

НОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

621.396.95

**РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТР С РАЗРЕШЕНИЕМ В 0,001
УГЛОВОЙ СЕКУНДЫ *)*****М. Коули, Д. Джонси, К. Келлерман, Б. Кларк***

Угловое разрешение крупных оптических телескопов ограничено турбулентностью атмосферы и составляет примерно $1''$ (угловую секунду). При таком разрешении звезды выглядят подобно точкам и их структуру не удастся исследовать. Это ограничение было частично преодолено Майкельсоном, который построил первый звездный интерферометр. В радиодиапазоне разрешение ограничено рядом конструктивных трудностей и примерно равно $1'$ (угловой минуте), т. е. соответствует разрешению невооруженного человеческого глаза. Для многих задач этого недостаточно. Поэтому радиоастрономами был также создан интерферометр с высоким разрешением. Это направление быстро развивалось, и в последние несколько лет в диапазоне радиоволн достигнуто разрешение, соответствующее наилучшему разрешению в оптике, несмотря на то, что длина радиоволн в $\sim 10^5$ раз больше, чем в оптике.

Простейший интерферометр состоит из двух телескопов, разнесенных на расстояние d . Сигналы, принимаемые ими от источника космического радиоизлучения на волне λ , передаются по кабелям в одно место и перемножаются. Если они когерентны, то произведение имеет регулярно повторяющиеся максимумы и минимумы (лепестки) по мере вращения Земли, так как вращение меняет разность хода электрических путей, а следовательно, и относительную фазу перемножаемых сигналов. Это может быть представлено также, как биение двух частот, принятых от одного источника двумя элементами интерферометра, имеющих небольшое доплеровское смещение между ними. Если сигналы некогерентны, то лепестков нет, если частично когерентны, то относительная амплитуда лепестков находится между 1 и 0. Степень когерентности или относительная амплитуда лепестков γ зависит от разнесения телескопов и углового размера источника θ . Если источник точечный ($\theta \ll \lambda/d$), то γ равно 1, если его наименьшая деталь велика ($\theta \gg \lambda/d$), то γ равно 0. В общем случае величина γ определяет фурье-компоненту распределения яркости источника, что впервые было показано Майкельсоном¹, хотя идея измерения диаметра звезд с помощью интерферометра была высказана Физо² двадцатью годами ранее. Разрешение интерферометра в направлении, параллельном базе, порядка λ/d радиан. Увеличение разрешения может быть получено уменьшением λ и увеличением d .

*) М. Н. С o h e n, D. L. J a u n s e y, K. I. K e l l e r m a n n, B. G. C l a r k. Radio Interferometry at One-Thousandth Second of Arc, Science 162, 88 (1968). Перевод и примечания Л. И. Матвеевко.

Майкельсону и Пизу в 1920 г. удалось измерить диаметры (или же определить их верхние пределы) нескольких звезд с помощью оптического интерферометра, смонтированного на 100-дюймовом телескопе на Маунт Вилсон³. Их зеркала были разнесены на 6 м, что при $\lambda = 5750 \text{ \AA}$ обеспечивало разрешение $\lambda/d \approx 0'',02$. Опыт был очень сложным, в течение второй половины столетия его результаты не были существенно улучшены.

В простейшем радиоинтерферометре высокочастотные сигналы усиливаются, а затем передаются в общую аппаратуру для перемножения и регистрации амплитуды и фазы лепестков. Однако сложно передавать сигналы во всей полосе приема, сохраняя при этом требуемую фазовую стабильность. Практически в радиоинтерферометре используют супергетеродинный приемник, в котором частота сигналов понижается до промежуточной. Выход интерферометра определяется когерентностью сигналов от радиоисточника и когерентной функцией прибора, в частности когерентностью гетеродинов на двух элементах. Когерентность гетеродинов может быть обеспечена передачей сигналов от общего генератора на каждый из элементов, так же как и передача преобразованных сигналов промежуточной частоты по высокочастотным кабелям. Однако для баз длиной в несколько километров это сложно и дорого.

В 1950 г. Хэнбери Браун предложил новый тип интерферометра, который может работать с очень длинными базами⁴. В этой системе фаза сигналов не учитывается и только интенсивности их передаются для перемножения, так как флуктуации интенсивности содержат некоторую часть информации о когерентности сигналов. Такой прибор стал известен как интерферометр интенсивности. В этом случае высокая фазовая стабильность больше не требуется, но отношение сигнал/шум существенно хуже, чем в системе Майкельсона. Первые измерения радиоисточников Кассиопеи А и Лебедя А были проделаны в 1952 г.⁵, а испытания этой техники в оптическом диапазоне — в 1956 г.⁶. Низкое отношение сигнал/шум ограничило применение этого принципа в радиоастрономии, хотя большой звездный интерферометр интенсивности на волне $4385 \text{ \AA}$ в настоящее время работает в Австралии. Его зеркала разнесены на 188 м, что дает разрешение лучше $0'',001$ ⁷.

Наблюдения на радиоинтерферометре Майкельсона с базой 134 км были проведены Г. Пальмером и его коллегами в Манчестерском университете (Англия). Для передачи сигналов гетеродина и промежуточной частоты ими использовалась ретрансляционная линия. До 1965 г. они работали с отношением $d/\lambda = 6 \cdot 10^5$ (127 км на 21 см волне)⁸. В 1966 и 1967 гг. длина волны была снижена до 11 см ($d \approx 10^6 \lambda$) и для некоторых источников до 6 см ($d \approx 2 \cdot 10^6 \lambda$)⁹. В ходе этих наблюдений стало ясно, что имеется ряд источников, в основном квазаров и несколько галактик, с яркими ядрами, которые содержат компоненты, имеющие угловые размеры меньше десятых долей угловой секунды. В то же время было очевидно, что некоторые из них, возможно, имеют диаметр порядка $0'',001$ или меньше. Это вытекает из следующих соображений: 1) Наличие в спектре источника с малой компонентой низкочастотной отсечки, в случае реабсорбции синхротронного излучения требует диаметров порядка $0,01$ — $0,001$. 2) Некоторые источники радиоизлучения *меняют свой поток с периодом около года*. Это означает, что протяженность их не может быть существенно больше светового года. При большой удаленности этих объектов, определяемой по красному смещению, их угловой диаметр оказывается меньше $0'',001$. 3) Только источники очень малых угловых размеров *мерцают* при наблюдении их через неоднородности межпланетной плазмы.

Чтобы разрешить источники с такими малыми угловыми размерами, требуются интерферометры с существенно большими базами. Однако увеличение длины базы обычного интерферометра связано с большими техническими трудностями, в основном определяемыми линией связи между его элементами. Уже на 127-км интерферометре для связи между элементами, расположенными в Джодрелл-Бэнк и Малверне, применяется ретрансляционная линия. Возможно даже большая трудность возникнет в связи с необходимостью выравнивания разности хода принятых сигналов. Для этой цели обычно использовались высокочастотные кабели или ультразвуковые линии задержки. В связи с этим ряд радиоастрономических групп начал изучать методы создания радиоинтерферометра с независимой регистрацией сигналов на каждом из радиотелескопов в отдельности *). Первый удачный интерферометр с независимой регистрацией сигналов на магнитной пленке был создан Карром, Мэйем, Олссоном и Уоллсом¹⁰. Они использовали его в 1965 г. для изучения декаметровых всплесков Юпитера. Интенсивность этих всплесков очень высокая, поэтому удовлетворительная чувствительность была получена даже при использовании интерферометра интенсивности, и когерентные гетеродины на обоих концах базы не потребовались. Аналогичную технику использовали недавно Габбей и Робертсон¹¹ для измерений одного из наиболее сильных внегалактических источников 3С 273 с базой длиной $13 \cdot 10^6 \lambda$. Несмотря на необычайно низкий уровень шумов аппаратуры из-за присущей этой системе низкой чувствительности, удалось установить только верхний предел интерференционных лепестков.

Браун, Карр и Блок¹² для исследования всплесков Юпитера создали интерферометр Майкельсона с независимой регистрацией сигналов в узкой полосе. В качестве сигналов гетеродинов они использовали стандартные частоты, передаваемые по радио Национальным бюро стандартов (США). Однако для измерения более слабых внегалактических источников требуется большая стабильность гетеродина и большая полоса. Для этой цели были разработаны две широкополосные системы, одна в США и другая в Канаде^{13, 14}. Обе используют на каждом радиотелескопе в качестве собственного хранителя времени и стандарта частоты независимые высокостабильные генераторы, на рубидии. В этих генераторах используется сверхтонкий переход $\text{Rb } ^{87}$ на частоте $6,83468517 \text{ ГГц}$ для стабилизации 5-МГц кварцевого генератора. Это достигается пропусканием света через рубидиевую ячейку, расположенную в высокочастотном резонаторе. Резонатор возбуждается на частоте перехода рубидия сигналом, получаемым от 5-МГц генератора. Свет рубидиевой лампы действует как оптическая накачка, переводящая атомы паров рубидия в ячейке в верхнее энергетическое состояние. Когда радиочастотный сигнал точно соответствует частоте сверхтонкого перехода, ряд атомов высвечивается стимулированным излучением. Эти атомы поглощают свет рубидиевой лампы, вызывая небольшое уменьшение интенсивности света, падающего на фотоэлектрический детектор, расположенный с другой стороны ячейки. Если частота немного уходит от резонансной, меняется ток фотоэлемента и вырабатывается сигнал для подстройки частоты генератора.

В том случае, когда независимо работающие системы используются в интерферометре, на стабильность частоты накладываются два требования: 1) относительная фаза двух генераторов должна оставаться стабильной в пределах радиана за время интегрирования, большие фазовые изменения будут вызывать потерю корреляции; 2) для корреляции двух записей

*) В СССР предложен проект интерферометра Майкельсона с независимой регистрацией сигналов (см. Л. И. М а т в е е н к о, Н. С. К а р д а ш о в, Г. Б. Ш о л о н и ц к и й, Изв. вузов (Радиофизика) 8 (4), 651 (1965)).

относительное время на двух станциях должно быть известно с точностью до доли взаимной полосы пропускания, чтобы совместить две записи. Рубидиевый частотный стандарт, используемый в системе США (R-20)¹⁵ имеет стабильность около $1 \cdot 10^{-11}$, поэтому фаза сигнала на частоте 1400 Мгц может измениться за одну минуту на 2π . Однако линейный дрейф фазы не существен, так как он эквивалентен определенному смещению по частоте и лишь смещает частоту интерференционных лепестков. Практически на частоте выше 5 Ггц возможно время интегрирования порядка нескольких минут^{16, 17}. Необходимо отметить, что требуемая стабильность не зависит от длины базы.

Что касается второго требования, то точность времени контролируется стандартом частоты и при указанной стабильности сохраняется в пределах 1 мксек за сутки. Наиболее простой способ обеспечить синхронизацию часов — это сверить их в одном месте, а затем отвезти на радиотелескопы. Однако их трудно транспортировать обычным транспортом в рабочем состоянии. Синхронизация часов может быть проведена сравнением их с цезиевыми часами, которые предназначены специально для этой цели¹⁸. В большинстве случаев это означает, что часы перевозятся на несколько сотен километров. Проще, но менее точно, использовать сигналы широко распространенной навигационной системы «Лоран-С», которая ведет передачу на частоте 100 кгц. Эта система состоит из отдельных печенок, каждая из которых содержит первичную станцию и несколько синхронизованных с ней вторичных. Сигналы от каждой из этих станций могут быть легко приняты на расстоянии 2000 км или более при благоприятных условиях. Из-за неопределенности времени распространения сигнала между передатчиком и приемником, а также низким отношением сигнал/шум трудно синхронизовать часы с точностью лучше, чем несколько микросекунд.

Как в американской, так и канадской системах интерферометров со сверхдлинной базой (СДБ) сигналы промежуточной частоты регистрируются на магнитных лентах, которые затем переводятся и обрабатываются для получения корреляции. В канадской системе сигналы регистрируются в аналоговой форме на модифицированном видеоманитофоне, предназначенном для телевидения. Одновременно на магнитную ленту вводятся сигналы времени от атомных часов, которые используются для синхронизации лент при считывании сигналов. В системе США сигналы регистрируются в цифровом виде. Сигнал промежуточной частоты ограничивается по амплитуде таким образом, что остается только знак напряжения, а затем отдельные импульсы, *биты*, регистрируются на магнитную ленту. В этом случае уменьшается отношение сигнал/шум в $\pi/2$ раз, но обеспечивается высокая эффективность хранения информации¹⁹. Частота повторения импульсов определяется атомными часами, поэтому каждый из них соответствует строго определенному отрезку времени. Далее на цифровой машине определяется корреляция битов, зарегистрированных на двух лентах, и не требуется синхронизации протяжки лент, а лишь только задается начальный момент для первых битов. Это время определяется одним из методов, рассмотренных ранее. Хотя время должно совпадать с точностью до доли взаимной полосы (около 1 мксек при полосе 350 кгц), первоначальная временная ошибка может быть во много раз больше, так как при обработке могут быть введены ряд временных задержек и машина определит точную величину. Как только точное время найдено, ленты могут обрабатываться быстрее, так как относительная ошибка за несколько часов — меньше 1 мксек.

Временные ошибки возникают не только из-за неточности хода часов на двух станциях, но также из-за ошибки в пространственной привязке

телескопов и астрономического положения источника. Эти ошибки могут сместить частоту лепестков точно так же, как расхождение частот гетеродинов. Поэтому интерференционный сигнал исследуется в некотором диапазоне частот. К тому же некоторая нестабильность гетеродинов расширяет частотный спектр интерференционных лепестков, так что в окончательном результате амплитуда лепестков принимается как интеграл наблюдаемого выхода вблизи ожидаемой частоты (см. также таблицу).

В примененной системе частота повторения импульсов равна 720 кГц, что соответствует промежуточным частотам до 350 кГц. Скорость протяжки ленты равна 380 см/сек. Одной катушки ленты хватает на три минуты наблюдений. Обработка пары лент происходит в течение часа на машине IBM 360/50.

Параметры интерферометров со сверхдлинной базой

Положение телескопа и диаметр антенны (м)	Длина базы, км	λ , см	d, λ	ψ , угл. сек *)	Литература
НИС ^а (45,7) — Оттава ^б (18,3)	183	66,9	$2,7 \cdot 10^5$	0,25	14
НИС (45,7) — Пептиктон ^в (25,6)	3074	66,9	$4,6 \cdot 10^6$	0,015	22
Грин-Бэнк ^г (42,7) — Мериленд-Пойнт ^д (25,9)	226	49,2	$4,6 \cdot 10^5$	0,15	13
Грин-Бэнк (42,7) — Аресибо ^е (304,8)	2600	49,2	$4,7 \cdot 10^6$	0,015	27
Грин-Бэнк (42,7) — Хайстек ^ж (36,6)	845	18,0	$4,7 \cdot 10^6$	0,015	21, 24
Грин-Бэнк (42,7) — Хэт-Крик ^з (25,9)	3500	18,0	$1,9 \cdot 10^7$	0,0035	17, 25, 26, 31, 34
Хайстек (36,6) — Хэт-Крик (25,9)	4033	18,0	$2,2 \cdot 10^7$	0,003	31, 34
Грин-Бэнк (42,7) — Онсала ^и (25,9)	6319	18,0	$3,5 \cdot 10^7$	0,002	17, 26, 31
Хайстек (36,6) — Онсала (25,9)	5600	18,0	$3,1 \cdot 10^7$	0,002	31
Хэт-Крик (25,9) — Онсала (25,9)	7719	18,0	$4,3 \cdot 10^7$	0,0015	31
Грин-Бэнк (42,7) — Онсала (25,9)	6319	6,0	$1,1 \cdot 10^8$	0,0006	17

^а Национальный исследовательский союз, Онтарио (Алгонквинская радиообсерватория). ^б Военный исследовательский центр связи, Онтарио. ^в Объединенная радиоастрофизическая обсерватория, Пептиктон, Британская Колумбия. ^г Национальная радиоастрономическая обсерватория, Грин-Бэнк, Западная Вирджиния. ^д Мериленд-Пойнт обсерватория, Мериленд, Морская исследовательская обсерватория. ^е Ионосферная обсерватория в Аресибо. Пуэрто-Рико (Корнельский университет). ^ж Микроволновая лаборатория, Хайстек, Массачусетс (Линкольнская лаборатория). ^з Хэт-Крик. Радиообсерватория, Калифорния (Калифорнийский университет). ^и Обсерватория по исследованию космического пространства, Онсала, Швеция, (Университет технологии Чалмера).

*) Угловое разрешение для сильных источников принято равным $\lambda/3d$.

Канадская система существенно более экономична с точки зрения использования магнитной ленты и машинного времени. Она также более широкополосна, но будущие цифровые системы возможно, также будут использовать видеоманитофоны для обеспечения еще более широкой полосы. Широкая полоса имеет преимущество для наблюдений в сплошном спектре, так как отношение сигнал/шум пропорционально корню квадратному из полосы. Однако это не имеет значения для наблюдений спектральных линий, поскольку вся энергия сосредоточена в очень узкой полосе. В цифровой системе основное машинное время уходит на перемножение; в канадской системе это — аналоговая операция, что экономит машинное время. В цифровой системе выигрыш времени может быть достигнут путем применения специального цифрового коррелятора.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Первые удачные испытания обеих систем со СДБ были проведены весной 1967 г. Канадская группа работала с 45-м и 18-м радиотелескопами, расположенными в Онтарио и около Оттавы на расстоянии 183 км друг от друга¹⁴. Группа США использовала 42-м и 25-м антенны в Грин-Бэнк и Мериленд-Пойнт, разнесенные на расстояние 226 км¹³. После этих первых испытаний были проведены измерения на нескольких частотах

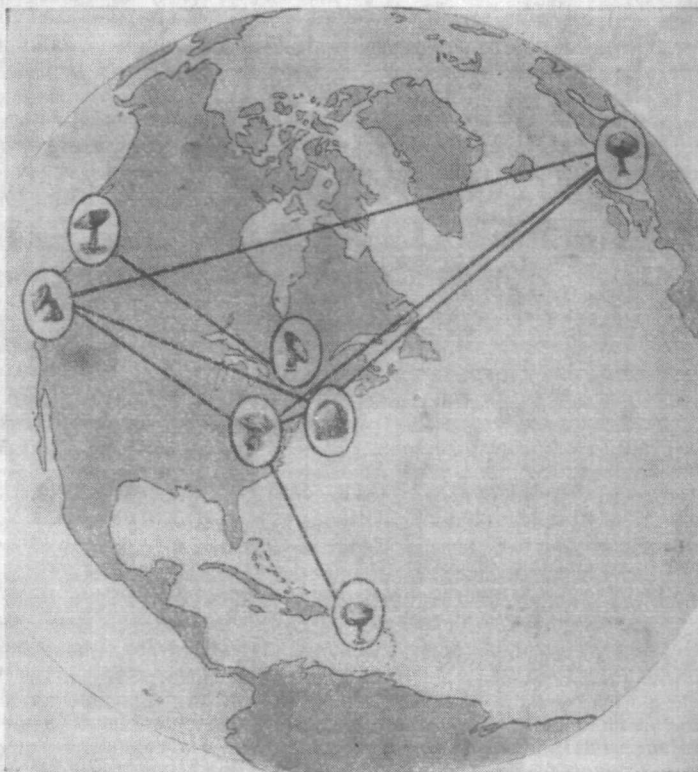


Рис. 1. Расположение баз интерферометров со сверхдлинной базой

Параметры баз приведены в таблице I. Относительно короткие базы Грин-Бэнк — Мериленд-Пойнт и Онтарио — Оттава не показаны.

с базами разной длины и ориентации. Основные из них перечислены в таблице и показаны схематически на рис. 1. Максимальное разрешение достигнуто около $0'',0006$ на волне 6 см на базе Грин-Бэнк — Онсала. Это соответствует примерно углу, под которым из Грин-Бэнк видна почтовая марка, расположенная в Швеции, и сравнимо с максимальным разрешением, достигнутым в оптике⁷.

Результаты наблюдений полностью подтвердили предположение об очень малых угловых размерах некоторых радиогалактик и квазаров. В ходе создания систем со СДБ стало известно, что некоторые области радиоизлучения в линиях ОН имеют размеры меньше $1''^{20}$, поэтому именно они были среди первых объектов исследования²¹. Оказалось, что эти области имеют компоненты меньше $0'',01$ в диаметре и разнесены одна от другой на расстояние порядка $1''$. Линии излучения каждой из этих компонент имеют очень узкую полосу, в ряде случаев меньше 1 кГц.

Один из источников (W 3) содержит малую компоненту с угловым диаметром около $0'',0045$ ²², соответствующую линейному размеру ~ 8 а. е., т. е. меньше размера орбиты Юпитера. Яркостная температура этой компоненты $\sim 10^{13}$ °К. Излучение от этих малых ярких областей ОН имеет большую линейную или круговую поляризацию и, возможно, переменную²³.

Наиболее полный обзор внегалактических источников сделан с базой Грин-Бэнк — Хайстек²⁴ в излучении на 18 см с разрешением $0'',015$. Лепестки наблюдались от 26 источников, из них — 18 квазары, 2 — сейфертовские галактики (ЗС 84, ЗС 120), один радиоисточник (СТА -21) находится на темном оптическом поле и пять источников неотожествлены.

Шесть радиоисточников имеют лепестки на базе Грин-Бэнк — Хэт-Крик на волне 18 см^{17, 25, 26} ($\psi \sim 0'',0035$). Эти источники все еще обнаруживают лепестки на базе Грин-Бэнк — Онсала¹⁷ ($\psi \sim 0'',002$). На 6 см ($\psi \sim 0'',0006$) семь источников (ЗС 84, ЗС 120, ЗС 273, ЗС 279, ЗС 345, ЗС 454,3 и ЗС 39,25) не разрешены на той же базе. Для определения спектра этих малых компонент были проведены измерения на волне 49,2 см с базой Грин-Бэнк — Аресибо ($\psi \sim 0'',015$)²⁷.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

В большинстве случаев наблюдаемая глубина модуляции меньше единицы. Это свидетельствует о том, что источник имеет простую структуру с угловым размером $\theta \sim \lambda/d$ либо сложную структуру с γ , частично относящимся к одной или более неразрешенных компонент с $\theta < \lambda/d$. Видимость как функция длины базы может быть определена путем наблюдений на телескопах, находящихся на разных расстояниях либо путем наблюдений в разное время суток (т. е. за счет изменения проекции базы). В обоих случаях базы могут пересекать источник в разных направлениях и распределение радиояркости таким образом будет получено под разными углами.

Кривая видимости квазара ЗС 286 (рис. 2)

соответствует источнику с простой структурой. Если он имеет симметричное гауссово распределение яркости, его ширина на половинном уровне равна $0'',029$. Треугольником показаны результаты измерений Бротена и др.¹⁶, полученные на волне 69,6 см. Отсюда следует, что в целом структура источника не зависит от длины волны.

Наиболее интересным объектом является хорошо известный квазар ЗС 273, функция видимости которого показана на рис. 3 в линии 18 см. Из наблюдений покрытий его Луной в нем были выделены две основные компоненты²⁸. Компонента А отождествлена с оптическим выбросом и имеет протяженность около $20''$. Она полностью разрешена на интерферометре (на рис. 3 не показана). Малая компонента связана с ярким квазизвездным объектом. Она имеет сложную структуру и состоит не менее

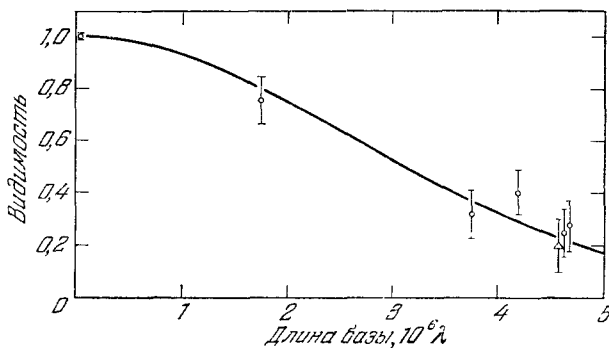


Рис. 2. Функция видимости квазизвездного источника ЗС 286.

○ — результаты измерений на 18 см²⁴. △ — результаты измерений на 67 см¹⁶. Кривая соответствует функции видимости источника с гауссовым распределением яркости с шириной на половинном уровне, равной $0'',029$.

чем из трех основных подкомпонент. Как видно из кривой видимости, компонента B разрешена между 0 и $7 \cdot 10^6 \lambda$ и имеет диаметр $\sim 0'',02$. Вклад радиоизлучения составляет на 18 см примерно 50%. Оставшаяся часть не разрешена на базах до $35 \cdot 10^6 \lambda$, т. е. имеет размер меньше $0'',003$.

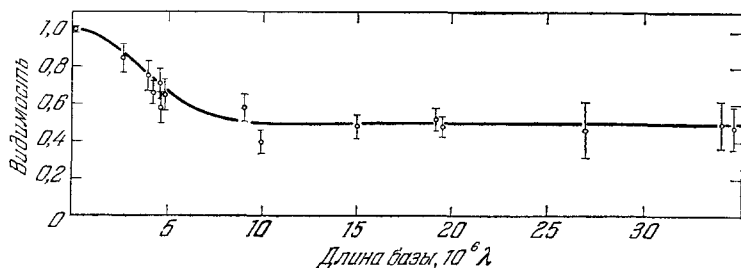


Рис. 3. Функция видимости квазизвездного источника 3C 273. Кривая соответствует функции видимости источника, половина потока которого определяется гало, размерами $0'',023$, а оставшаяся часть неразрешенным ядром.

Спектр этого небольшого источника (рис. 4) показывает, что он состоит из нескольких подкомпонент, каждая из которых становится оптически толстой на разных волнах. Одна из них частично разрешена на волне 6 см с базой Грин-Бэнк — Онсала ($103 \cdot 10^6 \lambda$) и имеет размер меньше

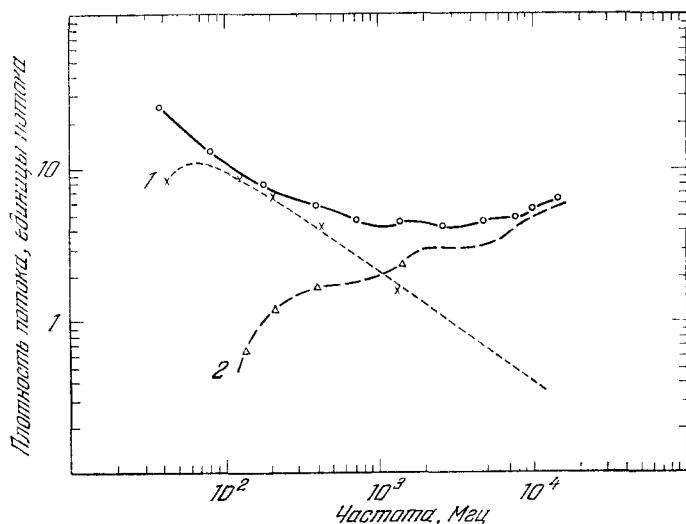


Рис. 4. Радиочастотный спектр квазизвездного источника 3C 273.

$0'',0006$. Предполагают, что излучение этих компактных источников обусловлено синхротронным механизмом, т. е. определяется релятивистскими электронами, движущимися в магнитных полях. На низких частотах такие источники становятся оптически толстыми, плотность потока их излучения достигает максимального значения, когда оптическая толщина становится равной единице. Частота, на которой оптическая толщина равна единице (частота отсечки), угловой размер источника, напряженность магнитного поля и максимальная плотность потока однозначно связаны между собой. Источники, угловой диаметр которых больше $0'',1$, имеют очень низкую частоту отсечки. Измерения угловых размеров внегалакти-

ческих источников в пределах $0'',001-0'',01$ позволили рассчитать величину магнитного поля. В тех случаях, когда это было возможно, оно оказалось равным $\sim 10^{-4}$ гс.

Открытие быстрых временных вариаций у некоторых из этих источников было большой неожиданностью, так как наблюдаемые изменения часто происходят всего за несколько месяцев. Естественно предположить, что линейный размер источника не превышает расстояния, проходимого светом в течение этого времени. Отсюда может быть получена оценка максимального размера источника и максимальной напряженности магнитного поля. Минимальная энергия релятивистских частиц в этом случае оказывается очень большой — больше 10^{58} эрг, что более чем в 10^8 раз превосходит энергию, выделяемую в момент взрыва наиболее мощных сверхновых²⁹. Трудно представить себе всплески такой величины и частоты в столь небольшом объеме пространства. Положение еще более усложняется, если рассмотреть обратное комптоновское рассеяние, так как интенсивность излучения от такого небольшого источника должна превышать 1 эрг/см³. Некоторые из трудностей могут быть преодолены, если предположить, что релятивистские электроны разлетаются с релятивистскими скоростями. В этом случае размер и возраст источника могут быть существенно больше, чем это следует из простого соображения, связанного со скоростью распространения света³⁰, а требуемая энергия будет существенно ниже. Измерения на системе со СДБ, однако, непосредственно подтверждают предположение, что размеры некоторых внегалактических источников необычайно малы. Например, размер одной из компонент квазара 3С 273, которая излучает более 10^{45} эрг/сек, заметно меньше светового года (с. г.). Переменный источник в сейфертовской галактике NGC 1275 имеет размер около одного с. г. Непрерывные измерения размеров источника в течение периода его высокой активности позволяют определить динамику развития и закон изменения магнитного поля и установить граничные условия для дальнейших теоретических исследований. Такие наблюдения позволяют также установить, возникает ли очередной всплеск в одном и том же месте, или же они пространственно разнесены. Эти измерения находятся в пределах современных возможностей, и для их проведения требуется только слегка увеличить разрешение.

ДАЛЬНЕЙШИЕ ПРИМЕНЕНИЯ

При существующих длинах баз многие источники оказались неразрешенными, потому важно увеличить разрешение. Существующая техника приблизилась к пределу. Расстояние Грин-Бэнк — Онсала уже более одного радиуса Земли. Существенно увеличить это расстояние нельзя, так как при этом уменьшается угол обзора инструмента и наблюдения происходят при низких углах места. Рабочая длина волны может быть уменьшена в 2—3 раза. Дальнейшее укорочение волны ограничено несовершенством антенн и фазовой нестабильностью атмосферы. В следующем году мы предполагаем таким образом повысить разрешение в 3—4 раза. Длина базы в этом случае будет около $300 \cdot 10^6$ λ, а предел разрешения $\sim 10^{-4}$ угловой секунды*). Это соответствует разрешению в 1 с. г. на расстоянии 500 Мпс, которое будет достаточным для изучения деталей некоторых переменных источников. Еще более высокое разрешение может быть получено путем выноса антенны за пределы Земли, в частности, на Луну. Система со СДБ имеет большие потенциальные возможности. Она может быть использована для одновременной работы на многих радио-

*) Проведены наблюдения на волне 6 см на базе Австралия — США. Подготавливается эксперимент на волне 3 см на базе СССР — США.

телескопах. Если работают n телескопов, они образуют $n(n-1)/2$ независимых баз. Таким образом, эффективность получаемой информации быстро растет с числом станций. Наблюдения на нескольких радиотелескопах уже начаты. В январе 1968 г. четыре радиотелескопа, расположенные в Западной Вирджинии, Массачусетсе, Калифорнии и Швеции, были использованы для одновременных наблюдений источника W 3 в линии ОН. Лепестки были получены на всех шести независимых базах³¹. Мы рассматриваем вопрос о проведении одновременных наблюдений на радиотелескопах, расположенных по всему миру, для составления карт компактных радиоисточников с разрешением лучше $0'',001$. Стоимость таких наблюдений относительно мала, так как используются существующие телескопы и необходимы только стабильный генератор и высокоскоростной магнитофон на каждой из антенн.

Следующим шагом улучшения системы со СДБ является применение более стабильных генераторов (типа водородного) и повышение чувствительности путем применения малошумящей широкополосной аппаратуры. Повышение стабильности генераторов позволит решить новый круг вопросов. Это относится к точному определению координат и времени. Некоторые из этих проблем рассмотрены Голдом³⁴ и Мак-Дональдом³³. Простейшее применение, которое мы уже осуществили, — это относительная привязка часов с точностью до взаимной полосы. В настоящее время точность достигает доли *миксек* и сравнима с точностью, получаемой другими методами, но будет еще выше, как только будут применены более широкополосные системы. Однако из отдельных измерений нельзя сказать, чем вызвана ошибка в часах — ошибкой определения положения телескопов, координат радиоисточников или даже возмущением ионосферы над одной из антенн. Когда точность повысится, возникают другие трудности: учет суточного изменения атмосферы, рефракции, релятивистского изменения времени, вызванного различной скоростью вращения Земли на разных широтах, и земных приливов. В конечном счете стабильность базы, угловое положение источника и земное вращение могут быть учтены. Эти три параметра, конечно, имеют очень большой астрономический и геофизический интерес. Ясно, что они связаны сложным образом, и их определение требует кропотливых наблюдений ряда радиоисточников. Вероятно, усовершенствованная система со СДБ позволит: 1) синхронизовать часы с точностью до 10^{-8} сек; 2) измерить длину суток с точностью до 10^{-4} сек; 3) определить длину базы с точностью лучше 10 см; 4) определять угловое положение с точностью до 10^{-3} угловой секунды. Точное измерение протяженности суток и их изменений представляет большой интерес в геофизике, так как имеются короткопериодические изменения во времени и направлении оси, которые могут быть изучены этим методом.

Измерение расстояний с точностью лучше 10 см и их изменений через океаны и континенты позволит привязать различные геодезические системы. Приливы в земной коре и континентальные дрейфы могут быть измерены непосредственно.

Высокая точность измерений положения радиоисточников очень важна в астрономии. Природа и механизмы действия источника будут лучше поняты при точном знании соотношения между оптическими и радиодетальными, а также между отдельными радиокомпонентами. Измерение изменения относительного положения переменных компонент позволит исследовать динамику многокомпонентного источника. В частности, измерение движения компактных областей ОН открывает новое широкое поле исследований. Движения области в целом и ее отдельных компонент могут быть детально изучены. Галактические движения ~ 100 км/сек могут быть обнаружены за один-два года.

Измерение координат с точностью $0'',001$ позволит измерить искривление распространения радиоволн под действием гравитационного поля Солнца. Эта классическая проверка общей теории относительности возможна в оптике только во время полных солнечных затмений. Техника со СДБ более чем на два порядка позволит повысить точность измерений и более детально проверить общую теорию относительности.

ВЫВОДЫ

Атомные генераторы имеют достаточно высокую стабильность, что позволяет использовать независимые радиотелескопы в когерентном интерферометре. Сигналы синхронно регистрируются на магнитной пленке и в дальнейшем обрабатываются. Время должно быть известно с точностью до доли взаимной полосы, а фаза оставаться стабильной в пределах радиана в течение нескольких минут. Эти требования не зависят от длины базы.

Радиоинтерферометры со СДБ работают на волнах до 6 см и базах до 7719 км. Максимальное разрешение, достигнутое в настоящее время, равно $6 \cdot 10^{-4}$ угловой секунды.

С помощью систем со СДБ изучено несколько десятков внегалактических источников. Большинство из них имеют несколько компонент разного диаметра. Результаты наблюдений согласуются с представлением о синхротронном излучении этих источников и позволяют определить напряженность магнитного поля, которая оказывается равной $\sim 10^{-4}$ гс. Переменные радиоисточники имеют очень малый диаметр, меньше предела разрешения максимальной базы. Некоторые области излучения ОН в Галактике имеют также необычайно малые размеры.

В будущем на системах со СДБ предполагается проведение широкой программы геофизических и астрономических исследований, которая включает очень точную синхронизацию часов, точное измерение относительного вращения Земли и ее оси, изучение их вариаций, точное измерение расстояний, изучение приливов в земной коре и дрейфов континентов, измерение с высокой точностью координат источников, свойств движения и проверка общей теории относительности.

Калифорнийский университет,
Сан-Диего
Астрономический центр Корнелльского университета,
Итака
Национальная радиоастрономическая обсерватория,
Грин-Бэнк, США

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. A. A. Michelson, Phil. Mag. 30, 1 (1890).
2. H. Fizeau, Compt. rend. 66, 934 (1868).
3. A. A. Michelson, F. Pease, Astrophys. J. 53, 249 (1921).
4. R. Hanbury Brown, R. Q. Twiss, Phil. Mag. 45, 663 (1954).
5. R. Hanbury Brown, R. C. Jennison, M. K. Das Gupta, Nature 170, 1061 (1952).
6. R. Hanbury Brown, R. Q. Twiss, Nature 178, 1046 (1956).
7. R. Hanbury Brown, J. Davis, L. R. Allen, J. M. Rome, Monthly Notices Roy. Astron. Soc. 137 (1967).
8. B. Anderson, W. Donaldson, H. P. Palmer, B. Rowson, Nature 205, 375 (1965); H. P. Palmer, B. Rowson, B. Anderson, W. Donaldson, G. K. Miley, H. Gent, R. L. Adgie, O. B. Slee, J. H. Crowther, ibid. 213, 789 (1967).
9. R. L. Adgie, H. Gent, O. B. Slee, A. D. Frost, H. P. Palmer, B. Rowson, ibid. 208, 275 (1965).
10. T. D. Carr, J. May, C. W. Olsson, G. F. Walls, IEEE (Inst. Elec. Electron. Eng.), Northern Electron. Res. Eng. Meeting Rec. 7, 222 (1965).

11. J. S. Gubbay, D. S. Robertson, *Nature* **215**, 1157 (1967).
 12. G. W. Brown, T. D. Carr, W. F. Block, *Astrophys. Lett.* **1**, 89 (1968).
 13. C. Bare, B. G. Clark, K. I. Kellermann, M. H. Cohen, D. L. Jauncey, *Science* **157**, 189 (1967).
 14. N. W. Broten, T. H. Legg, J. L. Locke, C. W. McLeish, R. S. Richards, R. M. Chisholm, H. P. Gush, J. L. Yen, J. A. Galt, *ibid.* **156**, 1592 (1967).
 15. Manufactured by Varian Associates, Palo Alto, Calif.
 16. N. W. Broten, R. W. Clarke, T. H. Legg, J. L. Locke, C. W. McLeish, R. S. Richards, J. L. Yen, R. M. Chisholm, J. A. Galt, *Nature* **216**, 44 (1967).
 17. K. I. Kellerman, B. G. Clark, C. Bare, O. Rydbeck, J. Ellender, B. Hansson, E. Kollberg, B. Hoglund, M. H. Cohen, D. L. Jauncey, paper presented at the 125th meeting of the American Astronomical Society, Charlottesville, Va. (April 1968).
 18. L. N. Bodily, R. C. Hyatt, Hewlett-Packard J., No. 12 (Dec. 1967).
 19. S. Weinreb, *Proc. IEEE (Inst. Elec. Electron Eng.)* **49**, 1099 (1961).
 20. J. M. Moran, A. H. Barrett, A. E. E. Rogers, B. F. Burke, B. Zuckermann, H. Penfield, M. L. Meeks, *Astrophys. J. Lett.* **148**, L69 (1967); R. D. Davies, B. Rowson, R. S. Booth, A. J. Cooper, H. Gent, R. L. Adgie, J. H. Crowther, *Nature* **213**, 1109 (1967); D. D. Cudaback, R. B. Read, G. W. Rougoor, *Phys. Rev. Lett.* **17**, 452 (1967).
 21. J. M. Moran, P. P. Crowther, B. F. Burke, A. H. Barrett, A. E. E. Rogers, J. A. Ball, J. C. Carter, C. C. Bare, *Science* **157**, 676 (1967).
 22. N. W. Broten, T. H. Legg, J. L. Locke, C. W. McLeish, R. S. Richards, R. M. Chisholm, H. P. Gush, J. L. Yen, J. A. Galt, *Nature* **216**, 44 (1967).
 23. A. H. Barrett, *Science* **157**, 881 (1967).
 24. B. Clark, K. Kellermann, C. Bare, M. Cohen, D. Jauncey, *Astrophys. J. Lett.* **153**, 167 (1968).
 25. B. G. Clark, M. H. Cohen, D. Jauncey, K. Kellermann, paper presented at the 125th meeting of the American Astronomical Society, Philadelphia (December 1967).
 26. B. G. Clark, M. H. Cohen, D. L. Jauncey, *Astrophys. J. Lett.* **149**, L151 (1967).
 27. D. L. Jauncey, K. I. Kellermann, B. G. Clark, M. H. Cohen (в печати).
 28. C. Hazard, B. Mackey, J. Shimmings, *Nature* **197**, 1037 (1963).
 29. K. I. Kellermann, I. I. K. Pauliny-Toth, *ibid.* **213**, 977 (1967).
 30. M. Rees, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **137**, 429 (1967).
 31. J. M. Moran, B. F. Burke, A. H. Barrett, O. Rydbeck, B. Hansson, A. E. Rogers, J. A. Ball, D. D. Cudaback, paper presented at the 126th meeting of the American Astronomical Society, Charlottesville, Va. (April 1968).
 32. T. Gold, *Science* **157**, 302 (1967).
 33. G. J. F. MacDonald, *ibid.*, стр. 304.
 34. J. M. Moran, B. F. Burke, A. H. Barrett, A. E. E. Rogers, J. C. Carter, J. A. Ball, D. D. Cudaback, paper presented at the 125th meeting of the American Astronomical Society, Philadelphia (December 1967).
-