будет повторять форму диаграммы направленности, поэтому диаграмму иногда называют откликом антенны на прохождение точечного источника.

Обычно диаграмму в пределах главного лепестка аппроксимируют либо гауссовой формой, либо формой $\sin x/x$.

Разрешение радиотелескопа определяется шириной главного лепестка диаграммы направленности λ/D . Для улучшения разрешения нужно либо увеличивать диаметр антенны, либо наблюдать на более короткой волне.

Формально разрешением можно считать величину полуширины главного лепестка:

$$\frac{\lambda}{2D}.$$

Это та же величина, что и в оптике – минимальное расстояние по Релею (расстояние между двумя спектральными линиями когда максимум одной совпадает с минимумом другой).

Реальное разрешение зависит от отношения сигнал/шум. Для сильных источников можно зарегистрировать угловое расстояние меньше Релеевского предела, для слабых не удастся получить и разрешение λ/D .

2.1.3 Эффективная площадь антенн.

Отраженная от основного зеркала волна принимается в фокусе облучателем – маленькой антенной, для сантиметровых волн это волноводный рупор. На низких частотах используется дипольный или спиральный облучатель (рис. 2.3)

Ширина диаграммы облучателя определяется так же, как и для большой антенны, его размером: λ/d , где d – размер (раскрыв) облучателя. Размер облучателя дает угол

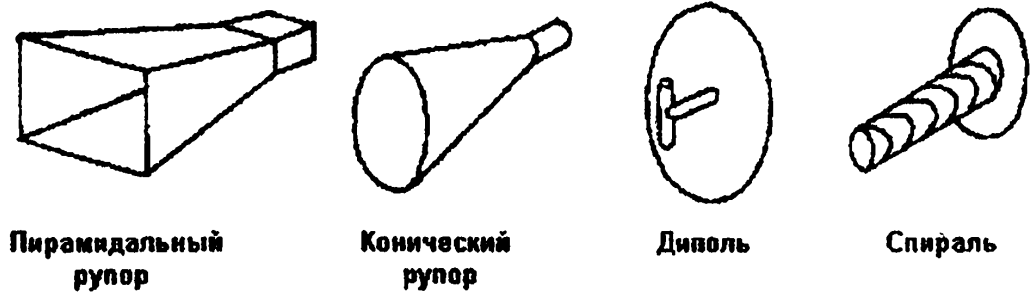


Рис. 2.3: Типы облучателей.

облучения (приема) основной поверхности радиотелескопа. Рис. 2.4 показывает диаграмму направленности облучателя в полярных (а) и прямоугольных (б) координатах.

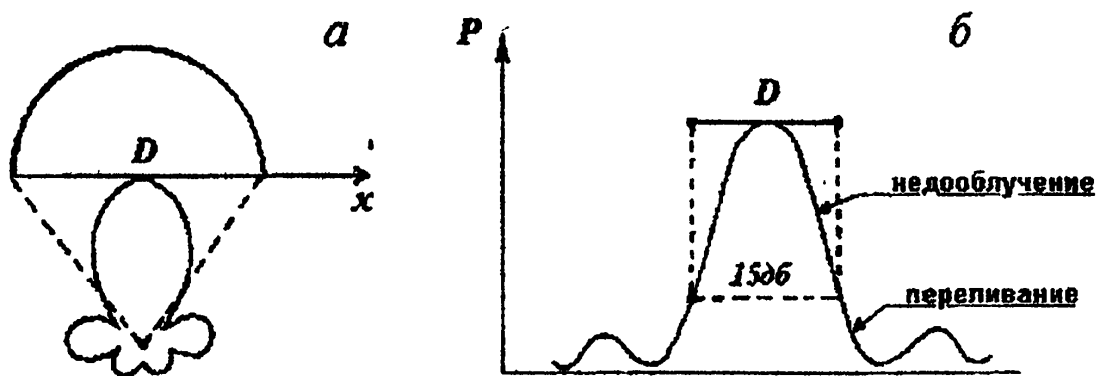


Рис. 2.4: Диаграмма направленности облучателя.

Мы видим, что раскрыв основной антенны облучается неравномерно, мощность, входящая от краев меньше, чем от центра раскрыва, а часть мощности переливается за пределы раскрыва. Для наилучшего приема сигнала от поверхности стремятся сконструировать специальные облучатели, диаграмма которых приблизилась бы к прямоугольной с шириной, равной диаметру антенны (идеальный облучатель). Реально идеальных облучателей не существует.

Переливание энергии за пределы раскрыва антенны, кроме потерь энергии, вносит дополнительные шумы за счет приема излучения вне антенны от Земли, причем это излучение может сильно меняться с поворотом антенны. Обычно выбирают компромисс между недооблучением раскрыва и переливанием через край – мощность, принимаемая от краев, примерно на 15 дБ меньше, чем мощность, принимаемая от центра апертуры.

Вследствие недооблучения поверхности антенны её эффективная собирающая площадь обычно меньше геометрической $A_{\text{эфф}} < A_{\text{геом}}$. Кроме указанных причин, эффективная площадь уменьшается из-за затенения конструкциями, поддерживающими облучатель, и просачивания энергии через отражающую поверхность.

В таблице 2.1 приведены параметры – эффективная площадь, ширина главного луча

и уровень первого бокового лепестка для идеального и реального облучения.

Таблица 2.1: Параметры излучателя.

Облучение	Ширина главного луча	$A_{эфф}$	Уровень 1 бокового лепестка
равномерное (идеальное)	$1.02 \lambda/D$	$A_{геом}$	17.6 дБ (2%)
$\exp(-k^2 x^2)$ (реальное)	$1.2 - 1.3 \lambda/D$	$0.5 - 0.7 A_{геом}$	25 - 30 дБ ($< 0.1 \%$)

Итак, при неравномерном облучении эффективная площадь падает, зато резко уменьшается уровень боковых лепестков.

Иногда приходится специально делать неравномерное облучение, чтобы получить минимальные боковые лепестки, например, при наблюдениях в горах, когда при вращении антенны может резко меняться вклад шумов Земли, попадающих на вход приемника через боковые лепестки.

Спектральная мощность, принимаемая радиотелескопом, равна:

$$P_\nu = \frac{1}{2} S \cdot A_{эфф}, \text{ Вт/Гц.}$$

Коэффициент $1/2$ появляется потому, что обычно приемники принимают только одну составляющую поляризации. Например, в стандартном прямоугольном волноводе на основном типе волны распространяется только компонента волны с направлением электрического вектора, перпендикулярном широкой стенке волновода, спиральная антенна принимает право- или левополяризованную компоненту и т.д.

2.1.4 Шумовая температура антенны.

В отсутствие космического источника мощность на выходе антенны не равна нулю. Она складывается из следующих составляющих:

- шумы атмосферы, попадающие в главный и боковые лепестки;
- космические шумы (например, синхротронное излучение Галактики, реликтовое излучение), попадающие в главный и боковые лепестки;
- излучение Земли, попадающее в боковые лепестки;
- излучение конструкций самой антенны.

Реально шумовая температура редко бывает меньше 20 К. Для ее уменьшения применяются специальные ухищрения: изменение системы облучения, металлические сетки, покрывающие Землю и т.п.

Шумовая температура антенны состоит из постоянной составляющей и флуктуаций: $T_{ш}^a = T_{ш}^0 + \delta T_{ш}$. Постоянную составляющую можно скомпенсировать, а флуктуации $\delta T_{ш}$ дают фон, на котором мы принимаем исследуемое радиоизлучение.

Диаграмма направленности, эффективная площадь и шумовая температура
- основные параметры антенн.

Кроме этого, необходимо знать следующие параметры:

Диапазон рабочих длин волн антенны

Минимальная рабочая волна антенны определяется среднеквадратичной ошибкой поверхности $\sigma_{\text{пов}}$, максимальная – максимальным размером антенны. Зависимость эффективной площади от длины волны обычно выглядит так, как показано на рис. 2.5

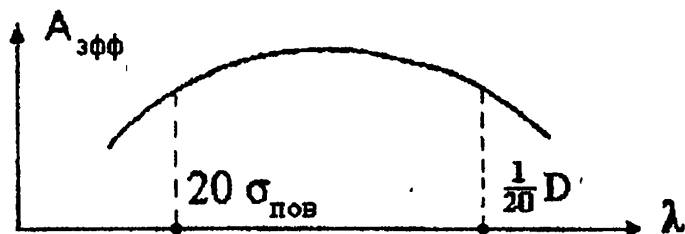


Рис. 2.5: Зависимость эффективной площади от длины волны.

При длинах волн меньше $10-20 \sigma_{\text{пов}}$ и больше $\frac{1}{20} D_{\text{max}}$ эффективная площадь резко падает. Рабочим диапазоном антенны обычно считают интервал $20\sigma_{\text{пов}} - \frac{1}{20} D_{\text{max}}$, хотя эта граница условна, и при необходимости можно работать с меньшей эффективной площадью вне указанного интервала.

Диапазон углов по азимуту и высоте.

Полноповоротные параболоиды могут вращаться по азимуту от 0° до 360° и по углу места от 0° до 90° , им в любое время доступен любой объект, находящийся над горизонтом. Другие типы антенн ограничены определенными углами по азимуту и углу места. С помощью радиотелескопов меридианного типа можно наблюдать только в меридиане (азимут равен 0°), диапазон установок по высоте от 0° до 90° . Наблюдения на самых низких высотах обычно ограничиваются рельефом местности.

Телесный угол диаграммы направленности (эффективный) –
интеграл от излучаемой мощности по 4π :

$$\Omega_a = \iint_{4\pi} A(\theta, \varphi) d\Omega .$$

Это площадь под кривой всей диаграммы направленности.

Телесный угол главного лепестка диаграммы направленности – интеграл от излучаемой мощности в пределах главного лепестка.

$$\Omega_{\text{гл}} = \iint_{\Omega_{\text{гл}}} A(\theta, \varphi) d\Omega .$$

Для карандашной (круглой) диаграммы телесный угол главного луча примерно равен:

$$\Omega_{гл} \approx 1.13 \cdot \theta_{0.5}^2 .$$

Для ножевой:

$$\Omega_{гл} \approx \frac{4}{3} \cdot \theta_{0.5} \cdot \varphi_{0.5} .$$

Телесный угол боковых лепестков диаграммы:

$$\Omega_{бок} = \int \int_{\Omega_{бок}} A(\theta, \varphi) d\Omega .$$

Коэффициент использования диаграммы (отношение мощности, принимаемой главным лепестком, ко всей принимаемой мощности):

$$\epsilon_M = \frac{\Omega_{гл}}{\Omega_a} .$$

Коэффициент рассеяния:

$$\epsilon_p = \frac{\Omega_{бок}}{\Omega_a} .$$

Коэффициент использования апертуры:

$$\epsilon_a = \frac{A_{эфф}}{A_{геом}} .$$

Коэффициент усиления (направленность): $\mathcal{D}$

$$G = \mathcal{D} \cdot K_{1700}$$

$$\mathcal{D} = \frac{4\pi}{\Omega_a} .$$

Эффективная площадь связана с длиной волны и телесным углом диаграммы направленности следующей формулой:

$$A_{эфф} = \frac{\lambda^2}{\Omega_a} .$$

Приведем некоторые параметры для параболоида диаметром 100 м на длине волны 2 см:

- ширина главного лепестка антенны: 1';
- эффективная площадь: 5900 м²;
- коэффициент использования апертуры: 0.75;
- коэффициент усиления: 2 · 10⁸.

2.2 Антенна – объект – изображение

Пусть распределение яркости по источнику и главный лепесток диаграммы направленности антенны выглядят так, как показано на рис. 2.6

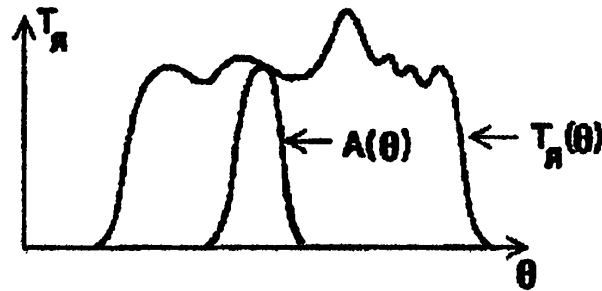


Рис. 2.6: Распределение яркости по источнику и диаграмма направленности антенны А.

Если излучаемый источником поток определяется по формуле Релея–Джинса:

$$S_{\text{изл}} = \int \int_{\Omega_{\text{ист}}} B(\theta, \varphi) d\Omega = \frac{2k}{\lambda^2} \int \int_{\Omega_{\text{ист}}} T_{\text{я}}(\theta, \varphi) d\Omega ,$$

(при $T_{\text{ярк}} = \text{const}$, $S_{\text{изл}} = \frac{2kT_{\text{я}}}{\lambda^2} \cdot \Omega_{\text{ист}}$), то принимаемый поток (изображение объекта) в общем случае зависит от диаграммы антенны и равен при неподвижной относительно источника диаграмме:

$$S_{\text{прин}} = \int \int_{\Omega_{\text{ист}}} B(\theta, \varphi) \cdot A(\theta, \varphi) d\Omega - \quad (2.1)$$

это произведение распределения яркости на диаграмму.

Если антенна движется относительно источника, то принимаемый поток равен:

$$S_{\text{прин}} = \int \int_{\Omega_{\text{ист}}} B(\theta, \varphi) \cdot A(x - \theta, y - \varphi) d\Omega = B * A . \quad (2.2)$$

Формула (2.2) называется уравнением антенного сглаживания. На выходе получается изображение объекта – рис. 2.7. Чем шире диаграмма направленности антенны, тем меньше детальность получаемого изображения. Излучение источника можно характе-



Рис. 2.7: Изображение объекта.

ризовать либо излучаемым потоком, либо яркостной температурой: $S_{\text{изл}}$, $T_{\text{я}}$.

Изображение объекта характеризуется либо принимаемым потоком, либо антенной температурой: $S_{\text{прин}}, T_a$. Антенная температура вводится так же, как и шумовая температура, формально по формуле Найквиста $P = kT$, разница только в том, что антенная температура характеризует мощность, приходящую от исследуемого объекта, а шумовая температура характеризует мешающую приему мощность. Введенная антенная температура равна яркостной температуре, излучаемой внешним объектом, только если вся антенна окружена излучением с яркостной температурой $T_s = T_o$ (рис. 2.8), то есть соблюдено условие термодинамического равновесия.

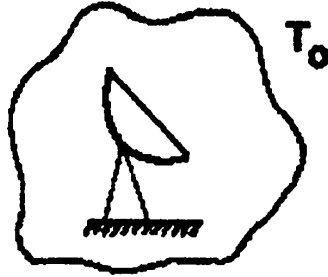


Рис. 2.8: Антенна в поле излучения.

Принимаемая от объекта спектральная мощность равна:

$$P = \frac{1}{2} \cdot S \cdot A_{\text{эфф}} = kT_a.$$

Отсюда формула, связывающая принимаемый поток и антенную температуру:

$$T_a = \frac{S \cdot A_{\text{эфф}}}{2k}; \quad S = \frac{2k \cdot T_a}{A_{\text{эфф}}}.$$

Формулы 2.1 и 2.2 можно переписать в терминах антенной и яркостной температур. Принимаемая мощность равна:

$$P = kT_a = \frac{1}{2} A_{\text{эфф}} \int \int_{\Omega_{\text{ист}}} B(\theta, \varphi) \cdot A(\theta, \varphi) d\Omega.$$

Заменяем

$$B(\theta, \varphi) = \frac{2kT_s(\theta, \varphi)}{\lambda^2} \text{ и } A_{\text{эфф}} = \frac{\lambda^2}{\Omega_a}.$$

Получаем формулы для антенной температуры:

$$T_a = \frac{1}{\Omega_a} \int \int_{\Omega_{\text{ист}}} T_s(\theta, \varphi) \cdot A(\theta, \varphi) d\Omega,$$

в случае движения антенны относительно источника:

$$T_a = \frac{1}{\Omega_a} \int \int_{\Omega_{\text{ист}}} T_s(\theta, \varphi) \cdot A(x - \theta, y - \varphi) d\Omega = \frac{1}{\Omega_a} \cdot T_s * A. \quad (2.3)$$

Из формулы 2.3 можно получить приближение:

$\Omega_{\text{ист}} \ll \Omega_a$ и $T_s = \text{const}$, то $T_a = T_s \frac{\Omega_{\text{ист}}}{\Omega_a}$. Сводка формул, описывающих приём антенной излучения от источника, приведена в конце главы.

2.2.1 Два способа получения изображения

Рассмотрим формирование изображения объекта по схеме, приведённой на рис.2.9.

Начинаем от распределения поля E в раскрыве (апертуре) – это то же самое, что диаграмма облучателя по напряженности электрического поля.

– Диаграмма направленности антенны по напряженности поля ϵ есть Фурье-преобразование от распределения поля в раскрыве антенны (диаграммы маленькой антенны – облучателя в фокусе).

– Диаграмма направленности антенны по мощности $A(\theta, \varphi)$ равна квадрату модуля диаграммы по напряженности поля $E(\theta, \varphi)$ с учетом фаз (векторное сложение). $A = \epsilon \cdot \epsilon^*$. Поле в раскрыве – комплексная величина (сумма волн с разными фазами), а квадрат комплексного числа (квадрат модуля) – это само число, умноженное на сопряженное ему.

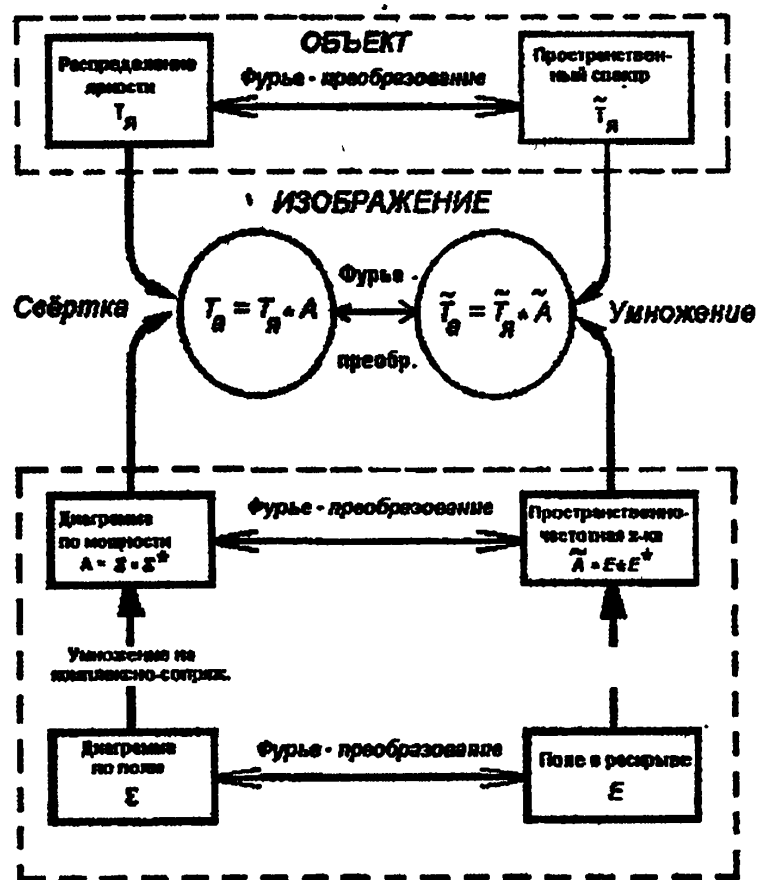


Рис. 2.9: Схема формирования изображения объекта: радиотелескоп – объект – изображение.

– Изображение объекта T_0 есть свертка распределения яркости по источнику с диаграммой антенны по мощности:

$$T_0 = T_Я * A.$$

2.2.2 Второй подход к формированию изображения

В настоящее время в оптике и радио часто используется другой подход: вместо самих величин распределения яркости, изображения объекта и диаграммы направленности антенны рассматриваются их Фурье-образы.

Функцию во времени $f(t)$ можно разложить на гармонические составляющие (синусоиды), каждая из которых имеет свой период T и свою амплитуду (и фазу). В результате получается частотный спектр – зависимость амплитуд этих гармоник от величины, обратной периоду T : $\nu = 1/T$.

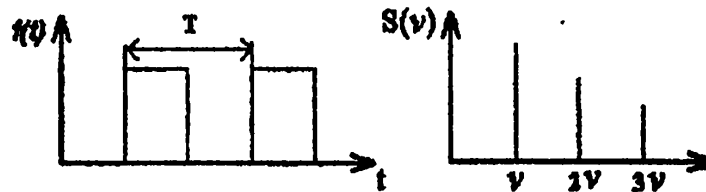


Рис. 2.10: Спектр меандра.

На рис. 2.10 показан спектр меандра.

Функцию в пространстве (например $T_x(\theta, \varphi)$) также можно разложить на гармонические компоненты, каждая из которых характеризуется своим угловым размером $\Theta_i = \lambda/d$, который можно разрешить радиотелескопом диаметром d , то есть разложить функцию $T_x(\theta, \varphi)$ по угловым размерам λ/d (то есть дифракционным размерам).

Фурье преобразование от $T_x(\theta, \varphi)$ дает нам зависимость амплитуды этих компонент от величины обратной λ/d , то есть от величины $u = d/\lambda$. Фурье преобразование от T_x называется спектром пространственных частот, а величины $u = d_1/\lambda$, $u = d_2/\lambda$ – пространственными частотами (по двум координатам).

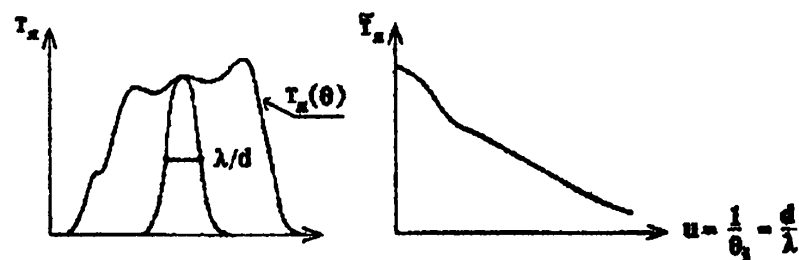


Рис. 2.11: Функция $T_x(\theta)$ и её пространственный спектр.

На рис. 2.11 показана функция $T_x(\theta)$ и её пространственный спектр.

Фурье-преобразование от T_x называется функцией видимости.

$$\tilde{T}_x(u, v) = \int \int_{-\infty}^{\infty} T_x(\theta, \varphi) \cdot e^{-j \cdot 2\pi(\theta u + \varphi v)} d\theta d\varphi.$$

Фурье преобразование от диаграммы $A(\theta, \varphi)$ называется пространственно-частотной

$$\tilde{A}(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(\theta, \varphi) \cdot e^{-j \cdot 2\pi(\theta u + \varphi v)} d\theta d\varphi .$$

В первом подходе антенная температура (изображение) есть свертка истинного распределения яркости источника с диаграммой:

$$T_a = T_s * A .$$

Применим к обеим частям преобразование Фурье и вспомним первую теорему свертки: Фурье-преобразование от свертки двух функций равно произведению Фурье-преобразований этих функций:

$$F(k_1 * k_2) = F(k_1) \cdot F(k_2) .$$

Получим равенство:

$$\tilde{T}_a(u, v) = \tilde{T}_s(u, v) \cdot \tilde{A}(u, v) .$$

Функция видимости есть произведение пространственного спектра на пространственно-частотную характеристику телескопа.

С помощью второй теоремы свертки (преобразование Фурье от произведения двух функций равно свертке этих функций):

$$F(k_1 \cdot k_2) = F(k_1) * F(k_2) ,$$

можно показать, что пространственно-частотная характеристика антенны равна функции автокорреляции от распределения поля в апертуре:

$$\tilde{A} = E * E^* .$$

Итак, второй путь получения изображения (начиная от поля в апертуре E):

– Пространственно-частотная характеристика есть функция автокорреляции от поля в апертуре,

– Функция видимости (изображение объекта) – пространственный спектр источника, умноженный на пространственно-частотную характеристику антенны,

– Истинное распределение яркости по источнику T_s находится обратным преобразованием Фурье от пространственного спектра:

$$T_s(\theta, \varphi) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} T_a(u, v) \cdot e^{+j \cdot 2\pi(\theta u + \varphi v)} du dv .$$

2.3 Типы антенн с заполненной апертурой

2.3.1 Параболоиды вращения

Параболоиды вращения – самые распространенные антенны. За исключением нескольких антенн, все параболоиды имеют азимутальную установку – антенна движается по азимуту и высоте. Это связано с большими размерами и весами антенн. ЭВМ переводит заданные экваториальные координаты источника в горизонтальные, данные поступают на исполнительные системы, антенна может сопровождать или сканировать источник в течение всего времени, пока он находится над горизонтом.

Обтекатели антенн (жесткие оболочки), защищающие антенну от ветровых нагрузок и влажности, для радиоастрономических антенн применяются редко, во-первых, из-за больших размеров, во-вторых, из-за потерь сигнала в материале обтекателя. Только несколько антенн миллиметрового диапазона работают с обтекателями.

Значительную роль в работе радиотелескопа играет *система облучения главного зеркала*.

Используется три типа облучения параболоидов вращения:

1. Работа в прямом фокусе.

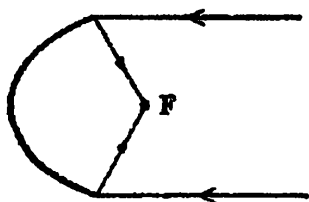


Рис. 2.12: – работа в прямом фокусе, отношение $\frac{f}{d} = 0.25 - 0.6$.

2. Система Кассегрена. Вспомогательное зеркало – гиперболическое. $f_{эфф} = \frac{f_1}{f_2} \cdot f$.

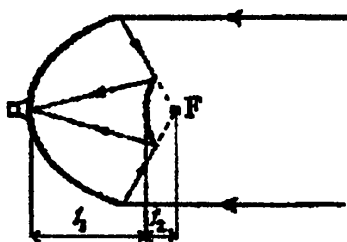


Рис. 2.13: – система Кассегрена.

Преимущества системы Кассегрена:

- Увеличение фокусного расстояния уменьшает aberrации (кому), лучше формируется изображение.
- Удобно располагается приемная аппаратура. При этом облучатель будет больше по размеру из-за необходимости получить более узкую диаграмму для облучения вторичного зеркала.

в) Не так страшно переливание мощности, так как при наблюдении диаграмма захватывает излучение атмосферы а не Земли.

3. Система Грегори.

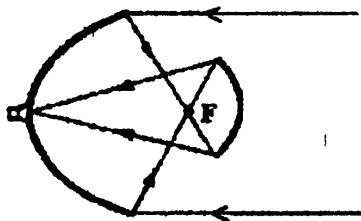


Рис. 2.14: – система Грегори.

Вспомогательное зеркало – эллиптическое, один из фокусов которого совпадает с фокусом зеркала, а во втором фокусе располагается приёмная аппаратура.

Преимущества системы Грегори те же, что и системы Кассегрена, кроме того, имеется возможность наблюдать и в прямом фокусе без перемонтировки зеркал. С системой Грегори работает крупнейший параболоид в Бонне диаметром 100 м, длина эффективного фокуса 360 м без перемонтировки зеркал.

Дальнейшее увеличение размеров параболоидов ограничивается прочностью, жёсткостью и тепловым расширением материала конструкций. При проектировании 100-м телескопа в Бонне применён метод гомологических¹ конструкций ферм. При повороте телескопа антенна всегда сохраняет форму параболоида, возможно, с другим фокусным расстоянием. Поверхность параболоида, отъюстированная при направлении в зенит, при наклоне антенны по углу места переходит за счёт упругих деформаций в ряд других параболоидов. При этом меняется положение фокуса, которое корректируется соответствующим смещением облучателя.

Параболоиды диаметром 10–25 м построены практически во всех странах. Они работают как радиотелескопы, антенны спутниковой связи и используются для радиолокации. Большинство антенн такого диаметра, применяемых в радиоастрономии, являются элементами антенн апертурного синтеза, межконтинентальных и локальных сетей (глава 4).

В табл. 2.2 перечислены несколько крупных полноповоротных параболоидов, которые работают как самостоятельные радиотелескопы. Естественно, они также могут использоваться в режиме апертурного синтеза вместе с другими антеннами.

На территории СНГ построены также большие параболоиды: 70-м антенны в Евпатории, Уссурийске и 64-м под Москвой, которые работают на космическую связь.

¹сохраняющих параболичность

Таблица 2.2: Самые большие функционирующие параболоиды.

Место	Диаметр, м	Минимальная длина волны
Бонн, Германия	100	2 см
Джодрелл Бэнк, Англия	76	20 см
Паркс, Австралия	64	6 см
Алгонкин, Канада	48	2 см
Грин Бэнк, NRAO, США (экваториальная монтировка)	43	2 см
Мичиган, США	25	1.5 см
Nobeyama, Япония	45	2 мм
IRAM, Гренада, Испания	30	1 мм
Чили	15	1 мм
На территории СНГ		
РТ-22. Симеиз, Украина	22	8 мм
РТ-22, Пушино	22	
РТ-64, Калязин	64	

2.3.2 Антенны с плоским отражателем

Антенны этого типа состоят из неподвижного главного зеркала и подвижного плоского отражателя, с помощью которого антенна наводится на источник. На рис.2.15 приведена схема антенны Крауса в Огайо (США). Главное зеркало – часть параболоида враще-



Рис. 2.15: Антенна Крауса в Огайо, США.

ния 110×20 м, плоское 80×30 . Минимальная рабочая длина волны 13 см. Рис.2.16 показывает схему антенны в Нансе (Франция). Главное зеркало в вертикальной плоско-



Рис. 2.16: Антенна в Нансе, Франция.

сти имеет форму параболы, а в горизонтальной – дуги окружности 300×35 м, плоское

зеркало – 200×10 м. Эффективная площадь на длине волны 21 см равна 3000 м^2 . Конструкция позволяет сопровождать источник в течение часа. На рис.2.17 – схема южного сектора РАТАН-600. Основное зеркало – круговой параболический цилиндр. Здесь су-

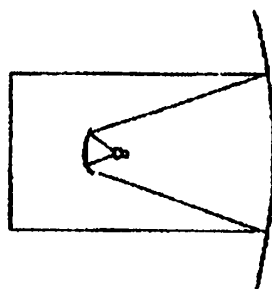


Рис. 2.17: Южный сектор РАТАН-600.

ществует еще один облучатель, преобразующий сходящуюся цилиндрическую волну в сходящуюся сферическую и фокусирующий волну на рупор. Цилиндричность волны дает большие размеры безабберационного поля и позволяет проводить наблюдения на нескольких частотах одновременно. Все антенны с плоским отражателем – меридианного типа. Источники можно наблюдать практически на всех высотах, но только в меридиане. Диаграмма направленности антенн с плоским отражателем – ножевая, ширина главного лепестка по азимуту и высоте различная и определяется соответствующими размерами антенны по азимуту и высоте: $\lambda/d_{\text{аз}}$, $\lambda/d_{\text{выс}}$.

2.3.3 Земляные чаши.

Основная отражающая поверхность состоит из отдельных элементов, связанных с Землей. Это позволяет осуществить очень большие размеры. Самый большой работающий радиотелескоп такого типа расположен в ~~кратере вулкана~~ в Аресибо в Пуэрто-Рико. Его диаметр 300 м, длина волны до 3 см, ширина диаграммы на волне 10 см равна $1,5' \times 1,5'$, эффективная площадь 20000 м^2 . Радиотелескоп позволяет проводить наблюде-

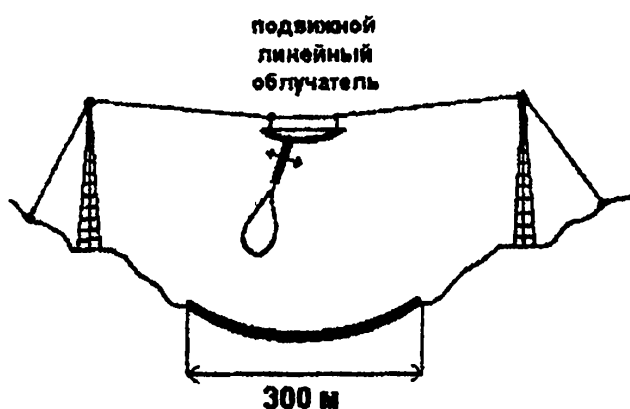


Рис. 2.18:
Земляная чаша в Аресибо.

ния в области неба в пределах 20° от зенита. Зеркало телескопа сферическое, аберрации устраняются специальной системой облучения. Еще одна земляная чаша построена в Армении – 54 м, полусфера из 3800 панелей 1×1 м, ось симметрии наклонена на 15° к

югу от зенита (радиотелескоп не работает). В Японии работает земляная чаша 21 м (на $\lambda 21$ см). К этому же типу можно отнести антенну в Иллинойсе, США, изображённую на рис. 2.19. Неподвижный параболический цилиндр с линейным облучателем работает

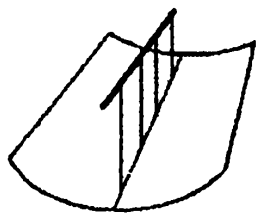


Рис. 2.19:

Неподвижный параболический цилиндр
с линейным облучателем.

на частоте 611 МГц до 30° от зенита.

2.3.4 Рефракторы (синфазные антенны).

Это антенны, состоящие из сотен или тысяч элементарных облучателей, например, диполей или спиралей. Комбинация многих диполей позволяет добиться повышения эффективной площади и разрешающей способности. Диполи соединяются так, чтобы поступающие из разных диполей в приемную аппаратуру колебания тока и напряжения оказались согласованы по фазе. Часто эти антенны называют “фазлируемые полотна”. Синфазные полотна работают исключительно в метровом диапазоне и достаточно распространены в мире. Пример синфазной антенны, состоящей из диполей, приведён на рис. 2.20. Диаграмма такой антенны определяется суммарным размером по-

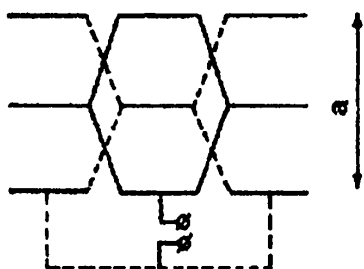


Рис. 2.20:

Синфазная антенна
(фазлируемая решётка).

лотна: $\theta = \theta_0/N$, где θ_0 – диаграмма одного диполя, N – число диполей. Качание луча (установка на определенную высоту) производится введением определенной разности фаз между группами диполей. В Пушкино синфазная антенна БСА 187×384 м работает на волне 3 м, электрическое управление позволяет наблюдать в азимуте 0° , наклонениях 10° – 90° , в азимуте 180° , $\delta = 55^\circ$ – 90° . Кроме диполей, в качестве элементарных излучателей применяются спирали; например, в Огайском университете США работает синфазная антенна, в которой полотно смонтировано на подвижной плоской поверхности, что увеличивает угловой диапазон антенны (рис.2.21). В Харькове работает Т-образная

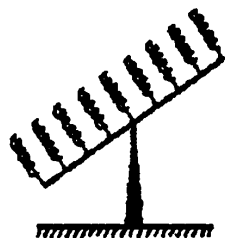


Рис. 2.21: Синфазная спиральная антенна на подвижной платформе.

фазлируемая решетка УТР-2.

2.4 Путаница

Накапливая сигнал путем сопровождения источника или складывая много записей, можно выделить очень слабый сигнал. Однако есть принципиальное ограничение этому процессу – путаница. Число радиисточников на небе растет с уменьшением потока: для определенного диапазона потоков эта зависимость выражается формулой:

$$N = N_0 \cdot S^{-x},$$

где N_0 – число источников с потоками больше 1 Ян на стерadian. В общем случае вид

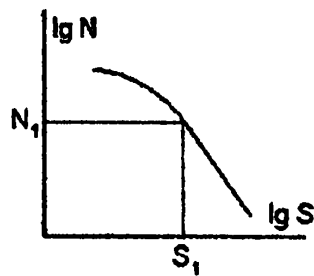


Рис. 2.22: – вид зависимости $N(S)$.

зависимости $N(S)$ определяется моделью Вселенной и эволюцией объектов.

Если телесный угол главного лепестка диаграммы направленности равен Ω_a , то на некотором потоке ниже предельного S_1 в главный лепесток попадет больше одного объекта, и мы не сможем их разделить. Это явление называется путаницей. На самом деле в главном лепестке всегда находится много слабых объектов. Потоки этих объектов находятся ниже предела обнаружения радиотелескопа, но их сумма создает фон, который входит в общие шумы.

Точное определение путаницы такое: Путаница – это пространственные флуктуации средней яркости фона неразрешенных источников. Шумы путаницы примерно равны:

$$\delta S_{\text{пут}} = S_1,$$

где S_1 – плотность потока таких источников, для которых число источников на стерadian $N_1(S_1)$ равно числу диаграмм в одном стерadiane, то есть число источников в главном лепестке равно:

$$N_{\text{гл}} = \Omega_{\text{гл}} \cdot N_1.$$

Путаница ставит принципиальный предел повышению чувствительности на данном радиотелескопе. Для того, чтобы уйти от путаницы, необходимо уменьшить ширину диаграммы направленности антенны. Это можно сделать, либо уменьшая длину волны наблюдения, либо увеличивая диаметр антенны. Максимальный диаметр одиночной антенны 100 м, и в настоящее время трудно построить антенну большего диаметра из-за текучести материалов. Для увеличения разрешения и уменьшения влияния путаницы применяется апертурный синтез.

1. ТЕЛЕСНЫЙ УГОЛ ДИАГРАММЫ

$$\Omega_a = \iint_{4\pi} A(\theta, \varphi) d\Omega$$

направленности антенны, стер

2. ТЕЛЕСНЫЙ УГОЛ ГЛАВНОГО ЛЕПЕСТКА

$$\Omega_{гл} = \iint_{\Omega_{гл}} A(\theta, \varphi) d\Omega$$

диаграммы направленности, стер

для карандашной диаграммы:

$$\Omega_{гл} \approx 1.13 \theta_{0.5}^2$$

для ножевой диаграммы:

$$\Omega_{гл} \approx \frac{4}{3} \theta_{0.5} \cdot \varphi_{0.5}$$

3. ТЕЛЕСНЫЙ УГОЛ БОКОВЫХ ЛЕПЕСТКОВ, стер.

$$\Omega_{бок} = \iint_{\Omega_{бок}} A(\theta, \varphi) d\Omega$$

4. ЭФФЕКТИВНАЯ ПЛОЩАДЬ АНТЕННЫ, кв. м.

$$A_{эфф} = \lambda^2 / \Omega_a$$

5. Коэффициент усиления антенны

$$G = 4\pi / \Omega_a$$

6. Коэффициент использования апертуры

$$\varepsilon_a = A_{эфф} / A_{геом}$$

7. Коэффициент использования диаграммы

$$\varepsilon_M = \Omega_{гл} / \Omega_a$$

8. Коэффициент рассеяния

$$\varepsilon_P = \Omega_{бок} / \Omega_a$$

9. ЯРКОСТЬ ИСТОЧНИКА – ЯРКОСТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА

(формула Релея - Джинса), Вт/(м² Гц стер)

$$B(\theta, \varphi) = \frac{2kT_s(\theta, \varphi)}{\lambda^2}$$

10. ПОТОК, ИЗЛУЧАЕМЫЙ источником, Вт/(м² Гц) $S_{\text{изл}} = \int \int_{\Omega_{\text{ист}}} B(\theta, \varphi) d\Omega$
 при $B = \text{const}$, полный поток от источника $S_{\text{изл}} = B \cdot \Omega_{\text{ист}} = \frac{2kT_A}{\lambda^2} \Omega_{\text{ист}}$

11. ПОТОК, ПРИНИМАЕМЫЙ радиотелескопом

а) антенна наведена на источник

$$S_{\text{пр}} = \int \int_{\Omega_{\text{ист}}} B(\theta, \varphi) \cdot A(\theta, \varphi) d\Omega$$

Если телесный угол источника $\Omega_{\text{ист}} \ll \Omega_a$

и $B = \text{const}$, то

$$S_{\text{пр}} = S_{\text{изл}}$$

б) антенна движется относительно источника,
 поток равен свёртке яркости с диаграммой.

$$S_{\text{пр}} = B * A$$

$$S_{\text{пр}} = \int \int_{\Omega_{\text{ист}}} B(\theta, \varphi) \cdot A(x - \theta, y - \varphi) d\Omega$$

12. АНТЕННАЯ ТЕМПЕРАТУРА от источника

(вводится по формуле Найквиста, $P = kT \Delta f$)

а) антенна наведена на источник

если $\Omega_{\text{ист}} = 4\pi$, то

$$T_a = T_j$$

если $\Omega_{\text{ист}} \ll \Omega_a$, то

$$T_a = \frac{\Omega_{\text{ист}}}{\Omega_a} \cdot T_j$$

б) антенна движется относительно источника —
 свёртка яркостной температуры с диаграммой

$$T_a = \frac{1}{\Omega_a} \cdot T_j * A$$

13. ПРИНИМАЕМЫЙ ПОТОК И АНТЕННАЯ
 ТЕМПЕРАТУРА связаны соотношением:

$$S = \frac{2kT_a}{A_{\text{эфф}}}$$

Приёмники космического радиоизлучения

3.1 Отличие космического сигнала от телерадиовещания

Обычный амплитудно-модулированный сигнал радиовещания – это несущая частота модулированная звуковой частотой.

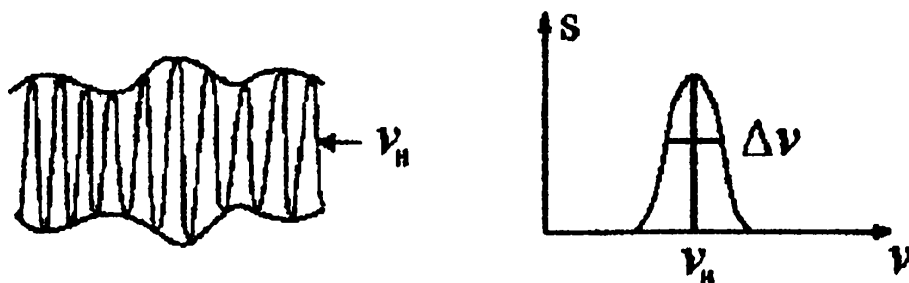


Рис. 3.1: Амплитудно-модулированный сигнал и его спектр.

Смысл работы приемника состоит в выделении сигнала звуковой частоты с наилучшим отношением сигнал/шум.

ВХОД ДЕТЕКТОРА		ВЫХОД ДЕТЕКТОРА	
СИГНАЛ	ЕГО СПЕКТР	СИГНАЛ	ЕГО СПЕКТР
$P_{\text{вх}}$ 		I $I_0 \sim P_{\text{вх}}$ 	
ν_0 		I $I = I_0 + \Delta I$ 	
Белый шум Сумма большого числа синусов с одинаковой амплитудой		I $I \sim P_{\text{ш}}$ 	

Рис. 3.2: Работа детектора.

В принципе выделить полезный сигнал можно с помощью одного детектора. В вещательных приемниках применяются амплитудные детекторы – ток на их выходе пропорционален напряжению входного сигнала. В радиоастрономических приемниках-радиометрах применяются квадратичные детекторы – ток на выходе пропорционален мощности входного сигнала.

Таким образом, передача-приём радиосигнала может происходить так (рис.3.3):



Рис. 3.3: Передача-приём радиосигнала.

Все остальные элементы приемо-передатчиков служат для наилучшего выделения и разграничения сигналов. На рис.3.4 — схема радиовещательного приёмника прямого усиления.

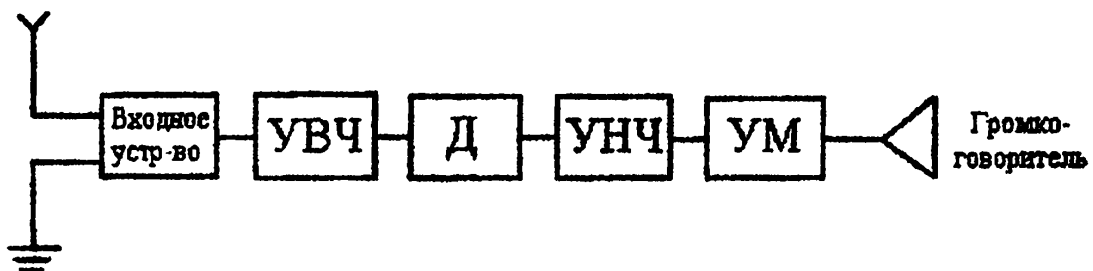


Рис. 3.4: Схема радиовещательного приёмника прямого усиления.

Входное устройство: выбирает нужную станцию (перестраиваемый фильтр);
 УВЧ: широкополосный усилитель для всех принимаемых станций;
 Д-детектор: выделяет звуковую частоту;
 УНЧ и Усилитель мощности: усиливают полезный сигнал;
 Гр.: динамик, преобразующий сигнал звуковой частоты в колебания мембраны (звук).
 Чувствительность приема характеризуется отношением сигнал/шум: всегда больше 1.

То обстоятельство, что сигнал модулирован (его спектр располагается вокруг несущей частоты), помогает уйти от собственных шумов приемника, которые максимальны на нулевых частотах. Усилитель низкой частоты вырезает нужную область и усиливает только сигнал, а большая часть шумов приемника не усиливается.

У схемы прямого усиления есть два существенных недостатка:

а) УВЧ приходится делать широкополосным, а шумы усилителя увеличиваются с увеличением полосы:

$$\delta T_{ш} \sim \sqrt{\Delta\nu};$$

б) низкая селективность, так как входные фильтры из-за больших "хвостов" частотных характеристик захватывают соседние станции.

Эти недостатки устраняются в супергетеродинной схеме рис. 3.5.

С помощью специального устройства — смесителя несущая частота сдвигается до разности между несущей и частотой гетеродина.

Одновременно перестраивая гетеродин и входной фильтр, мы можем сделать разность $\nu_n - \nu_r$ постоянной и основное усиление сигнала проводить более узкополосным

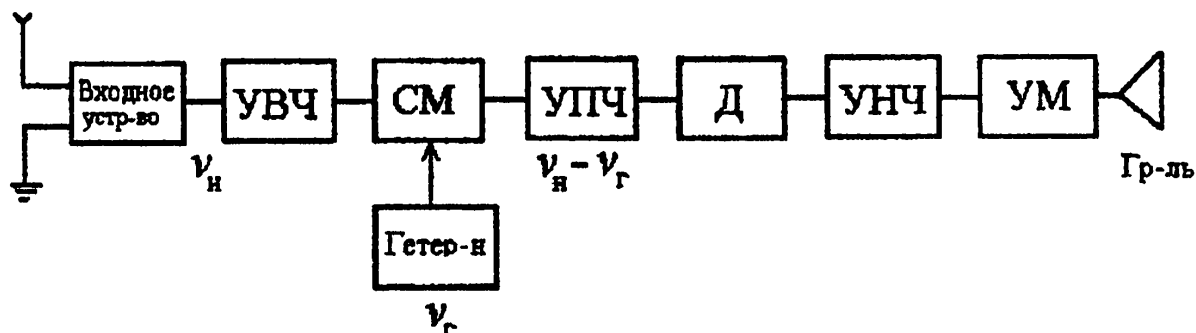


Рис. 3.5: Супергетеродинная схема.

усилителем. При этом шумы приемника снижаются и, кроме того, форма полосы разностного сигнала на выходе смесителя получается прямоугольной, что улучшает избирательность настройки.

Отличие сигнала от космических объектов от радиовещательного сигнала.

1. Космические и радиовещательные сигналы имеют принципиально разные механизмы генерации. Большинство космических объектов имеет непрерывный, очень широкий спектр (то есть имеет характер шума). Радиовещательные сигналы имеют узкую полосу и когерентный сигнал.

Космический радиосигнал не модулирован (за исключением сигналов пульсаров).

Средняя мощность космического сигнала считается постоянной, по крайней мере во время приема.

Радиолинии молекул имеют значительно более узкий спектр, чем у других космических радиоисточников, определяемый дисперсией скоростей излучающего газа.

Вообще шумом называется случайный процесс, то есть процесс, гармонические составляющие которого (синусоиды) имеют случайные амплитуды и (или) фазы.

Космический сигнал, хотя его спектр может быть падающим или растущим, в пределах полосы приема можно считать белым шумом (плоский спектр, рис. 3.7 а). Нас интересует только средняя мощность излучения космического радиоисточника, то есть постоянная составляющая шума.

Принимаемая мощность от космических объектов обычно на много порядков меньше собственных шумов приемника.

При приеме космического сигнала на выходе радиометра после детектора присутствуют четыре компонента тока: постоянные составляющие полезного космического сигнала и шума приемного устройства и флуктуации этих величин, которые характеризуются своими среднеквадратичными значениями σ .

Космический сигнал: $J_c + \delta J_c$.

Собственные шумы приемника: $J_{ш} + \delta J_{ш}$.

Флуктуации шумов космического сигнала значительно меньше флуктуаций шумов приемника, поэтому ими можно пренебречь и считать, что на выходе детектора будут три составляющие:

$$J_{\text{вых}} = J_c + J_{ш} + \delta J_{ш}.$$

Постоянную составляющую собственных шумов мы можем измерить и скомпенсировать (убрать). Тогда на выходе приемника останется постоянная составляющая полезного сигнала и среднеквадратичное значение флуктуаций шумов приемника $J_{\text{вых}} = J_c + \delta J_{ш}$. Именно принципиальное различие этих величин позволяет принимать слабые космические сигналы на фоне более мощных собственных шумов приемника.

При приеме широкополосного сигнала от космического радиоисточника мы собираем всю мощность, попадающую в полосу приемника и измеряем среднюю мощность на единицу полосы частот. Такие приемники называются “радиометры”. Схемы приемников космического радиоизлучения отличаются способом компенсации постоянной составляющей. Можно, например, поставить на выходе детектора дополнительный источник напряжения с полярностью, противоположной шумовой составляющей. Эта схема прак-

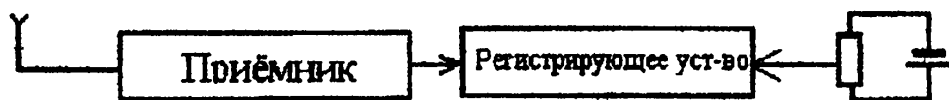


Рис. 3.6:
Компенсационная
схема приёмника.

тически не применяется, так как постоянная составляющая обычно нестабильна и ее непросто скомпенсировать.

Самая распространенная в мире схема приемников космического радиоизлучения – модуляционная. Для приема излучения спектральных линий и в интерферометрических приемниках используют супергетеродинные приемники, в остальных случаях чаще всего используется приемники прямого усиления. В радиотелескопах апертурного синтеза используются корреляционные радиометры, которые рассмотрены в главе 4. Для грамотной обработки данных, полученных в наблюдениях, необходимо понимать принцип и основные особенности работы приёмников космического радиоизлучения.

Приём и выделение космического сигнала рассмотрим на примере модуляционного радиометра прямого усиления.

Работа модуляционного радиометра непрерывного спектра

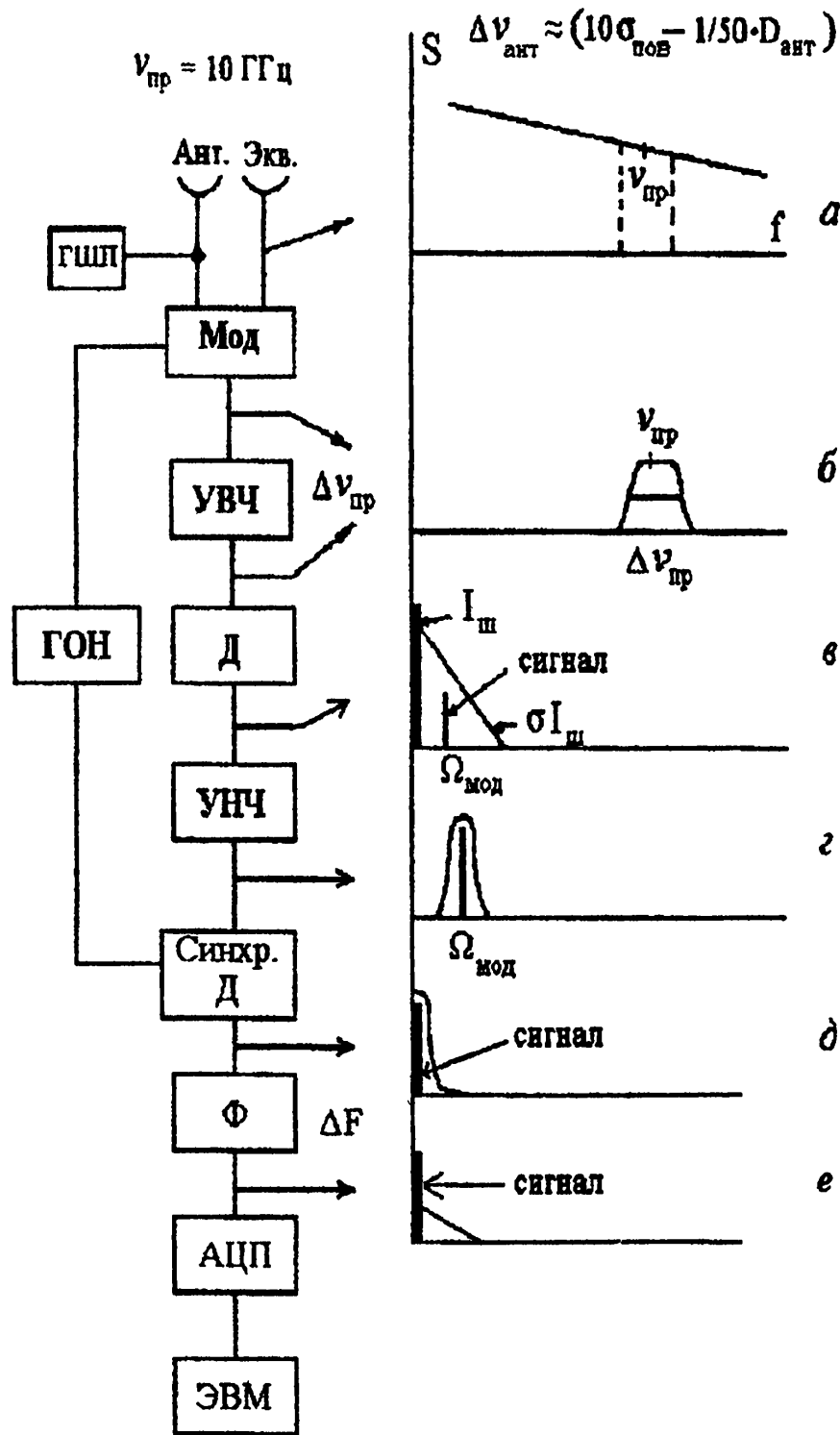


Рис. 3.7: Широкополосный модуляционный радиометр.

На рис. 3.7 приведена схема приемника и спектры сигнала. Входная полоса приемника вырезает из спектра источника часть $\Delta \nu_{пр}$ (рис. 3.7 б). Принимаемая мощность сигнала увеличивается пропорционально этой входной полосе:

$$P(вт) = \frac{1}{2} k \cdot S \cdot \Delta \nu_{пр} .$$

При этом флуктуации собственных шумов также увеличивается, но, согласно статистике, в $\sqrt{\nu_{пр}}$ раз. Ясно, что нам выгодно расширять входную полосу, так как отношение

сигнал/шум с увеличением полосы растет в $\sqrt{\nu_{\text{пр}}}$ раз.

При этом мы теряем информацию внутри полосы – считаем, что спектр внутри полосы не меняется. Входной сигнал с помощью двух–четырех каскадов усилителей усиливается по мощности примерно на 50–60 дБ (100000–1000000 раз).

Поскольку из космоса идет немодулированный сигнал, мы можем его замодулировать на входе приемника и тем самым, как и в радиовещательных приемниках, уйти от собственных шумов приемника.

Осуществить эту модуляцию можно, например, подсоединяя вход приемника поочередно то к антенне, то к эквиваленту, которым может служить либо устройство с определенной постоянной температурой, либо соседний участок неба, где нет источника. Для этого служит специальное устройство – модулятор. При этом сигнал оказывается модулированным по типу (есть–нет), то есть его спектр сдвигается на частоту модуляции (переключения), см. гл.2, рис. 2.10. Собственные шумы приемника остаются немодулированными; таким образом, мы разнесли спектры сигнала и мешающих шумов. На выходе детектора будут три компоненты тока, о которых говорилось выше (рис. 3.7 в).

Так как постоянные составляющие сигнала и собственных шумов разнесены по частоте, нам не трудно избавиться от постоянной составляющей шумов. Усилитель низкой частоты вырезает спектр вокруг сигнала (рис. 3.7 г).

Полосу усилителя низкой частоты (УНЧ) делают такой, чтобы пропустить несколько гармоник частоты модуляции:

Спектр меандра (есть–нет) состоит из ряда последовательно уменьшающихся по амплитуде гармоник на частотах Ω_m , $2\Omega_m$, $3\Omega_m$ и т.д.; если мы оставим только одну, первую, то на выходе вместо прямоугольной формы модуляции сигнала получим синусоидальную.

После прохождения сигнала через УНЧ убирается постоянная составляющая шумов приемника и часть флуктуаций шумов вне полосы УНЧ.

Теперь нам остается перенести спектр сигнала к нулевым частотам (на постоянный ток) для удобства регистрации. Это делает второй детектор (синхронный). После синхронного детектора остается постоянная составляющая сигнала и остатки собственных шумов (рис. 3.7 д).

Флуктуации собственных шумов приемника (постоянную составляющую мы убрали) растут пропорционально корню квадратному из полосы приема, в то же время энергия принимаемого космического сигнала (постоянная) растет пропорционально полосе. Поэтому отношение сигнал/шум увеличивается пропорционально корню квадратному из полосы приема.

Есть еще возможность увеличить чувствительность – увеличить время приема сигнала (накопление сигнала).

При этом, полезная энергия растет пропорционально времени накопления, а флуктуации собственных шумов растут пропорционально корню квадратному из времени

накопления (смотри курс статистики).

Чувствительность радиометра по антенной температуре - минимальный прирост антенной температуры (среднеквадратичное отклонение, приведенное ко входу), которое радиометр может различить, будет следующая:

$$\Delta T_a = k \frac{T_{ш}^a + T_{ш}^{пр}}{\sqrt{\Delta \nu_{пр}} \cdot T};$$

T - время накопления,

$\Delta \nu$ - высокочастотная полоса приемника.

k - коэффициент, зависящий от схемы приемника.

Для модуляционной схемы этот коэффициент равен $\sqrt{2}$. В результате, мы можем принять сигнал в $\sqrt{\Delta \nu_{пр}} \cdot T$ меньше собственных шумов радиометра.

Осуществить накопление можно аппаратно, пропуская сигнал и флуктуации шума через узкополосный низкочастотный фильтр. При увеличении времени прохождения источника его спектр становится уже, поэтому мы можем поставить на выходе фильтр с такой полосой ΔF , которая соответствует времени прохождения:

$$\Delta F \approx \frac{1}{T}.$$

После фильтра флуктуации шума уменьшатся в $\sqrt{\Delta F}$. Далее накопление можно осуществить в компьютере при обработке.

Для увеличения чувствительности источник можно сопровождать необходимое время, либо складывать несколько отдельных прохождений источника через диаграмму.

Сравнивают чувствительности всех приемников при времени накопления $T = 1$ сек.

Существенный недостаток модуляционной схемы - потеря времени наблюдения в два раза, так как половину времени антенна смотрит на соседний участок неба (либо приемник подключен к эквиваленту антенны). Эту потерю можно компенсировать увеличением времени накопления.

При неподвижной антенне время прохождения источника через диаграмму, которое является и временем накопления сигнала, зависит от ширины диаграммы и координат объекта:

$$T_{\text{прох}} = \frac{\theta''}{v}, \quad v = 15 \frac{''}{\text{сек}} \cdot \cos \delta \cdot \cos q;$$

v - суточная скорость движения источника в меридиане,

δ - склонение источника,

θ - ширина диаграммы направленности антенны,

q - параллактический угол источника.

При наблюдении в меридиане параллактический угол равен нулю, и время прохождения через диаграмму равно: $T_{\text{прох}} = \frac{\theta''}{15} \cos \delta$.

При одинаковой ширине диаграммы в угловых минутах время прохождения источника зависит от координат источника: чем больше время прохождения, тем выше чувствительность радиотелескопа.

Чувствительность радиотелескопа по потоку получается из чувствительности по антенной температуре:

$$\Delta S = \frac{2k\Delta T}{A_{эфф}},$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ (Вт сек/Гц) – постоянная Больцмана.

Шумовая температура приёмника $T_{ш}$ складывается из шумовых температур всех элементов – как активных (усилители), так и пассивных (элементы, которые ослабляют сигнал).

Шумовая температура всегда приводится ко входу приемника или усилителя таким образом, что реальная спектральная мощность шума на выходе усилителя равна:

$$P_{ш}^{\nu} = kT \cdot G,$$

где G – коэффициент усиления. Для получения полной мощности надо величину $P_{ш}^{\nu}$ умножить на ширину полосы усилителя:

$$P_{ш} = kT \cdot G \cdot \Delta f.$$

Потери пассивных элементов характеризуются коэффициентом передачи $L = P_{вых}/P_{вх}$, часто потери сигнала в пассивных элементах считаются в децибелах.

Шумовая температура пассивного элемента равна:

$$T_{ш} = T_{физ} \frac{1-L}{L},$$

где $T_{физ}$ – физическая температура, при которой находится элемент. Пассивные элементы, стоящие на входе приемника (до первого усилителя), ослабляют приходящий сигнал и, кроме того, вносят свои шумы в общую шумовую температуру приемника. Если в приемнике несколько усилителей, то их общая шумовая температура равна:

$$T_{ш}^{ус} = T_{ш}^1 + \frac{T_{ш}^2}{G_1} + \frac{T_{ш}^3}{G_2 \cdot G_1} + \dots$$

где $T_{ш}^1$, G_1 – шумовая температура и усиление 1-го усилителя,

$T_{ш}^1$, G_1 – шумовая температура и усиление 2-го усилителя и т.д.

Когда сигнал приходит ко входу второго усилителя, он уже усилен первым усилителем, поэтому шумы на вход приемника пересчитываются через коэффициенты усиления предыдущих усилителей. Итак, **общая шумовая температура приемника** рассчитывается по формуле:

$$T_{ш}^{пр} = \frac{1-L}{L} T_{физ} + \frac{T_{ш}^{ус}}{L}.$$

Величина L обычно составляет 0.9–0.98.

Для уменьшения шумовых температур элементов нужно уменьшить их физическую температуру. Для этого приемник или его вход часто помещается в криостат с азотом

или гелием. В современных приемниках удается снизить шумовую температуру до 10 К, так что чувствительность определяется, в основном, шумами антенны.

Шумовая температура антенны $T_{\text{ш}}^a$ складывается из шумовой температуры неба (атмосфера, Галактика, Метагалактика), температуры излучения Земли, попадающего в боковые лепестки, и температуры конструкций телескопа. Реально шумовые температуры антенн редко бывают меньше 20 К.

3.2 Элементы радиометров

3.2.1 Генератор шума полупроводниковый (ГШП)

Генератор шума дает нам искусственный калибровочный сигнал. Сигнал занимает всю полосу радиометра и подается на вход приемника через ответвитель. Часто калибровочный сигнал называют ступенькой. Калибровочный сигнал имеет постоянную, тщательно измеренную температуру и используется для калибровки потоков наблюдаемых источников, а также для антенных измерений. Сигнал обычно подается на вход приемника при каждом наблюдении источника. Он проходит через весь тракт приемника, поэтому отношение сигнала от источника к амплитуде калибровочной ступеньки не зависит от "болтанок" коэффициента усиления, если они не сильно разнесены по времени.

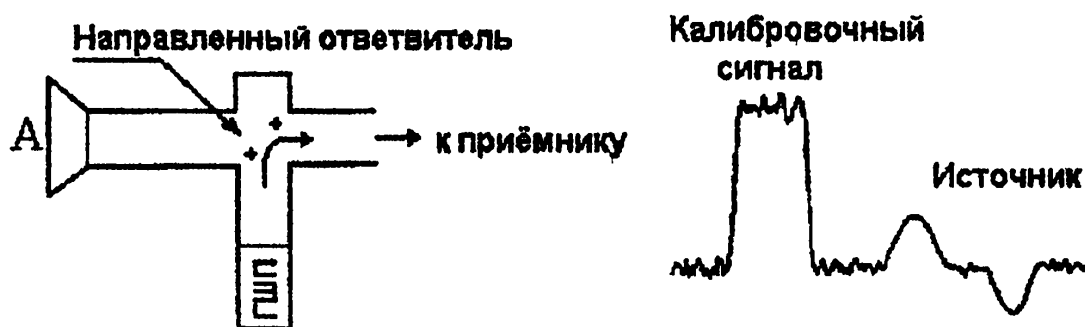


Рис. 3.8: Калибровочный сигнал.

В свою очередь, калибровочный сигнал привязывается к потокам калибровочных источников на небе. Это точечные радиоисточники (угловой размер значительно меньше ширины диаграммы антенны) с известными постоянными потоками. Обычно величину ступеньки устанавливают в 20–100 раз больше среднеквадратичного значения шумов на выходе. Ступеньку нельзя делать слишком большой, так как сигнал может выйти за пределы квадратичности детектора или диапазона работы аналого-цифрового преобразователя.

3.2.2 Модулятор (М)

Модулятор (М) – это устройство, попеременно подключающее вход приемника к облучателю антенны или эквиваленту с определенной частотой (обычно 100–500 Гц). Эквивалентом может служить специальная нагрузка, находящаяся при известной температуре и излучающая, как черное тело, но чаще всего используют второй облучатель, который стоит рядом и смотрит в область неба, соседнюю с наблюдаемым источником. Такие радиометры называются радиометрами с диаграммой модуляции.

Волноводный модулятор – это тройник, в центре которого находится феррит с прямоугольной петлей гистерезиса. Импульс тока, проходящий по внешней петле, изменяет направление вектора намагниченности феррита и, следовательно, направление циркуляции электромагнитных волн в переключателе. При изменении полярности тока, меняется направление пропускания модулятора: антенна-эквивалент.

Частота переключения задается генератором опорного напряжения. Потери сигнала в модуляторе ППГ малы, не больше 0.04 дБ. Кроме ферритовых модуляторов исполь-

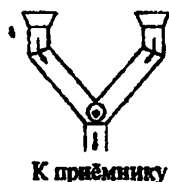


Рис. 3.9: Ферритовый модулятор с прямоугольной петлёй гистерезиса (ППГ).

зуются модуляторы с р-і-п диодами. В каждое входное плечо впайвается по диоду. Подавая на диод разнополярное напряжение, мы запираем или отпираем данное плечо и, соответственно, в приемник проходит сигнал от облучателя или эквивалента.

3.2.3 Генератор опорного напряжения (ГОН)

ГОН формирует опорное напряжение частоты модуляции, которое после соответствующего усиления и формирования подается на модулятор и синхронный детектор.

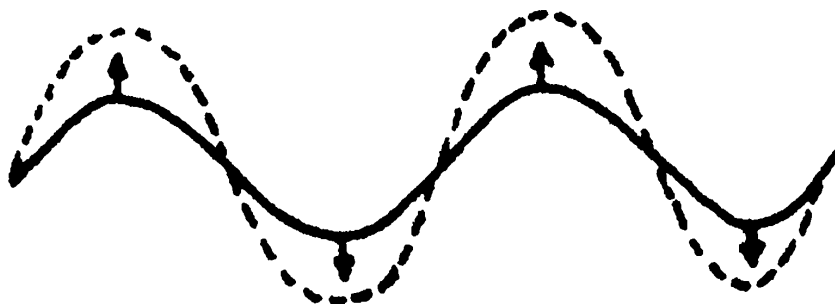
3.2.4 Усилители высоких и сверхвысоких частот (УВЧ)

Транзисторные усилители ТРУ применяются в диапазоне длин волн 8 мм – 30 см. В настоящее время это основной тип усилителей. В первых каскадах усилителей стоят усилители на высокоэнергетичных электронах (НЕМТ-транзисторы). Шумовая температура этих усилителей 40 К и ниже. Для последующих каскадов используются малошумящие усилители на полевых транзисторах с более высокими шумовыми температурами.

Ширина полосы транзисторного усилителя составляет 10-15% от центральной частоты, коэффициент усиления 20–30 дБ.

Параметрические усилители (ПУ)

В ряде приемников используются параметрические усилители. Усиление сигнала в ПУ происходит за счет подкачки внешнего сигнала в колебательный контур путем из-



менения одного из реактивных параметров (C , L) в такт с частотой сигнала. Сплошной линией на рисунке показан входной сигнал ПУ, а пунктиром – сигнал, усиленный за счет подкачки энергии в контур ПУ в моменты времени, указанные стрелками.

Это тоже низкошумящие усилители. Если ПУ работают в криостатах при температуре жидкого азота или гелия, их шумовые температуры очень низкие, до 10 К. Ширина полосы ПУ также 10–15% от центральной частоты, коэффициент усиления 10–20 дБ.

Мазерные усилители (МУ)

В активном элементе мазерного усилителя с помощью магнитного поля расщепляются энергетические уровни (эффект Зеемана) и с помощью накачки внешней мощности создается инверсия населенности уровней. Падающая волна вызывает индуцированные переходы и усиливается. В качестве активного кристалла обычно используется розовый рубин. Мазерные усилители по своему принципу узкополосны, ширина полосы порядка 0.3% от центральной частоты, поэтому мазеры работают исключительно в приемниках спектральных линий.

Коэффициент усиления мазерного усилителя 25–30 дБ.

3.2.5 Синхронный детектор (СД)

На входе приемника в течение одного полупериода модуляции поступает сигнал от облучателя, в течение второго – от эквивалента. В отсутствие сигнала (антенна не наведена на источник) разность мощностей, поступающих от облучателя и эквивалента, стремятся сделать как можно меньше (сбалансировать каналы). Балансировку можно выполнить, например, введя дополнительное излучение в тот канал, температура которого ниже.

Когда один из рупоров принимает сигнал от космического радиоисточника, появляется разбаланс температур рупоров (или рупора и эквивалента). Этот разбаланс и есть полезный сигнал. Сигнал модулирован, его спектр находится на частоте модуляции.

Синхронный детектор вторично детектирует сигнал, перенося его спектр с частоты модуляции на нулевую частоту (постоянный ток). Синхронный детектор – это

фактически два ключа, на которые подаются напряжения той же частоты, что и на модулятор от ГОН. Один ключ пропускает сигнал от облучателя, второй от эквивалента, а на выходе регистрируется их разность. Если источник проходит через диа-

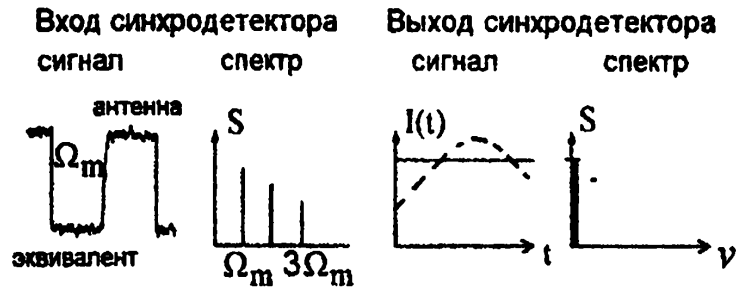


Рис. 3.10: Работа синхродетектора.

грамму, то вместо постоянного тока на выходе СД будет медленно меняющийся сигнал, повторяющий форму диаграммы направленности. При диаграммной модуляции запись получается двугорбой:



При диаграммной модуляции, когда эквивалентом служит второй облучатель, направленный в соседнюю с источником область неба, регистрация разности каналов позволяет убрать излучение облаков, находящихся на пути излучения источника, если их размеры больше углового расстояния между двумя рупорами.

3.2.6 Выходной фильтр

Выходной фильтр ставится для уменьшения оставшихся флуктуаций шумов приемника, в то же время он должен полностью пропустить весь спектр сигнала. Спектр сигнала есть Фурье-преобразование от функции времени. Чем больше время прохождения (наблюдения) сигнала, тем меньше ширина его спектра. Следовательно, мы можем поставить на выходе синхродетектора более узкополосный фильтр и уменьшить выходные флуктуации шума в $\sqrt{\Delta F}$ раз. Рис. 3.11 и 3.12 показывают размер полосы пропускания фильтра, необходимой для передачи сигнала без искажений.

Ширина спектра ΔF этих сигналов примерно равна $\frac{1}{T_{\text{прох}}}$ (обратно пропорциональна времени прохождения (наблюдения) источника). Обычно ширина фильтра выбирается из расчета самого быстрого прохождения источника.

Чаще всего в приемниках стоят RC-фильтры. Ширина полосы такого фильтра равна $\Delta F = 1/4RC$. Величина $\tau = RC$ называется постоянной времени радиометра. Ширину низкочастотной полосы приходится менять в зависимости от времени прохождения.

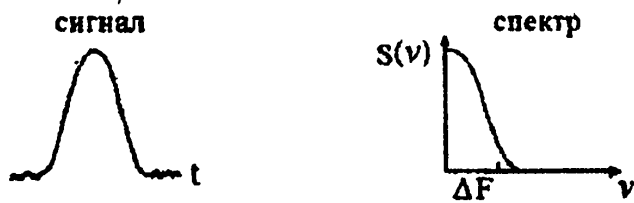


Рис. 3.11: Источник проходит через диаграмму (форма диаграммы – гауссиана).

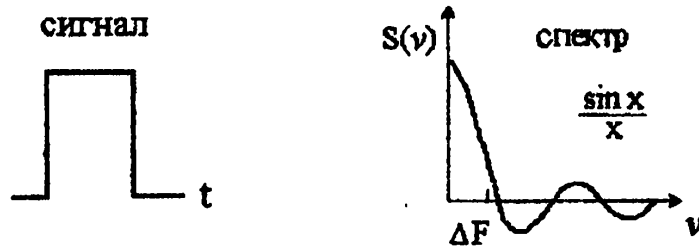


Рис. 3.12: Антенна наводится на источник, потом отводится (прямоугольный сигнал).

3.3 Приёмники для радиолиний

Для приема сигнала радиолиний обычно используются супергетеродинные приемники. Анализ спектра радиолинии производится либо с помощью акусто-оптического спектрометра, либо обычным анализатором спектра, в котором сигнал на выходе приемника проходит через множество узкополосных фильтров. Сигнал на выходе каждого фильтра дает одну точку в спектре линии. Число фильтров определяет точность изображения линии.

Такие фильтры можно реализовать либо непосредственно в ЭВМ, либо с помощью радиозлементов на выходе приемника.

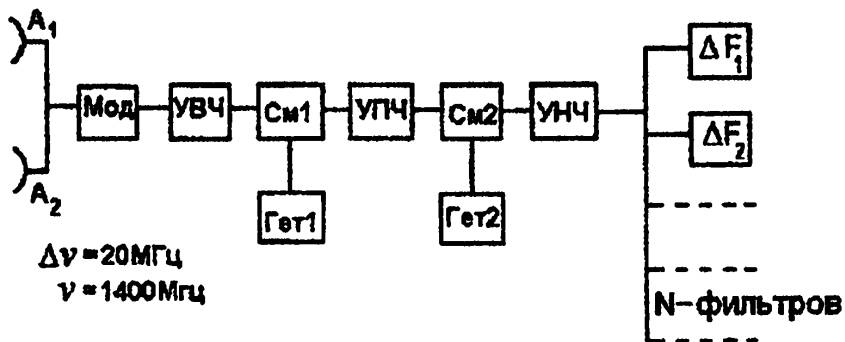


Рис. 3.13: Схема супергетеродинного приёмника.

На рис. 3.13 представлена типичная схема супергетеродинного приемника для наблюдения радиолиний. Анализ спектра в этой схеме проводится с помощью фильтров.

Первый смеситель переводит сигнал на промежуточную частоту 40–60 МГц, второй смеситель – на низкие частоты для регистрации сигнала. Интенсивность сигнала внутри линии анализируется выходными фильтрами.

На рис.3.14 приведён типичный пример эмиссионной линии. Разброс скоростей Δv составляет около 1 км/с. Пересчет частот в лучевые скорости производят по формуле Доплера. Для линий ОН 18 см $\Delta v = 1 \text{ км/с}$ соответствует $\Delta f \sim 5.6 \text{ кГц}$; при полной

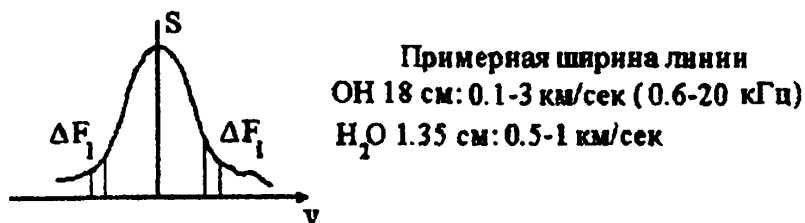


Рис. 3.14: Единичная деталь линии OH 18 см

ширине профиля $\Delta V \sim 0.1 - 3$ км/с $\Delta F \sim 0.6 - 20$ кГц, в линии H₂O 1,35 см при тех же Δv и ΔV величины Δf и ΔF в 13 раз больше (пропорционально частоте). Минимальное необходимое частотное разрешение спектрометра определяется шириной самой узкой спектральной детали, т.е. величиной Δf .

При приеме радиолинии не удастся набирать энергию за счет широкой полосы, поэтому чувствительность этих приемников значительно ниже, чем для непрерывного спектра. Для увеличения чувствительности проводят накопление сигнала, сопровождая источник иногда часами.

Для расчета чувствительности приемников спектральных линий вместо высокочастотной полосы приемника берется спектральное разрешение спектрометра, т.е. величина Δf .

3.3.1 Акусто-оптические спектрометры

На рис. 3.15 показана схема акусто-оптического спектрометра. Сигнал с выхода приемника $V(t)$ подается на акусто-оптический модулятор, состоящий из пьезоэлектрического

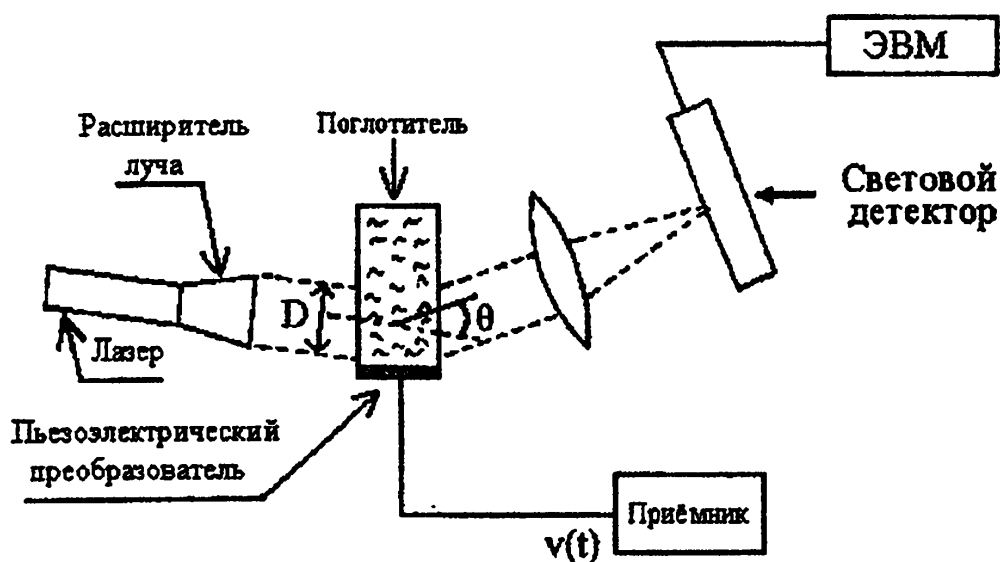


Рис. 3.15: Акусто-оптический преобразователь.

преобразователя и поглотителя (специального поглощающего вещества). Пьезоэлектрический преобразователь преобразует сигнал с выхода приемника в акустическую

волну.

Эта волна вызывает модуляцию плотности поглотителя.

Если монохроматический световой луч от лазера проходит через среду в направлении, близком к перпендикуляр к направлению акустической волны, то часть лазерного луча отклонится на угол, который зависит от длины акустической волны (диффракция Брегга).

Интенсивность отклоненного света в определенном направлении зависит от мощности сигнала на соответствующей частоте. Расширитель луча от лазера избавляет от дифракции узкого луча и увеличивает поверхность взаимодействия волн.

После модулятора отклоненный луч собирается линзой и подается на световой детектор (диодную решетку), и далее сигнал поступает в компьютер для обработки.

Угол отклонения волны равен:

$$\theta = \frac{\Lambda}{\lambda},$$

где λ – длина волны лазера, Λ – длина акустической волны.

Угловое разрешение акустооптического преобразователя:

$$\delta\theta = \frac{\lambda}{D}$$

это диаметр расширенного луча от лазера. Анализатор такого типа работает на радиотелескопе РАТАН-600.

3.4 Приёмники миллиметрового диапазона

Основная трудность приема сигнала в миллиметровом диапазоне – отсутствие малошумящих усилителей. Сигнал может приниматься непосредственно детектором без предварительного усиления по высокой частоте. Чувствительность приемника увеличивается за счет очень широкой полосы (~сотни процентов от центральной) и охлаждением до температуры жидкого гелия. В детекторах на основе сурьмянистого индия ($n - In Sb$) используется принцип разогревания (увеличения эффективной температуры) газа свободных электронов в объеме полупроводника при поглощении детектором электромагнитного излучения. Наиболее эффективно этот процесс проявляется при охлаждении сурьмянистого индия до температуры жидкого гелия 4.2 К и ниже. При этом свободные электроны в $In Sb$ обладают малой эффективной массой и поэтому могут интенсивно ускоряться электрическим полем. Созданы детекторы и на основе других полупроводников, эта область сейчас активно развивается. Низкочастотная часть приемника после детектора состоит из тех же элементов, что и у приемников сантиметрового диапазона. Субмиллиметровый диапазон тесно смыкается с инфракрасным.

Приведём таблицу общепринятых названий диапазонов и соответствующих им длин волн, частот и элементов.

ВОЛНЫ	ЧАСТОТЫ	ЛИНИИ СВЯЗИ	ЭЛЕМЕНТЫ
Длинные, средние >100 м	низкие <3 МГц	двухпроводные	с сосредоточенными параметрами: , сопротивления, конденсаторы, индуктивности, диоды, транзисторы и микросхемы низкочастотные
Короткие 10-100 м	высокие 3-30 МГц	коаксиалы	то же, только более высокочастотные диоды и транзисторы
Ультракороткие, <10 м	сверхвысокие, >30 МГц	коаксиалы волноводы полоски	элементы с распределенными параметрами, высокочастотные элементы, которые устанавливаются в волноводах и полосках

Область сверхвысоких частот делится на диапазоны:

метровый	1 - 10 м
дециметровый	10 см - 1 м
сантиметровый	1 см - 10 см
миллиметровый	1 мм - 1 см

Апертурный синтез

Для повышения углового разрешения и уменьшения влияния путаницы применяется апертурный синтез. Апертурный синтез дает возможность получать хорошее разрешение, используя ряд небольших антенн, разнесенных в пространстве. Параллельный апертурный синтез – это одновременные наблюдения на всех антеннах, последовательный синтез – это последовательные во времени наблюдения с перемещающимися по земной поверхности антеннами.

4.1 Двухэлементный интерферометр с переменной базой

Рассмотрим апертурный синтез на примере двухэлементного интерферометра с переменной базой. Две антенны расположены на рельсовых путях, расстояние между ними может меняться между d_{min} и d_{max} .

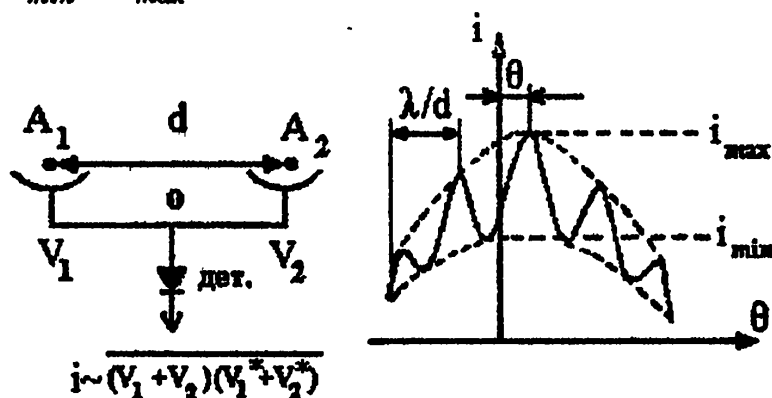


Рис. 4.1: Схема аддитивного интерферометра и ток на выходе детектора.

На рис. 4.1 изображены схема аддитивного интерферометра и ток на выходе детектора. При наблюдении источника в направлении, перпендикулярном базе, разность фаз между сигналами от двух антенн равна нулю. При наблюдении источника под углом θ к перпендикуляру появляется сдвиг фаз

$$\Delta\varphi = 2\pi d \cdot \sin \theta / \lambda.$$

При сдвиге фаз, равном нулю, сигналы складываются, при сдвиге $\Delta\varphi = \pi$ сигналы

взаимно гасятся. При движении источника относительно интерферометра на выходе будут регистрироваться интерференционные лепестки, обозначенные сплошной линией на рисунке. Их полуширина равна $\theta_{\text{леп}} = \lambda/2d$, в то время как огибающая определяется диаграммой направленности одной антенны.

Если источник точечный, то между лепестками будут регистрироваться нули, если протяженный, то суммарный сигнал не будет доходить до нуля. По конечной ширине записи можно отделить протяженный источник от точечного.

Однако размер источника $\theta_{\text{ист}} \geq \theta_{\text{леп}}$ мы не сможем измерить, так как сигнал от него придётся на много лепестков, что как бы замостит интерференционную картину. К замыванию лепестков также приводит большая ширина полосы принимаемого сигнала. Два указанных фактора приводят к тому, что реально двухэлементный интерферометр с одной базой может регистрировать только узкий диапазон углов с $\theta \approx \lambda/d$.

В теории апертурного синтеза (как и оптической интерферометрии) применяется второй путь получения изображения объекта, рассмотренный в гл.2: – вместо распределения яркости по объекту $T_{\text{я}}(\theta, \varphi)$, изображения объекта $T_{\text{а}}(\theta, \varphi)$ и диаграммы направленности антенны $A(\theta, \varphi)$ рассматриваются их Фурье-образы.

Фурье-преобразование от распределения яркости по объекту – это спектр пространственных частот – $\tilde{T}_{\text{я}}(u, v)$. Величины $u = d_1/\lambda$ и $v = d_2/\lambda$ можно рассматривать как пространственные частоты. Фурье-преобразование от изображения $T_{\text{а}}(\theta, \varphi)$ это функция видимости. Фурье-преобразование от диаграммы направленности – это пространственно-частотная характеристика антенны $\tilde{A}(u, v)$.

На рис. 4.2 показаны примеры распределения яркости по источнику, диаграммы направленности антенны, антенной температуры и их пространственные спектры.

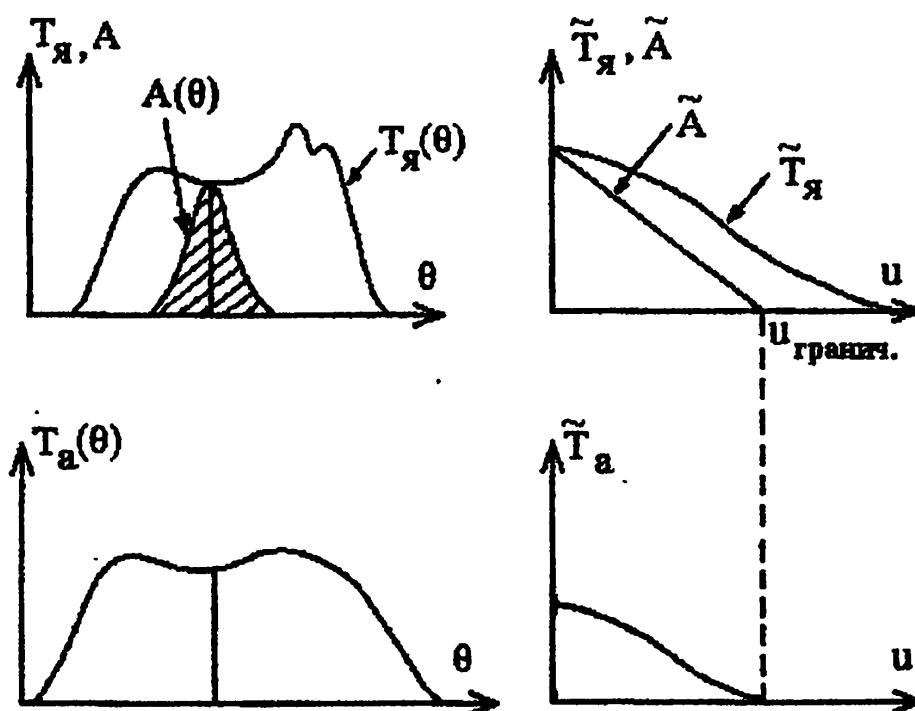


Рис. 4.2: Распределение яркости и пространственный спектр источника.

Выполнив одно наблюдение на интерферометре с данной базой, мы получаем точку в функции видимости $\tilde{T}(u, v)$. Наблюдая с разными значениями длины базы, мы можем получить, вообще говоря, всю функцию видимости. После этого, зная пространственно-частотную характеристику, можно восстановить пространственный спектр объекта. Наконец, искомое распределение яркости по объекту находится обратным преобразованием Фурье.

Можно менять длину базы по одной координате, а для получения всех остальных направлений использовать вращение Земли.

Мы видим, что, наблюдая последовательно, мы можем получить те же результаты, что и на одной большой антенне размером d . Это и есть последовательный апертурный синтез.

Если у нас есть решетка антенн с максимальной базой d , то мы можем получить разрешение в одном прохождении. Это параллельный апертурный синтез.

Каждый радиотелескоп диаметром (или базой) d_{max} имеет минимальную ширину диаграммы λ/d_{max} и, следовательно, максимальную пространственную частоту d_{max}/λ в пространственном спектре. Поэтому каждый радиотелескоп является фильтром пространственных частот: мы можем получить только те детали в реальном распределении яркости источника, спектр которых не выходит за предел

$$u_{гр} = d_{max}/\lambda.$$

Спектр изображения объекта всегда обрывается на этой граничной частоте, как это видно на рис. 4.2.

Итак, при широком спектре пространственных частот объекта (чем мельче угловые детали, тем шире спектр), выходящем за пределы $u_{гр}$, мы теряем информацию о мелких угловых деталях.

Метод получения изображения через Фурье-образы, естественно, применим и к одиночной антенне, так как ее можно рассматривать как полный набор баз¹ от нуля до D во всех направлениях. Разница только в том, что в сплошной (заполненной) апертуре явный избыток баз и чем меньше база, тем больше их число.

Чувствительность телескопа к данной пространственной частоте пропорциональна числу баз, наблюдаемых одновременно.

Физический смысл пространственно-частотной характеристики антенны заключается в том, что она показывает сколько элементарных баз одновременно участвует в формировании данной пространственной частоты.

Для сложных антенн вычисление пространственно-частотной характеристики $\tilde{A}(u)$ оказывается на практике значительно более легкой задачей, чем получение диаграммы направленности $A(\theta)$.

¹как бы маленьких интерферометров

На рис. 4.3 показаны примеры пространственно-частотных характеристик разных типов антенн (в одномерном варианте).

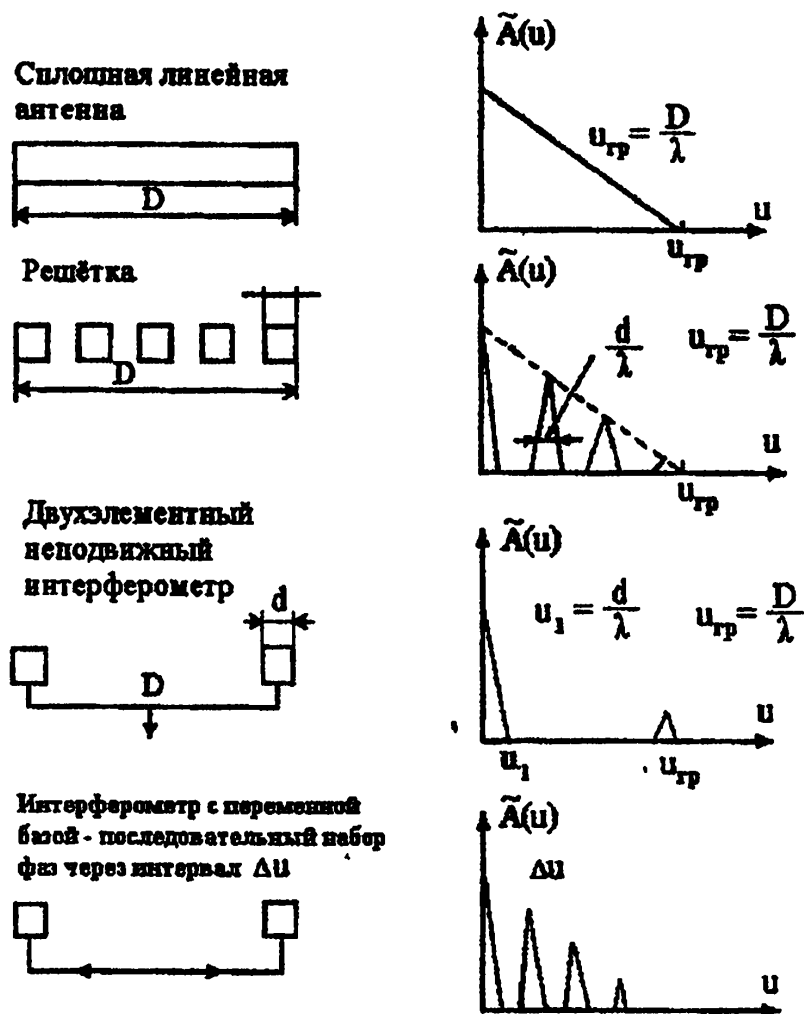


Рис. 4.3: Пространственно-частотные характеристики разных типов антенн.

Возникают два вопроса: какую детальность изображения можно получить с данной максимальной базой и через какие интервалы следует переставлять антенны внутри максимальной базы, чтобы не потерять качество изображения?

Ответ на эти вопросы дает теорема Котельникова (теорема отсчетов). Она гласит: *любая непрерывная функция $f(x)$, спектр которой ограничен полосой частот ΔF , полностью определяется последовательностью значений, отсчитанных через интервалы*

$$\Delta X = \frac{1}{2\Delta F}.$$

Согласно этой теореме детальность изображения равна:

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{2d_{\max}}.$$

Мы получили известную формулу – разрешение по Релею. Обратная задача: если источник ограничен в пространстве и его размер равен θ_u , то для восстановления распре-

деления яркости достаточно проводить измерения через интервалы:

$$\Delta u = \frac{1}{2\theta_u}.$$

Тогда необходимое число перестановок антенны равно:

$$n = \frac{u_{max}}{\Delta u} = \frac{2d_{max} \cdot \theta_u}{\lambda} = \frac{\theta_u}{\Delta \theta}.$$

На выходе интерферометра при данной базе мы получаем одну компоненту функции видимости, эта компонента равна коэффициенту корреляции напряжений, наведенных в двух антеннах:

$$\Gamma = \frac{\overline{v_1 \cdot v_2^*}}{\overline{v_1 \cdot v_1^*}} = \frac{\tilde{T}(\frac{2\pi D}{\lambda})}{\tilde{T}(0)}.$$

Величина Γ называется функцией взаимной когерентности. В знаменателях – нормировочные величины (приведение максимумов к единице). Для получения точки (амплитуды) в функции видимости нам нужно получить коэффициент корреляции – произведение напряжений, наведенных в двух антеннах с учетом фаз.

Для рассмотренного нами аддитивного интерферометра можно перейти к токам на выходе детектора:

$$\begin{aligned} i \sim v \cdot v^* &= \overline{(v_1 + v_2) \cdot (v_1^* + v_2^*)} = \overline{v_1 \cdot v_1^*} + \overline{v_2 \cdot v_2^*} + \overline{v_1 \cdot v_2^*} + \overline{v_2 \cdot v_1^*} = \\ &= 2 \cdot \overline{v_1 \cdot v_1^*} \left(1 + \operatorname{Re} \frac{\overline{v_1 \cdot v_2^*}}{\overline{v_1 \cdot v_1^*}} \right) = 2 \cdot \overline{v_1 \cdot v_1^*} (1 + \operatorname{Re} \Gamma). \end{aligned}$$

Здесь учтено, что для одинаковых антенн $\overline{v_1 \cdot v_1^*} = \overline{v_2 \cdot v_2^*}$.

При движении источника ток $i(\theta)$ будет меняться по гармоническому закону, причем

$$i_{max} = 2 \cdot \overline{v_1 \cdot v_1^*} (1 + |\Gamma|), \quad i_{min} = 2 \cdot \overline{v_1 \cdot v_1^*} (1 - |\Gamma|).$$

Измеряя i_{max} и i_{min} , мы можем получить точку в функции видимости $\tilde{T}_s$:

$$|\Gamma| = \frac{i_{max} - i_{min}}{i_{max} + i_{min}}.$$

Модуль функции видимости означает потерю фазы. Это то же, что в оптической интерферометрии яркость интерферометрических колец:

$$|\Gamma| = \frac{J_{max} - J_{min}}{J_{max} + J_{min}}.$$

4.2 Основные схемы интерферометров

Рассмотренный в предыдущем параграфе аддитивный интерферометр практически не применяется. В настоящее время работают две основные схемы интерферометров и их разновидности.

1. Интерферометр интенсивностей. Высокочастотные сигналы от антенн усиливаются,

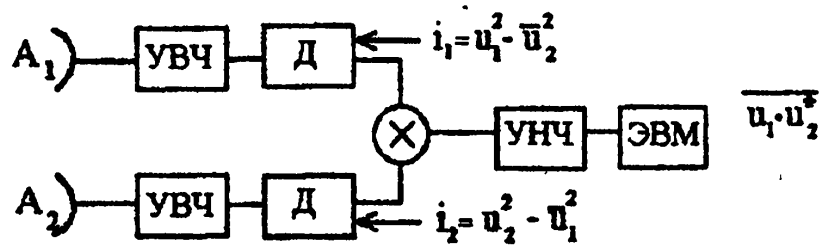


Рис. 4.4: Интерферометр интенсивностей.

детектируются непосредственно у антенн (спектр переносится на низкие частоты). Продетектированные сигналы, пропорциональные входным интенсивностям по кабелям подаются к коррелятору (перемножителю), где определяется коэффициент корреляции. Чтобы получить всю функцию видимости, необходимо изменить расстояние между антеннами.

2. Корреляционный интерферометр. Сигналы усиливаются около антенн, и затем с

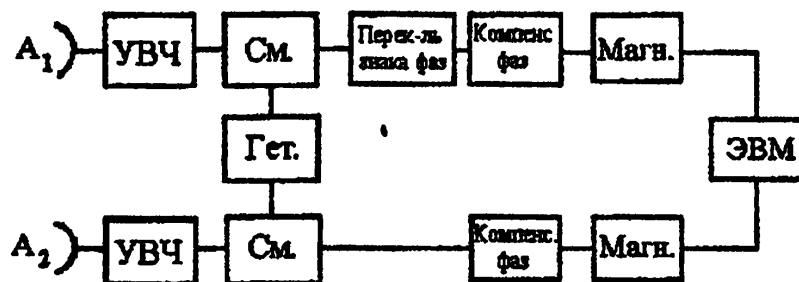


Рис. 4.5: Корреляционный интерферометр.

помощью смесителя их спектр переносится в область промежуточных частот. В одном из каналов фаза переключается между 0 и π (модуляция), затем в обоих каналах убираются лишние фазы 2π , так как это лишняя информация – лишние биты в ЭВМ. Затем информация записывается на магнитные носители. Все остальное: синхронное детектирование, фильтрация – выполняется программным способом. На выходе синхронного детектора выделяется разностный сигнал:

$$P_{\text{вых}} = \underbrace{(u_1 + u_2)^2}_0 - \underbrace{(u_1 - u_2)^2}_{\pi}.$$

переключатель:

Выходная мощность пропорциональна компоненте функции видности.

$$P_{\text{вых}} \sim \overline{u_1 \cdot u_2^*}.$$

Эта схема обладает преимуществами по сравнению с первой – улучшается отношение сигнал/шум, исключается галактический фон, сохраняются фазы входных сигналов.

Сохраненные фазы используются для измерений координат радиоисточников с высокой точностью. Разность фаз зависит от координат источника и координат самой базы:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} D[\sin \delta_s \cdot \sin \delta_n + \cos \delta_s \cos \delta_n \cos(t_s - t_n)].$$

Здесь δ_n , t_n – склонение и часовой угол источника, D – длина базы, δ_s , t_s – небесные координаты базы, точка $B(\delta_s, t_s)$ – проекция базы на небесную сферу. Наблюдая

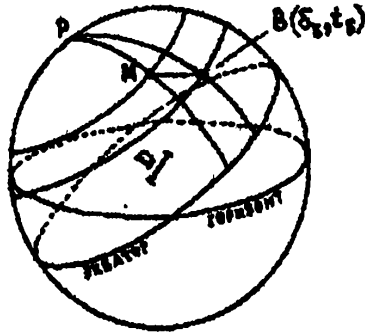


Рис. 4.6: К измерению координат источника М.

специальные калибровочные источники, находят точные координаты базы, а затем из измеренной разности фаз и координат базы определяют точные координаты искомого источника. Чтобы не замывались лепестки, у всех интерферометров полоса принимаемых частот $\Delta\nu/\nu$ должна быть значительно меньше отношения D/d , обычно полоса не превышает 1%. Поэтому чувствительность интерферометров обычно невысокая. Эффективная площадь интерферометра равна сумме площадей двух антенн. Значительно повышая разрешение, интерферометрия проигрывает в чувствительности.

3. Интерферометры со сверхдлинными базами (VLBI).

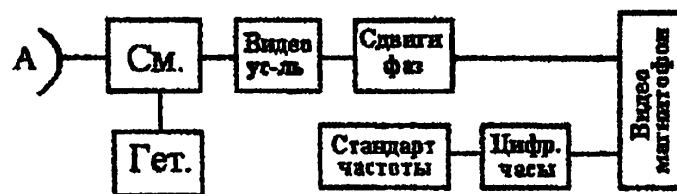


Рис. 4.7: VLBI.

В интерферометрах с дальними и сверхдальними базами запись сигналов с каждой из используемых антенн проводится независимо. Главная трудность – очень точное совмещение различных записей по времени. Для этого используются атомные и водородные стандарты частоты. В настоящее время возможно получение относительной частотной стабильности порядка 10^{-14} . Затем записи с разных антенн привозятся в один пункт и обрабатываются совместно.

Синхронное детектирование, фильтрация и нахождение функции корреляции может быть осуществлено как аппаратно, так и программно в ЭВМ.

В одном из экспериментов на базе 6300 км (США–Швеция) получено разрешение 0.0006 угловых секунд на длине волны 6 см.

4.3 Радиотелескопы апертурного синтеза (или радиотелескопы с незаполненной апертурой)

С помощью двух антенн получить хорошее двумерное изображение – это достаточно долгая задача. Поэтому обычно используют композиции нескольких антенн. Часть из них может быть расположена стационарно, часть — двигаться по рельсовым путям. Рассмотрим некоторые типы антенн апертурного синтеза.

1. Крестообразные антенны.

Крест – самый распространенный радиотелескоп апертурного синтеза. На антеннах этого типа можно сразу получать хорошее разрешение по двум координатам. Обычно они используются в режиме параллельного синтеза. Пример: крест Миллса в Мо-

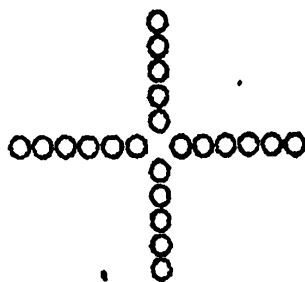


Рис. 4.8: Крестообразная антенна.

лонгло, Австралия. Плечи креста – параболические цилиндры (рефлекторы). Размер $1600 \times 1600 \text{ м}^2$. Цилиндры покрыты сеткой, точность поверхности 1 см. Рабочие волны 75 см и 3 м. На 75 см разрешение $2'8 \times 2'8$, эффективная площадь $2 \cdot 10^4 \text{ м}^2$. Большинство радиотелескопов типа "крест" состоит из отдельных антенн.

В России самый крупный крест построен в Пушчино. Его размеры $40 \times 1000 \text{ м}$ в направлении восток - запад и столько же в направлении север - юг. Основная особенность – широкий диапазон частот от 30 до 120 МГц, который обеспечивается широкополосной системой облучения. Работает в режиме параллельного синтеза. Ширина диаграммы на волне 3 м – $3' \times 3'$, эффективная площадь $40\,000 \text{ м}^2$.

2. Y-образные антенны.

Эти антенны позволяют получать одновременное разрешение по трем направлениям. Самая большая антенна этого типа VLA (Very Large Array) построена в штате Нью-Мексико, США. На рельсовых путях расположены 27 пологоповоротных параболоидов

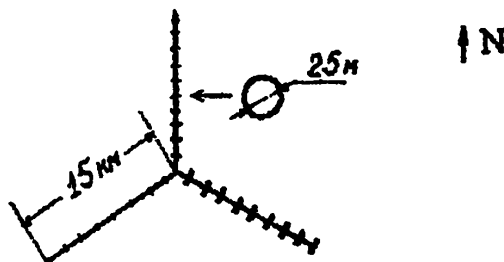


Рис. 4.9: Схема VLA.

диаметром 25 м каждый. Длина одного отростка антенны 15 км. Радиотелескоп рабо-

тает в сантиметровом диапазоне (2–20 см) в режиме последовательного или параллельного синтеза. На частоте 2700 МГц синтезированное разрешение составляет $2'' \times 2''$.

В Индии вводится в строй Y-образный радиотелескоп апертурного синтеза, состоящий из 30 параболических антенн диаметром 45 м каждая. Он работает в дециметровом диапазоне.

3. Т-образные антенны.

Примером может служить Т-образный радиотелескоп в Болонье (Италия).

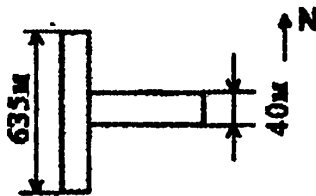


Рис. 4.10: Схема радиотелескопа в Болонье.

Размеры: Север-юг – 635×24 м, восток-запад – 572×40 м, площадь – $27\,000\text{ м}^2$. На частоте 408 МГц разрешение составляет $2.6' \times 4.8'$. Работает в режиме параллельного синтеза.

Эффективно работает радиотелескоп такого типа в Харькове (УТР-2), состоящий из 2040 широкополосных вибраторов, 1440 – север-юг и 600 – восток-запад. Этот телескоп работает в дециметровом диапазоне, и на 15 м разрешение составляет 30×30 угловых секунд. Эффективная площадь равна $5 \cdot 10^4\text{ м}^2$.

4. Одномерные решётки.

Одномерные решётки, состоящие из N одинаковых неподвижных антенн, позволяют получить хорошее разрешение по одной координате в режиме параллельного апертурного синтеза и за счет вращения Земли получать изображение по всем координатам.



Рис. 4.11: Одномерная решётка.

5. Компаунд интерферометры.

Компаунд интерферометры представляют собой сочетание линейных апертур с отдельными антеннами. Часть антенн – стационарные, часть перемещается по рельсовым путям.

Пример: Голландия, Вестерборк. Антенна представляет собой линейку из 12 неповоротных параболических антенн 25 м. Максимальная протяженность 1600 м. Разрешение на волне 21 см равно $22''$. Основной ряд антенн – стационарный, часть может перемещаться. Последовательный апертурный синтез осуществляется за счет вращения Земли.

6. Многоэлементные интерферометры. Многоэлементные интерферометры состоят из нескольких стационарных или частично подвижных антенн определенным

образом расположенных на Земле. Расположение по обеим координатам и расстояния между антеннами определяется желаемым набором баз для получения функции видимости. Пример такого инструмента – техасский интерферометр, состоящий из 6 антенн:

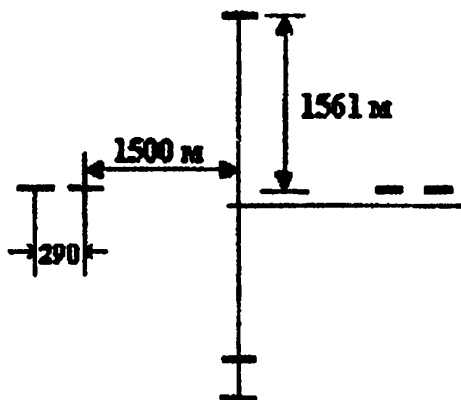


Рис. 4.12: Схема многоэлементного интерферометра.

7. Кольцевые антенны. Кольцевые антенны – это ряд антенн, расположенных по кольцу. Пример: кольцевой радиогидрограф Уайлда в Културе (Австралия) для исследования Солнца и внегалактических источников на волне 3 м (в настоящее время не действует). 96 антенн диаметром 13 м расположены по кругу диаметром 3 км. Фазовое управление элементами позволяет осуществить быстрое сканирование диаграммой и формирование радиоизображения области $2^\circ \times 2^\circ$ за 1 сек. Кольцевая антенна может представлять собой сплошной параболоид без центральной части.

8. Система случайно расположенных антенн. Радиотелескоп такого типа осуществлен в Англии, где ряд крупных антенн на территории Англии соединен в единую сеть с помощью телеметрии. Максимальная база равна 233 км, рабочие частоты – 151, 408, 1666 и 5000 МГц. Система называется МЕРЛИН. Аналогичная сеть сейчас осуществляется в Австралии.

Можно, например, использовать все антенны на Земле чтобы получить разрешение, определяемое диаметром Земли.

9. Космический радиотелескоп. Одна из антенн выносится в космос, что позволяет получить разрешение больше, чем $\lambda/D_{\text{Земли}}$. Сейчас готовится проект РАДИОАСТРОН.

Антенна 10 м, вынесенная в космос, должна работать совместно с рядом наземных антенн. Предполагается достигнуть разрешения 10^{-6} угловой секунды на волне 6 см.

Основные характеристики радиотелескопов апертурного синтеза.

- Эффективная площадь определяется суммой площадей всех антенн, которые задействованы одновременно.
- Размер синтезируемой области определяется диаграммой направленности отдельного элемента (антенны).
- Синтезированное разрешение $\Omega_{\text{синт}}$ – телесный угол главного лепестка диаграммы,

определяемый максимальными размерами радиотелескопа.

– Коэффициент избыточного разрешения – отношение телесного угла главного лепестка одного элемента к синтезированному разрешению: $k = \Omega_{\text{синт}}/\Omega_a$.

Коэффициент избыточного разрешения антенны с заполненной апертурой равен 1.

Получение полного спектра пространственных частот часто называют синтезом U-V-плоскости. Если не удастся получить все гармоники в спектре пространственных частот (не все базы можно обеспечить), то говорят о дырах на U-V-плоскости. На рисунке

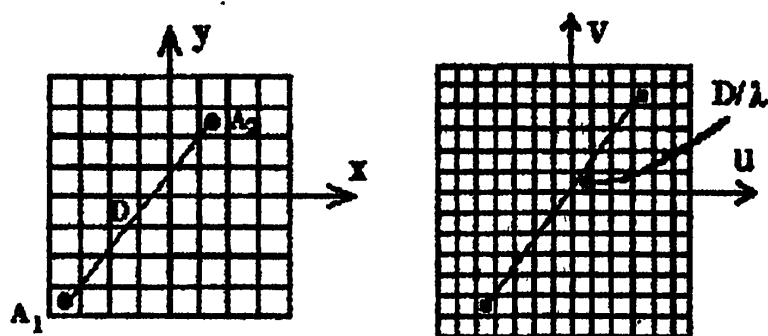


Рис. 4.13: U-V плоскость интерферометра с переменной базой.

13 показана U-V-плоскость интерферометра с переменной базой. При наличии всех баз и всех ориентаций мы получим полное заполнение U-V-плоскости и, следовательно, изображение исследуемой области с разрешением

4.4 Радиотелескоп РАТАН-600

Этот радиотелескоп — самый крупный в России, его трудно отнести к какому-либо из рассмотренных типов. Такие телескопы (прототип — Большой Пулковский радиотелескоп) иногда называют антеннами переменного профиля (АПП). РАТАН-600 расположен на окраине станицы Зеленчукская Карачаево-Черкесской Республики. Его диаметр равен 588 м, предельная длина волны — 8 мм. Основной отражатель — замкнутое кольцо состоящее из 900 одинаковых элементов размером 2×7.4 м. В процессе эксплуатации все щиты были наращены в высоту до 11.4 м для увеличения площади и уменьшения влияния Земли.

Внутри кольца расположен плоский отражатель и 12 радиальных рельсовых путей. Наблюдения могут проводиться всего в 12, а одновременно в четырех азимутах по четырем независимым программам, при этом для каждой программы используется $\frac{1}{4}$ кольца.

Щиты основного отражателя имеют три степени свободы. При изменении высоты наблюдения щиты перестраиваются в форму параболического конуса, фокус меняется путем перемещения облучателя. Излучение, принятое четвертью кольца, собирается специальным вторичным отражателем, который представляет собой часть параболического цилиндра. Облучатель преобразует сходящуюся цилиндрическую волну в сходящуюся

сферическую и фокусирует сигнал непосредственно на входные рупоры-облучатели приемной аппаратуры (первичные облучатели). Достаточно большие размеры безаберрационного поля (определяемые цилиндричностью волны) позволяют размещать на фокальной линии облучатели нескольких приемников. На рис. 4.15 приведен пример рас-

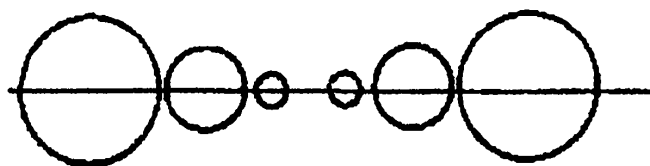


Рис. 4.14: Первичные облучатели на фокальной линии.

положения рупоров-облучателей на фокальной линии. Один из облучателей работает с плоским отражателем (см. антенны с плоским отражателем). Это позволяет проводить наблюдения в меридиане по двум программам одновременно. Диаграмма направленности антенны при этих наблюдениях имеет ножевую форму: ее размеры в горизонтальной плоскости определяются размером используемой апертуры (хордой $1/4$ кольца), в вертикальной плоскости высотой приемных щитов и углом места наблюдения (при работе с плоским отражателем практически только высотой щитов).

РАТАН-600 может работать и как кольцевая антенна (система параллельного апертурного синтеза). Для сбора отраженного от всего кольца сигнала используется специальный облучатель. В этом режиме можно наблюдать область вблизи зенита. РАТАН-

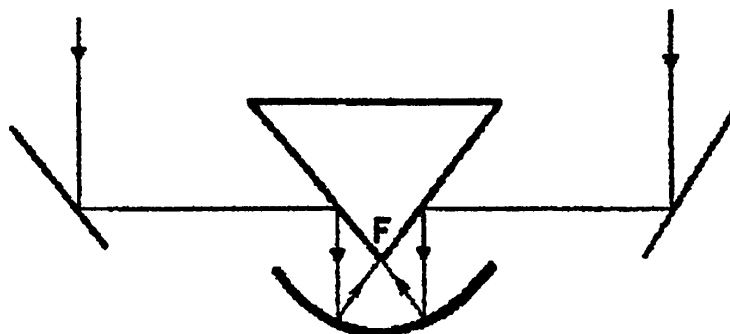


Рис. 4.15: Ход лучей в режиме работы всего кольца.

600 может также работать в режиме последовательного апертурного синтеза. Наблюдения источника (или области) проводятся последовательно в разных азимутах, при этом можно получить разрешение в 12 азимутах, соответствующее диаметру кольца.

Методы наблюдения и обработка

5.1 Измерение параметров антенн

Искусственный калибровочный сигнал

Искусственный калибровочный сигнал от генератора шума (ступенька) калибруется по температуре. Вместо рупоров-облучателей на вход приемника ставятся согласованные нагрузки с известными температурами, например, жидкого азота и гелия. Разность

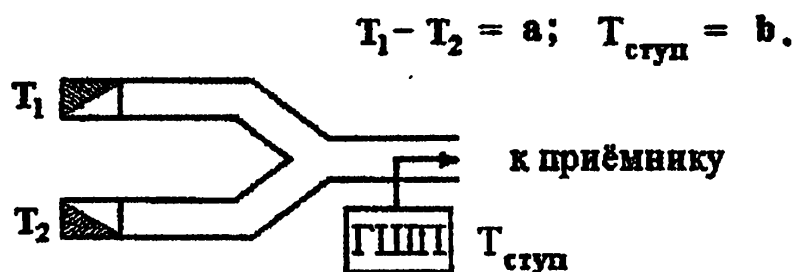


Рис. 5.1: Измерение температуры калибровочного сигнала.

тепловых излучений от этих нагрузок регистрируется на выходе радиометра, по этой разности получаем точную температуру калибровочного сигнала.

$$T_1 - T_2 = a, \quad T_{\text{ступ}} = b.$$

Измерение эффективной площади антенны

Эффективная площадь всегда зависит от длины волны и может зависеть от высоты и азимута наблюдения.

Эффективную площадь можно получить из формулы:

$$S = \frac{2kT}{A_{\text{эфф}}}, \quad A_{\text{эфф}} = \frac{2kT}{S}.$$

Мы сможем определить эффективную площадь, если наблюдаем калибровочный источник с известным потоком и измерим его антенную температуру. Калибровочные источники – это источники с известными постоянными потоками, имеющие угловые

размеры, значительно меньшие ширины диаграммы направленности на данной волне, или источники с известным распределением радиояркости.

Мы наблюдаем калибровочный источник, по искусственному калибровочному сигналу находим его антенную температуру и по формуле получаем эффективную площадь радиотелескопа на данной волне. Наблюдая источники на разных углах места и азимутах, определяем зависимость эффективной площади от координат. Для каждой антенны получаются графики зависимости эффективной площади от длины волны, высоты и азимута.

У полноповоротных параболоидов эффективная площадь обычно слабо зависит от высоты и азимута.

Диаграмма направленности антенны

Диаграмма направленности антенны всегда зависит от длины волны (λ/D) и также может зависеть от высоты и азимута. Диаграмму обычно получают наблюдая точечные источники, при этом запись источника повторяет форму диаграммы направленности.

Если источник имеет достаточно большой поток, то мы можем измерить и первые боковые лепестки, в которых усиление на 20–30 дБ меньше, чем в центре главного лепестка.



Рис. 5.2: Запись точечного источника. Её ширина равна ширине диаграммы антенны.

Шумовая температура антенны

Для измерения шумовой температуры антенны вместо одного рупора ставится нагрузка, находящаяся при известной температуре. При отсутствии источника антенная темпе-

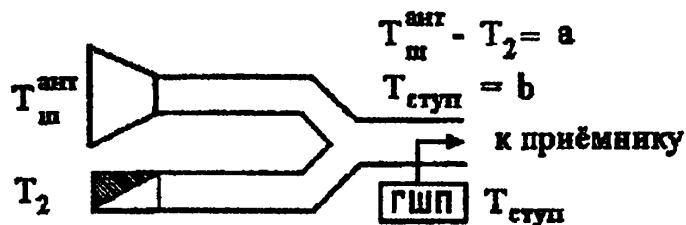


Рис. 5.3: Измерение шумовой температуры антенны.

ратура рупора, направленного в небо, дает шумовую температуру антенны. Перепад небо - нагрузка сравнивается с температурой ступеньки:

$$T_{\text{ант}}^{\text{ш}} - T_2 = a, \quad T_{\text{ступ}} = b.$$

5.2 Методы наблюдений радиоисточников

1. Прохождение радиоисточника через диаграмму в результате вращения Земли.

Антенна выставляется на ту точку неба, через которую должен пройти источник в результате суточного движения Земли. Для надо знать эфемериды источника и звездное

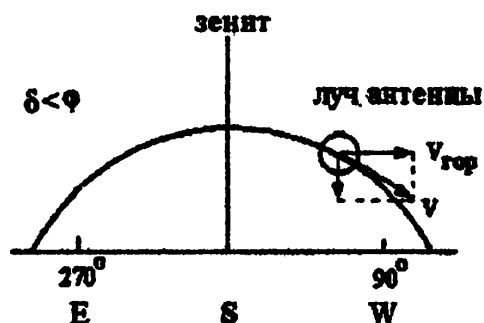


Рис. 5.4: Прохождение радиоисточника через диаграмму.

время наблюдения. Время прохождения источника через диаграмму равно

$$T_{\text{прох}} = \frac{\theta}{v}, \quad v = 15 \frac{''}{\text{сек}} \cdot \cos \delta,$$

где v – суточная скорость. Горизонтальная составляющая скорости:

$$v_{\text{гор}} = 15 \frac{''}{\text{сек}} \cdot \cos \delta \cdot \cos q,$$

q – параллактический угол (угол между кругом склонения и вертикалом источника):

$$\sin q = \frac{\sin A}{\cos \delta} \cdot \cos \varphi.$$

2. Сканирование по источнику.

Под управлением ЭВМ антенна движется навстречу источнику, сокращая время прохождения через диаграмму, либо в сторону суточного движения, увеличивая его (режим скольжения). Увеличение времени прохождения повышает чувствительность телескопа.

3. Метод ON-OFF.

Антенна наводится на источник, затем отводится в сторону. На выходе регистрируется разность между мощностью от источника и нулевым уровнем приемника.

4. Сканирование площадки.

Если координаты источника имеют низкую точность, приходится сканировать лучом антенны площадку вокруг источника и искать максимум сигнала. При сканировании мы

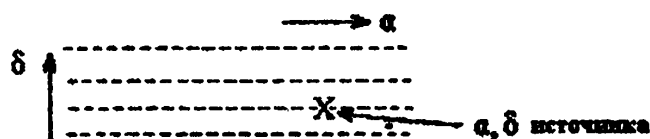


Рис. 5.5: Сканирование площадки.

получаем более точные координаты.

Если наблюдения ведутся на меридианном инструменте, то приходится наблюдать источник несколько дней, каждый раз меняя высоту установки.

Калибровка потока При каждом наблюдении источника (до или после) включают генератор шума – калибровочную ступеньку. Ступеньку можно откалибровать в единицах потока по калибровочным источникам. Сравнивая амплитуду сигнала от источника с амплитудой калибровки, мы находим поток исследуемого радиоисточника.

Можно сравнивать поток исследуемого источника и непосредственно с потоками калибровочных источников, но это увеличивает время наблюдений; кроме того, между двумя наблюдениями возможны изменения усиления, что приводит к ошибкам измерений потоков. Поэтому обычно пользуются калибровочными сигналами ГШП.

5.3 Обработка наблюдений

На выходе приемника у нас есть постоянный (или медленно меняющийся из-за прохождения) сигнал от радиоисточника и шумы приемника с нулевым средним значением.

Шум на выходе приемника обычно имеет нормальное (гауссово) распределение, характеризующееся среднеквадратичным значением σ . Как мы помним из статистики, 95% отклонений шума находятся внутри интервала $\pm 2\sigma$, 99.8% – внутри интервала $\pm 3\sigma$,

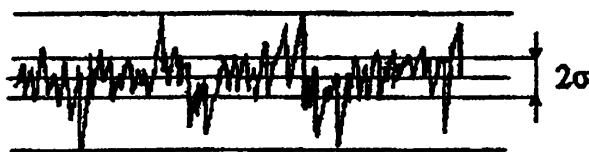


Рис. 5.6: Шумовая дорожка.

то есть отношение амплитуды шумовой дорожки к среднеквадратичному значению примерно равно шести. Информацию с выхода приемника с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП) вводится в ЭВМ. Частота съема точек в АЦП задается теоремой отсчетов:

$$\Delta t = \frac{1}{2} \Delta F,$$

ΔF – ширина полосы выходного фильтра приемника. Запись прохождения радиоисточника может выглядеть так, как показано на рисунке 5.7. Источник и калибровочная



Рис. 5.7: Пример записи прохождения радиоисточника.

ступенька видны на фоне шумов от температурных дрейфов, помех, уходов шумовой дорожки.

Наилучший результат при обработке точечных источников дает метод оптимальной фильтрации, который предполагает априорное знание аппаратной функции – отклика на прохождение радиисточника. Мы обрабатываем сигнал, форма которого нам известна.

Рассмотрим обработку на примере прохождения сигнала через два рупора (диаграммная модуляция).

Стадии обработки:

1. Чистка записи от импульсных помех.

Для этого используются математические линейные или нелинейные фильтры. Линейные фильтры – любая линейная комбинация исходных данных:

$$\sum w_i I_i,$$

где I_i – исходные точки, w_i – вес, в том числе и $w = 1$. Линейные фильтры хорошо работают с шумом, имеющим нормальное распределение. Однако присутствие импульсных помех искажает распределение шумов, поэтому для чистки записей используются исключительно нелинейные фильтры.

Наиболее распространенным нелинейным фильтром является медианный фильтр. Его суть такая: берем, например, первые 3 точки шумов, выстраиваем их по росту и вместо первой точки ставим среднюю по росту (медианную) точку. Затем сдвигаемся на одну точку. Следующие три точки выстраиваем по росту и вместо второй точки наших шумов ставим медианное значение и так далее. При этом точки становятся зависимыми, что нужно учитывать при расчетах ошибок.



Рис. 5.8: Медианный фильтр.

Нетрудно видеть, что самые большие отклонения будут убраны из записи. Можно взять не 3 точки, а 5, 7 и более. Это число точек, по которым ищется медианное значение, называется апертурой фильтра. Фильтр убирает помехи длительностью около половины апертуры. Если взять достаточно большую апертуру, то можно убрать помехи любой длительности, в том числе и запись самого источника.

Кроме медианного фильтра часто используются фильтры Ходжеса–Леммана. Эти фильтры отличаются от медианных тем, что в получении медианного значения участвуют не только сами точки записи, но и полусуммы всех возможных комбинаций из двух различных отсчетов. Если апертура фильтра равна n точкам, то в результате появляется

$$(n + 1) \cdot n/2$$

точек, что при больших n существенно увеличивает время сортировки.

После убирания помех запись выглядит так, как показано на рисунке 5.9.



Рис. 5.9: Запись прохождения источника через диаграмму после убирания помех.

2. Вычитание источника из записи.

Пропускаем запись через фильтр с большой апертурой, такой, чтобы убрать из записи источник, а калибровки и более длительные уходы остались (рис. 5.10).



Рис. 5.10: Вычитание источника из записи.

3. Из записи 1 вычитаем запись 2, остается запись источника на фоне шума без дрейфов и помех.



Рис. 5.11: Запись источника на фоне шума, без дрейфов и помех.

4. Операции 2 – 3 можно проделать с другой апертурой, убирающей калибровочный сигнал, что позволяет определить значение калибровки с устранением трендов.

5. Собственно оптимальная фильтрация.

Проводится свертка этих записей J_i с диаграммой направленности. Диаграмма направленности, отнормированная к $A_{\text{макс}} = 1$, закладывается в программу обработки либо в виде точек, либо в виде формул (по азимуту и углу места), коэффициенты в формулах могут меняться в зависимости от углов наблюдения.

Чаще всего диаграмма аппроксимируется гауссовой функцией:

$$A(\theta) \sim e^{-k^2 \theta^2}.$$

В присутствии источника выходные флуктуации равны:

$$J_i = S \cdot A_i + j_i,$$

где j – шумы аппаратуры.

$$\text{Свертка} = \frac{\sum J_i \cdot A_i}{\sum A_i^2} = \frac{\sum ((S \cdot A) + j_i) \cdot A_i}{\sum A_i^2} = S + \frac{\sum j_i \cdot A_i}{A_i^2}.$$

Добавка $\Sigma(j_i \cdot A_i)/\Sigma A_i^2$ имеет нулевое среднее ($\Sigma A_i = 0$) и характеризуется только своей дисперсией $\sigma_{св}$.

Для получения потока от источника в тех же единицах, что и исходные, запись необходимо отнормировать на ΣA_i^2 . При этом ошибка измерения потока определяется дисперсией $\sigma_{св}$. Найдем, чему равна дисперсия шумов после свертки:

Процесс	Дисперсия процесса
j_i	σ^2
$j_i \cdot A_i$	$\sigma^2 \cdot A_i^2$
$\Sigma j_i \cdot A_i$	$\sigma^2 \cdot \Sigma A_i^2$
$\Sigma j_i \cdot A_i / \Sigma A_i^2$	$\sigma^2 / \Sigma A_i^2 = \sigma_{св}^2$

Если среднеквадратичное значение шумов на выходе приемника было σ , то среднеквадратичное значение шумов после проведения операции свертки уменьшается в $\sqrt{\Sigma A_i^2}$ раз, то есть обработка с априорным знанием диаграммы дает выигрыш в $\sqrt{\Sigma A_i^2}$ раз в отношении сигнал/шум.

Мы задаем в программе порог в среднеквадратичных значениях шума $n \cdot \sigma_{св}$, при превышении данного порога мы считаем источник обнаруженным. Порог $n \cdot \sigma_{св}$ выбирается в зависимости от поставленной задачи. Если нам неизвестно, есть ли источник в данном месте, то обычно выбирают порог $5 \cdot \sigma_{св}$. При снижении порога увеличивается вероятность ложного открытия источника (флуктуации могут и случайно принять форму диаграммы).

Искомый поток в Янских получается по формуле:

$$S(\text{Яв}) = \frac{S \cdot k}{M},$$

где M – величина калибровочной ступеньки в машинных единицах,

K – величина ступеньки в Янских (известна заранее),

S – поток обнаруженного источника в машинных единицах.

Описанный метод оптимален только для источников, размеры которых малы по сравнению с диаграммой.

Протяжённые источники обрабатываются по-другому. Ширина записи протяжённого источника определяется не только шириной диаграммы антенны, но и угловым размером источника. Можно, например, сравнивать запись прохождения и сигнал вида: $ae^{-b^2 x^2}$.



Меняя параметры a и b , мы каждый раз считаем сумму остаточных отклонений $\Sigma(j_i - x_i)$.

Когда эта сумма окажется минимальной, мы получим искомые параметры, которые дадут нам поток и угловой размер изображения источника. Положение источника и приблизительное значение a и b мы можем получить, сравнивая запись с откликом от антенны, а затем провести описанную оптимизацию по двум параметрам.

Вспомним, что изображение есть свертка истинного распределения яркости с диаграммой направленности антенны.

Если мы определяем поток просто по максимуму, а угловой размер источника известен, то полный (интегральный) поток:

$$S_{\text{и}} = \frac{2kT_{\text{а}}}{A_{\text{эфф}}} \cdot g ,$$

g – коэффициент, учитывающий соизмеримость угловых размеров источника и диаграммы.

В общем случае при произвольной форме диаграммы направленности $A(\theta, \varphi)$ и произвольном распределении радиояркости по источнику $T_{\text{я}}(\theta, \varphi)$, коэффициент g определяется соотношением:

$$g = \frac{\int_{\Omega_{\text{я}}} T_{\text{я}}(\theta, \varphi) d\Omega}{\int_{\Omega_{\text{я}}} T_{\text{я}}(\theta, \varphi) A(\theta, \varphi) d\Omega} .$$

Для источников с гауссовым распределением радиояркости и при гауссовской аппроксимации диаграммы направленности коэффициент g приближенно равен:

$$g = \sqrt{\left[1 + \left(\frac{\varphi_{\text{и}}}{\varphi_{\text{а}}}\right)^2\right] \cdot \left[1 + \left(\frac{\theta_{\text{и}}}{\theta_{\text{а}}}\right)^2\right]} ,$$

где $\theta_{\text{и}}$, $\varphi_{\text{и}}$, $\theta_{\text{а}}$, $\varphi_{\text{а}}$ – соответственно, ширина источника и диаграммы в плоскостях по уровню половинной мощности.

Точность определения потоков.

Среднеквадратичная ошибка потока одного наблюдения обычно состоит из трех слагаемых:

$$\sigma_s = \left(\sigma_{\text{ш}}^2 + \frac{\sigma_k^2}{k^2} \cdot S^2 + \sigma_{\text{прив}}^2 \right)^{1/2} ,$$

где $\sigma_{\text{ш}}$ – среднеквадратичное значение шума,

σ_k/k – относительная ошибка калибровочного сигнала,

$\sigma_{\text{прив}}$ – точность привязки нашей ступеньки к калибровочному источнику с заданным потоком.

При N наблюдениях данного источника ошибка потока уменьшается в $\sqrt{N}$ раз для первых двух слагаемых.

Точность определения координат.

Координаты источника определяются из азимута, высоты наведения антенны на максимум потока и звездного времени прохождения максимума записи по известным формулам. Полученные видимые экваториальные координаты (эфемериды) пересчитываются

в средние координаты с учетом прецессии, нутации и рефракции на эпоху 1950.0 или 2000.0 г. Эти координаты приводятся в каталогах радиисточников.

Существует ряд причин, по которым диаграмма направленности может несколько смещаться по азимуту и углу места – текучесть материала конструкций, просадки почвы, ветровые нагрузки и т.д. Поэтому установка антенны должна проверяться по источникам, координаты которых точно измерены (калибровочные по координатам). Для разных углов наблюдения вычисляются поправки $\Delta\alpha, \Delta\delta$.

Ошибки координат, получаемых из записей зависят от отношения сигнал/шум, формы и ширины диаграммы по соответствующей координате (так же, как, и ошибка потока) уменьшаются с ростом числа наблюдений в $\sqrt{N}$ раз. Например, при гауссовой аппроксимации диаграммы $A(\theta) \sim e^{-k^2\alpha^2}$ и диаграммной модуляции, при наблюдении методом прохождения ошибка по прямому восхождению в одном прохождении считается по формуле:

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_{\text{ш}}}{S} 2\pi k^2{}^{-1/4} \cdot \tau^{1/2},$$

где τ – частота съёма точек с непрерывной записи.

5.4 Абсолютные измерения потоков

Для получения потоков калибровочных источников необходимо измерить потоки ряда источников абсолютным способом. Если мы знаем эффективную площадь антенны и антенную температуру, то искомый поток можно определить по известной формуле:

$$S = \frac{2kT}{A_{\text{эфф}}}.$$

Привязки по антенной температуре можно сделать достаточно точно с помощью специальных нагрузок с фиксированной температурой (например, жидкого гелия или азота). Остается точно измерить эффективную площадь.

Существует ряд способов измерений параметров антенн кроме использования космических радиисточников. Остановимся на двух из них.

1. Использование искусственного чёрного тела (искусственной Луны). Плотность потока радиоизлучения от такого источника определится по формуле:

$$S_d = 2kT_d \cdot \epsilon_d \Omega_d / \lambda^2,$$

где ϵ_d , T_d и Ω_d соответственно коэффициент поглощения, температура и видимый телесный угол источника. Сравнивая этот поток с его же антенной температурой, мы получаем эффективную площадь. Учитывая, что искусственный источник должен находиться в дальней зоне радиотелескопа, этот метод применим только для небольших антенн, иначе источник придется выносить в космос. Этим методом можно получить потоки сильных источников, а к ним, в свою очередь, привязать потоки более слабых.

2. Для крупных телескопов¹ используется метод "перефокусировки". Суть метода

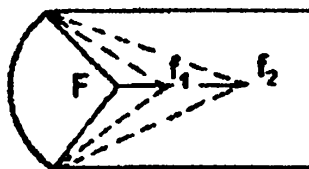


Рис. 5.12: Перефокусировка антенны.

состоит в том, что антенну перефокусируют из бесконечности на конечное расстояние, например, путем смещения фокуса из точки F в f_1 . Поместив в новом фокусе f_2 источник излучения (генератор или черное тело), мы можем также определить эффективную площадь, а поместив источник излучения в фокусе f_1 и измеряя распределение поля вблизи второго фокуса, мы напрямую можем получить и диаграмму направленности.

Для исследования диаграммы направленности антенны с раскрытием D на длине волны λ применяется также метод оптического моделирования: синфазный раскрыт антенны имитируется отверстием d в плоском экране. Экран облучается лазером с длиной волны λ_d . При равенстве отношений $\frac{\lambda}{D} = \frac{\lambda_d}{d}$ получаемая дифракционная картина соответствует форме диаграммы направленности антенны.

5.5 Измерение поляризации

5.5.1 Линейная поляризация

Любая антенна принимает энергию соответствующую только одной поляризации. Выделение поляризации происходит либо в облучателе (диполь, спираль), либо при переходе к приемнику, например, в волноводе.

На рис. 5.13 показано направление электрического вектора в стандартном волноводе. Компонента волны с ортогональной поляризацией не распространяется. Сама отражаю-



Рис. 5.13: Направление электрического вектора в стандартном волноводе.

щая поверхность антенны не меняет состояние поляризации, однако при повороте электрического вектора появляется паразитная поляризация, например, кросс-поляризация, которую при точных измерениях необходимо учитывать.

Если излучаемый поток источника равен S_0 со степенью линейной поляризации p и позиционным углом поляризации ψ , то принимаемый поток равен:

$$S = S_0 \cdot \frac{1}{2} [1 + p \cos 2(q - \psi - \chi)] ,$$

¹как оптических так и радиотелескопов

q – параллактический угол, χ – угол между плоскостью линейной поляризации антенны и вертикалом (этот угол часто равен нулю).

Измерить линейную поляризацию можно вращая облучатель вокруг горизонтальной оси. Находим максимальный и минимальный отклики и по формуле $p = (J_{max} - J_{min}) / (J_{max} + J_{min})$ находим степень поляризации. Направление максимального отклика определяет позиционный угол линейной поляризации.

При наблюдении в меридиане это будет угол поворота облучателя по отношению к вертикалу.

5.5.2 Круговая поляризация

В ряде космических объектов (таких, например, как Солнце, источники мазерного излучения ОН-18 см) есть области с круговой поляризацией. Для измерения круговой поляризации используют облучатели, принимающие круговую поляризацию.

Примеры таких облучателей – правая или левая спираль, или конические рупоры, возбуждаемые на высоких типах волн, принимающие право- или левополяризованную волну.

Для измерения степени поляризации может использоваться обычный приемник с двумя рупорами с разной поляризацией. Для неполяризованной волны мощности, регистрируемые на выходах облучателей, будут одинаковы. При наличии круговой поляризации появляется разность мощностей, которая даст процент круговой поляризации.

Реальные поляриметры используют часто один облучатель и специальные разделители поляризации или модуляцию поляризации (право-лево). На выходе синхронного детектора появляется сигнал, пропорциональный степени поляризации.

5.5.3 Параметры Стокса

В случае произвольного состояния поляризации конец вектора E электрического поля описывает эллипс (рис. 5.14). τ – угол наклона поляризационного эллипса;

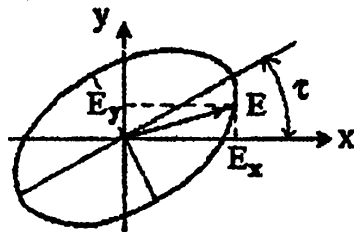


Рис. 5.14: E_x и E_y -компоненты мгновенного значения поля по выбранным осям.

q – отношение осей эллипса ($1 \leq q \leq \infty$); имеет знак “-” для левой и “+” для правой поляризации (малая/большая ось).

$$\epsilon = \operatorname{arccotg}(\pm q), \quad -45^\circ \leq \epsilon \leq 45^\circ.$$

После усреднения полей по времени переходим к потокам $S = \frac{E^2}{Z}$, Z – волновое сопротивление среды.

Общий случай любого состояния поляризации волны в произвольной системе координат x, y описывается параметрами Стокса:

$I = S_x + S_y = S$ - сумма поляризованной и неполяризованной компонент - полная принимаемая мощность.

$Q = S_x - S_y = S(\cos 2\epsilon \cos 2\tau)$ - разность мощности x и y компонент.

$U = S(\cos 2\epsilon \sin 2\tau)$ - описывает линейную поляризацию.

$V = S \sin 2\epsilon$ - описывает круговую поляризацию.

Параметры Стокса нормируют на общий поток S , чтобы их значения менялись от 0 до 1 и не зависели от потока. Тогда, например, параметры Стокса для неполяризованной волны будут выглядеть так: 1 0 0 0; для волны, полностью поляризованной по правому кругу: 1 0 0 -1; для частично линейно-поляризованная волны с процентом поляризации 1/3: 1 0 1/3 0 и т.д.

Радиообзоры неба

6.1 Методы проведения обзоров. Имена радиоисточников

Обзоры неба – основной метод получения информации о радиоизлучении большого числа источников. Радиообзоры можно разделить на обзоры внегалактических радиоисточников и обзоры Галактики. В результате обзора обнаруживаются все радиоисточники, находящиеся в определенной области неба и имеющие поток больше некоторого минимального потока S_{min} .

Кроме обнаружения дискретных радиоисточников, в результате обзора может быть построена карта распределения яркости в определенной области неба (распределенные обзоры).

6.1.1 Методика проведения обзора

Методика проведения обзора диктуется используемым инструментом. Радиотелескопы меридианного типа выставляются на определенную высоту, и в течение дня через диаграмму проходят все источники, кульминирующие на данной высоте. Затем антенна смещается на определенный угол по склонению и так далее. Запись радиоизлучения проводится непрерывно, обнаружение источников и измерение их потоков и координат выполняется специальными программами, блок-схема возможной обработки описана в главе 5. Угол между соседними сканами определяется шириной диаграммы направленности антенны по склонению, обычно не более четверти ширины диаграммы ($\frac{1}{4}\lambda/D$), иначе мы будем терять источники в промежутках между соседними склонениями.

Обзоры значительных площадей неба обычно занимают много времени, причем чем уже диаграмма направленности антенны, тем больше времени занимает обзор данной области. Например, для проведения обзора северной полусферы на Боннском 100-м радиотелескопе на длине волны 2 см при суточной скорости движения источника и интервале перестановки между соседними сканами λ/D требуется около 10 000 дней. Поэтому для обзоров на полноповоротных параболах применяют методику быстрого сканирования исследуемой области. Сканирование может проводиться по любой координате.

Для малых площадей неба проводятся *глубокие обзоры*, когда просматривается маленькая площадь, но с максимально возможной чувствительностью. Увеличение чувствительности обзора может достигаться, например, многократным просмотром данной области. Глубокие обзоры позволяют обнаруживать источники с потоками, ограниченными путаницей.

6.1.2 Имена радиоисточников

Обзоры неба и соответственно полученные каталоги радиоисточников принято называть по местности, где расположен данный радиотелескоп.

Общепринята следующая система обозначения источников: первые латинские буквы местности (или одна буква), затем четыре цифры – часы и минуты прямого восхождения, знак склонения и две цифры – градусы склонения. Примеры: PKS 1226+023 – источник из Паркского обзора (Австралия), 12 и 26 – часы и минуты прямого восхождения, + 2.3 – градусы склонения с долями. Сейчас в связи с обнаружением большого числа источников для склонения отводится 4 цифры. Прямое восхождение и склонение приводятся на эпоху 1950 г. либо 2000 г.

Другая система обозначений источников остается только для первых обзоров, например, 3C 273 – источник обнаруженный в третьем кембриджском обзоре с порядковым номером 273 (в порядке возрастания прямого восхождения) или 4C+04.33 – источник 4-го кембриджского обзора, далее знак, градусы склонения и порядковый номер в данной зоне склонения.

6.2 Полнота обзора

Дифференциальная полнота

Дифференциальная полнота определяет отношение числа источников в интервале потоков ΔS_i , обнаруженных в обзоре, к полному числу реально существующих на небе в этом интервале потоков источников.

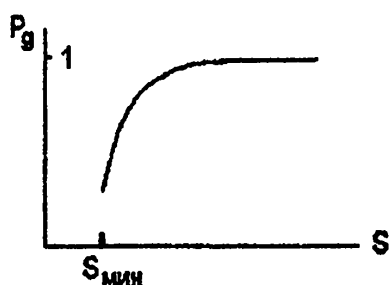


Рис. 6.1: Дифференциальная полнота обзора.
 $S_{\min}$ – предельно обнаружимый поток.

Интегральная полнота

Интегральная полнота P_i – отношение числа обнаруженных источников к полному числу реально существующих источников с потоком $S > S_i$. Дифференциальная полнота

определяется вероятностью пропуска радионисточника:

$$P_d = 1 - P_{пр} ,$$

$$P_{пр} = 0.5 - \Phi(u) .$$

$\Phi(u)$ – интеграл вероятности, аргумент u зависит от отношения сигнал/шум источника.

Чем ниже порог открытия мы задаем, тем больше источников открываем, но при этом увеличивается число ложных открытий. Вероятность ложного открытия для нормального распределения – это интеграл ошибок (вероятность того, что сигнал случайно примет форму сигнала):

$$P = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_u^{\infty} e^{-\frac{u^2}{2}} du ,$$

где аргумент u зависит только от выбранного порога обнаружения сигнала.

Полная и однородная выборка – это выборка объектов, в которой присутствуют все объекты с определенными параметрами. Например, все внегалактические источники в данной области неба с потоками больше определенного S_{min} . Выборка в зависимости от целей исследований может быть создана и по другим параметрам, но в любом случае она должна быть полной и свободной от эффектов селекции. Все статистические исследования можно проводить только с полными выборками.

6.3 Подсчёты радионисточников

Кроме открытия новых радионисточников, получения их потоков и координат, полные выборки источников, получаемые в обзорах, используются для статистических исследований, например подсчетов радионисточников.

Подсчёты радионисточников могут быть представлены в дифференциальной и интегральной форме. Интегральные подсчеты $N(S)$ – это зависимость общего числа источников, имеющих потоки больше S . Дифференциальные подсчеты $n(S) = -dN/dS$ – число источников, имеющих потоки в интервале от S до $S + \Delta S$. Дифференциальные подсчеты предпочтительнее, так как интегральные подсчеты содержат повторяющиеся источники, слабые суммируются с сильными и замазывают зависимость. На рис. 6.2

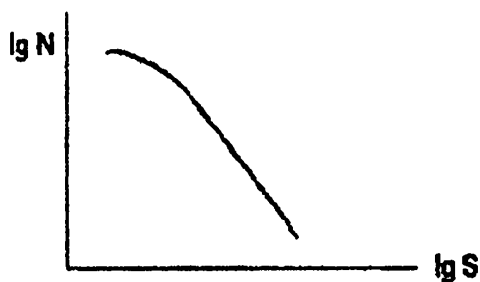


Рис. 6.2: Интегральный подсчёт источников.

показан интегральный подсчет радионисточников на частоте 5 ГГц. В области, где зависимость можно представить формой $N = N_0 S^{-x}$, дифференциальный подсчет $n(S)$

равен

$$n(S) = \frac{\partial N(S)}{\partial S} dS = N_0 \cdot x \cdot S^{-(x+1)} dS .$$

Подсчеты радиоисточников используются для проверки космологических моделей: полученные подсчеты сравниваются с подсчётами, предсказываемыми в различных моделях. Для этого нам необходимы подсчеты на всех частотах и для всех уровней потоков. Все эти зависимости получаются из различных обзоров как больших областей неба, так и глубоких обзоров малых областей.

Самая простая модель – “статическая эвклидова” модель: все источники имеют одинаковую абсолютную светимость, однородное распределение с плотностью n_0 и находятся в покое. В этом случае число источников равно:

$$N = \frac{4}{3}\pi l^3 n_0 = \frac{4}{3}\pi n_0 \left(\frac{L}{4\pi S}\right)^2 \sim S^{3/2} .$$

Для дифференциальной формы: $n(S) \sim S^{-5/2}$. Тот же результат получается, если вместо одной светимости для всех источников взять какую-либо функцию светимости. Функция светимости – число источников с данной светимостью на единицу объема и на одну звездную величину. Её можно найти из подсчетов источников $N(S, L)$ с известными красными смещениями в определенной модели Вселенной. Например, для статического эвклидова случая подсчеты радиоисточников и функция радиосветимости связаны формулой:

$$n(S, L) dS dL = \text{const} \frac{dS}{S^{5/2}} L^{3/2} \phi(L) dL ,$$

то есть, для нахождения функции светимости мы должны иметь подсчеты источников на разных красных смещениях $n(S, L)$.

Подсчеты источников обычно нормируют на статическую эвклидову модель. Все другие модели нестатичны и отличаются космологическими параметрами. Из них самая простая – модель Эйнштейна–де Ситтера, в которой кривизна пространства равна нулю. К сожалению, подсчеты радиоисточников определяются не только моделью, но и возмож-

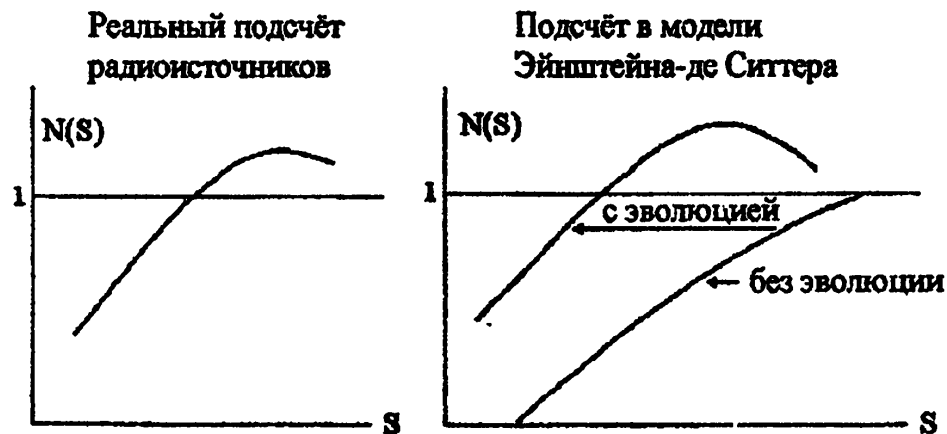


Рис. 6.3: Нормированные подсчёты источников.

ной эволюцией плотности и светимости. На рисунке 6.3 представлены нормированные подсчеты радиоисточников. а) реальный подсчет, б) подсчет в модели Эйнштейна–де

Ситтера. Чтобы объяснить реальные подсчеты, в модели вводят эволюционные коэффициенты. Пунктиром на правой кривой показан подсчет источников, который должен получиться, если в модель ввести эволюцию плотности по закону $n_0 \sim (1+z)^5$. В приведенной модели отсутствуют источники с красными смещениями $z > 5$ (обрезание на $z = 5$ вводится, чтобы объяснить уменьшение числа источников на малых потоках).

Реальные подсчеты и модельные кривые похожи, однако это все-таки подгонка модели и эволюции. Если мы найдем эволюцию светимости и плотности объектов (зависимость от красного смещения), то мы сможем выбрать модель, наиболее точно совпадающую с наблюдениями, и получить основные параметры Вселенной. В принципе, это можно сделать, если мы сумеем получить красные смещения всех объектов полной выборки радиисточников, включающей достаточно слабые объекты.

Кроме подсчетов радиисточников из полных выборок, получают *распределение спектральных индексов*. Распределение спектральных индексов на данной частоте – это число источников, имеющих спектральный индекс в интервале от α до $\alpha + \Delta\alpha$. Распределение $P(\alpha)$ отражает распределение релятивистских электронов, ответственных за радиоизлучение, а также количество источников с самопоглощением на разных частотах.

На рис. 6.4 показано типичное распределение $P(\alpha)$ на частоте 5 ГГц для источников с потоками больше 200 мЯн. Часть распределения с индексами $\alpha > -0.5$ состоит из спектров с самопоглощением. Если мы знаем распределение спектральных индексов

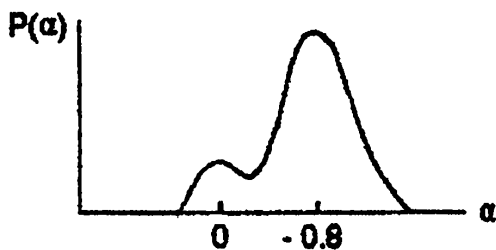


Рис. 6.4:
Типичное распределение $P(\alpha)$
на частоте 5 ГГц.

$P(\alpha)$ между частотами ν_1 и ν_2 и подсчет источников на одной из этих частот, то можно получить подсчет на другой частоте по формуле Келлермана:

$$N(S_2, \nu_2) = \int_{-\infty}^{\infty} N\left[\frac{\nu_2}{\nu_1}^{-\alpha} \cdot S(\nu_1)\right] \cdot P(\alpha) d\alpha.$$

При этом предполагается, что $P(\alpha)$ не зависит от потока. И, наоборот, если известны подсчеты на двух частотах и распределение спектральных индексов на одной из частот, то можно получить распределение индексов $P(\alpha)$ на другой по формуле:

$$P(\alpha) = \frac{N\left[\frac{\nu_2}{\nu_1}^{-\alpha} \cdot S(\nu_1)\right] \cdot P(\alpha)}{N(S_2^{(\nu_2)})}.$$

6.4 Оптические отождествления радиисточников

Радиоастрономия позволяет видеть всю Вселенную насквозь, так как поглощение в радиоволнах отсутствует, за исключением некоторых областей в Галактике. Однако она не позволяет измерять расстояния. Для получения красных смещений радиисточник отождествляется с соответствующим оптическим объектом и, далее, получается оптический спектр, по которому определяется тип объекта и красное смещение.

Несмотря на большое количество работ в этой области, на сегодняшний день только для одной полной выборки радиисточников получены практически 100% красных смещений – для источников 3-го кембриджского обзора. К сожалению, большинство источников этого обзора – близкие яркие объекты, поэтому для целей космологии выборка не самая лучшая. При проведении оптических отождествлений важно знать в какой области сравнивать источники разных каталогов, и какая вероятность случайного совпадения двух объектов.

1. *Поле ошибок* – область, в которой мы ищем совпадение двух объектов. Как оптические так и радиокоординаты известны с определенной ошибкой σ , поэтому при отождествлении источников разных каталогов важно понимать, в какой области относительно приводимых координат искать отождествление.

При гауссовом распределении ошибок координат из 100 источников 63 находятся внутри интервала $\pm\sigma$, а 95 – внутри $\pm 2\sigma$. При отождествлении источников радио- и оптического каталогов суммарная ошибка равна $\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_0^2}$.

Если мы нашли положение радиисточника на оптической карте, то в суммарную ошибку вместо σ_0 войдет ошибка определения положения радиисточника на оптической карте. Итак, если мы ищем совпадения двух объектов в области $r < 2\sigma$, следует иметь в виду, что в 5% случаев источника в этой области нет. Вероятность реального нахождения источника в поле ошибок падает от центра к краю по закону Гаусса.

2. *Вероятность случайного совпадения объектов.* Вероятность случайного совпадения объектов в разных каталогах (радио-радио или оптика-радио) зависит от размеров принятого поля ошибок и от плотности объектов M на карте или в каталоге. Предположим, что мы нашли положение радиисточника на оптической карте со некоторой средней плотностью объектов. Обозначим среднюю плотность объектов на площадке равной полю ошибок μ (число объектов на данной площадке). Тогда вероятность случайного попадания нашего радиисточника в поле ошибок определяется распределением Пуассона: $P = \frac{\mu^r}{r!} e^{-\mu}$. Возьмем, например, Паломарские карты до 21 звёздной величины, средняя плотность которых равна 1 объекту на квадратную угловую минуту. Если поле ошибок равно 0.1 квадратной угловой минуты, то вероятность случайного попадания (то есть реально это разные объекты) одного объекта в это поле равна 0.09, двух – 0.005 и т.д. На рис. 6.4 приведён график вероятности случайного совпадения объектов. При недостаточно точных измерениях координатах радиотелескопом или при

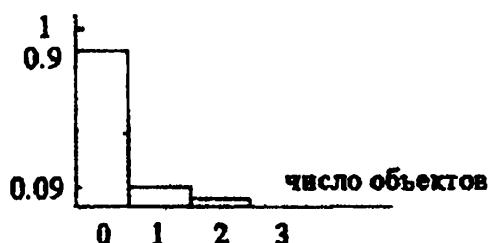


Рис. 6.5: Вероятность случайного совпадения объектов.

больших плотностях каталогов возможно попадание в поле ошибок нескольких объектов. Для успешного отождествления приходится привлекать всю имеющуюся информацию по объектам: наличие или отсутствие переменности потоков и звездных величин, спектры радиоисточников, цвета оптических объектов и т.д.

6.5 Наиболее известные и полные обзоры неба

За всю историю радиоастрономии обзоров было выполнено очень много. Приводим список некоторых из них.

ЧАСТОТА	МЕСТО, ИМЯ	ОБЛАСТЬ НЕБА	МИНИМАЛЬНЫЙ ПОТОК	ЧИСЛО ОБЪЕКТОВ
25 МГц	ИРЭ, Украина	$-13^\circ < \delta < 20^\circ$ $52^\circ < \delta < 60^\circ$	20 Ян	
178 МГц	Англия, Кембридж, 3С	0.5	9 Ян	328
178 МГц	Англия, параб. цилиндр. 4С		2 Ян	4843
365 МГц	США, Техас 4 эл. интерферометр. TR	$-35^\circ < \delta < 71^\circ$	0.25	67551
408 МГц	Австралия 64м параболоид. PKS	$\delta < 27^\circ$	0.5-4 Ян	2133
1415 МГц	США, Огайо ОА - OZ	$-36^\circ < \delta < 63^\circ$	0.18 Ян	17110
1400 МГц	США, GB	$5^\circ < \delta < 82^\circ$	0.10	30239
2700 МГц	Австралия. PKS	$25^\circ > \delta > 75^\circ$	0.25 - 0.45	
3900 МГц	Россия, ГАИШ РАТАН-600, Z	$0^\circ < \delta < 20^\circ$	0.05 Ян	$\approx 12\,000$
4850 МГц	США, НРАО, 92м параболоид, MG	$0^\circ < \delta < 75^\circ$ $0^\circ > \delta > -87.5^\circ$	0.025 Ян	54579
1400 МГц	США, VLA	Новый обзор с чувствительностью до 2.5 мЯн. Ожидается около 2 миллионов объектов		

Глубокие обзоры малых площадок с потоками до микроянских проводились почти на всех частотах. Предел глубоких обзоров обычно определяет путаница.

α – прямое восхождение;

δ – склонение;

z – зенитное расстояние;

$h = 90^\circ - z$ – высота;

A – азимут;

φ – широта места;

t – часовой угол;

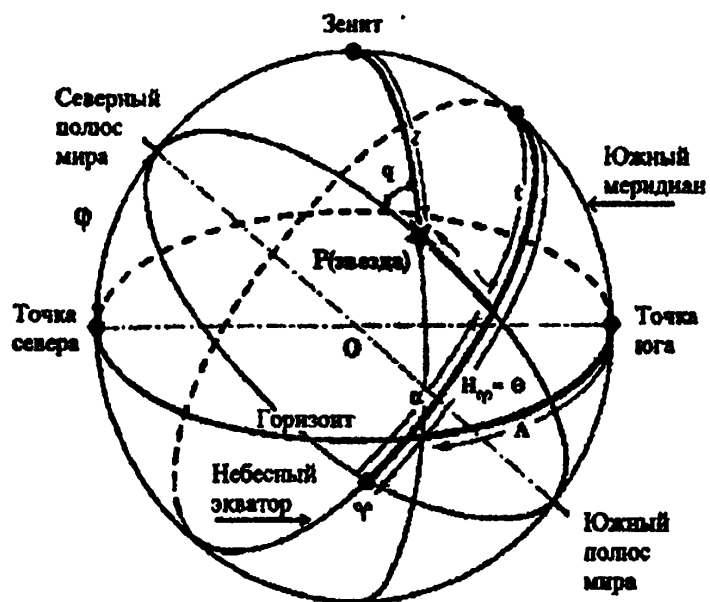


Рис. 6.6: Экваториальные и горизонтальные координаты.

q – параллактический угол;

$S = \alpha + t$ – звёздное время;

$$\sin q = \frac{\sin A \cos \varphi}{\cos \delta};$$

$$\sin h = \sin \varphi \cdot \sin \delta \cos \varphi \cos \delta \cos t;$$

$$\cos h \cdot \sin A = \cos \delta \sin t;$$

$$\cos h \cdot \cos A = -\cos \varphi \cdot \sin \delta + \sin \varphi \cos \delta \cos t.$$

Список литературы

- [1] Кисляков А.Г. и др. Введение в радиоастрономию. В 2-х т. Нижний Новгород: Изд. Нижегородского университета, 1996.
- [2] Краус Дж.Д. Радиоастрономия. М.: Сов. радио, 1973, 456 с.
- [3] Галактическая и внегалактическая радиоастрономия. Под ред. Г.Л. Верскера и К.И. Келлерманна. М.: Мир, 1976, 620 с.
- [4] Куликовский П.Г. Справочник любителя астрономии. М.: Наука, 1971, 632 с.
- [5] Христиансен У., Хегбом И. Радиотелескопы. М.: Мир, 1972, 237 с.
- [6] Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. Радиометры и радиотелескопы. М.: Наука, 1973, 415 с.
- [7] Томпсон Р., Моран Дж., Свенсон Дж. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии. М.: Мир, 1989, 567 с.
- [8] Цейтлин Н.М. Антенная техника и радиоастрономия. М.: Сов. радио, 1976, 350 с.
- [9] Худсон Д. Статистика для физиков: Лекции по теории вероятностей и элементарной статистике. М.: Мир, 1970, 296 с.
- [10] Харкевич А.А. Спектры и анализ. М.: Физматгиз, 1962, 236 с.
- [11] Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Определения, теоремы, формулы. М.: Наука, 1977, 831 с.

**Конспект лекций
по практической радиоастрономии**

Налоговая льгота – общероссийский классификатор
продукции ОК-005-93, том 2; 953000 – книги, брошюры.

Компьютерный набор и редактирование *О.В. Александровой*.

Подписано в печать 5.08.99 г. Бумага офсетная. Формат 60х84/16. Усл
п.л. 2.5. Гарнитура «Таймс». Заказ 013. Тираж 200 экз.

Издательство и типография «Компьютерный
информационно-издательский центр В. Лебедева»
357147 Нижний Архыз, Зеленчукского р-на,
Карачаево-Черкесской Республики
Тел. (87878) 46-244. CYGNUS@SAO.RU
ЛР № 066762 от 14.09.96 г.