

Министерство высшего и среднего специального образования
Р С Ф С Р

Горьковский ордена Трудового Красного Знамени
научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ)

П р е п р и н т № 202

ПРИКЛАДНАЯ РАДИОАСТРОНОМИЯ

Н.М. Цейтлин

Горький 1985

Н.М. Цейтлин

ПРИКЛАДНАЯ РАДИОАСТРОНОМИЯ.
Горький, Препринт № 202/НИРФИ, 1985.

УДК 523.164

Обзор достижений прикладной радиоастрономии в области эталонирования радиоизлучения дискретных источников, Луны и Солнца, исследования солнечно-земных связей, земной атмосферы и планет. Рассмотрены радиоастрономические методы в навигации, антенной технике, пассивной радиолокации и радиоастрометрии.

Прикладная радиоастрономия — область радиоастрономии, связанная непосредственно с ее практическим применением, — возникла в нашей стране сразу же после окончания Великой Отечественной войны, то есть фактически одновременно с возникновением радиоастрономии в СССР.

Первые шаги прикладной радиоастрономии связаны с именами Н.Д.Папалекси, С.Э.Хайкина, Г.С.Горелика, М.Т.Греховой, В.В.Виткевича, В.С.Троицкого и организацией радиоастрономических центров под Москвой (в районе Серпухова), под Горьким (Зименки), под Ленинградом (Пулково) и в Крыму (Симеиз) [1].

На этих первых в стране радиоастрономических обсерваториях наряду с чисто радиоастрономическими начались и прикладные исследования с использованием методов и аппаратуры радиоастрономии.

Радиоастрономия по существу раздел радиофизики. Если рассматривать радиофизику как "радио для физики и физику для радио" [2], то астрофизические результаты экспериментальной радиоастрономии — это "радио для физики", в то время как использование достигшей радиоастрономии в народном хозяйстве — прикладная радиоастрономия — это "физика для радио".

В народном хозяйстве используются как непосредственно результаты радиоастрономических исследований, так и развитые в радиоастрономии методы и аппаратура. В частности, результаты исследований Солнца и космического радиоизлучения используются в антенной технике, навигации, радиометеорологии, развитые в радиоастрономии методы

Исследования характеристик объектов по их собственному тепловому радиоизлучению нашли применение в радиометеорологии и медицине, радиоастрономическая аппаратура и методы радиосинтерферометрии нашли применение в геофизике, геодинاميке, геодезии и службе времени.

Ниже мы попытаемся кратко охарактеризовать области практического применения радиоастрономии.

ЭТАЛОНИРОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ДИСКРЕТНЫХ ИСТОЧНИКОВ, ЛУНЫ И СОЛНЦА

Возможность и целесообразность использования внеземных источников с известной интенсивностью излучения в качестве естественных проталонированных генераторов шумового сигнала для калибровки различных радиотехнических систем очевидны. Однако реализация этой возможности связана с точным измерением интенсивности излучения этих источников. Точные (с погрешностью в несколько процентов) абсолютные измерения интенсивности излучения весьма трудны. Трудности связаны с малостью принимаемого сигнала от источника, необходимостью учета распределенного космического радиоизлучения в районе источника, попадающего в главный лепесток диаграммы направленности антенны, а также космического радиоизлучения и радиоизлучения Земли и атмосферы, попадающих в боковые и задние лепестки диаграммы. Необходим также учет собственных шумов антенной и приемной систем и знание параметров антенны радиотелескопа (усиления, диаграммы направленности и др.)

Первые измерения потоков Кассиопей-А и Тельца-А на волнах 3 и 10 см были проведены в г. Горьком в 1952 году [3], однако систематические точные измерения начались лишь в начале шестидесятых годов, когда в Горьковском научно-исследовательском радиофизическом инсти-

туте (НИРФИ) был предложен прецизионный метод измерений — метод "черного" диска или "искусственной Луны" [4, 5]. Метод заключается в сравнении интенсивности принимаемого от исследуемого источника радиоизлучения с принимаемой "эталонной" интенсивностью радиоизлучения металлического диска, покрытого поглощающим материалом. Поскольку яркостная температура радиоизлучения абсолютно поглощающего (на данной длине волны), то есть "черного" материала равна его термодинамической температуре, то, зная или измеряя температуру "черного" диска, равную температуре окружающей среды, и его угловые размеры, "видимые" из точки расположения антенны радиотелескопа, мы тем самым эталонируем интенсивность излучения этого диска с погрешностью, равной его коэффициенту отражения, составляющему для хорошо поглощающих материалов доли процента. Казалось бы, с такой же погрешностью возможно измерить путем сравнения и интенсивность излучения источника (или Солнца, или Луны, в этих случаях удобно подбирать угловые размеры диска равными угловым размерам Солнца или Луны — отсюда название "искусственная Луна"). Однако при наблюдении "черного" диска возникает дифракция на его краю, в результате чего принимается радиоизлучение не только диска, но и окружающего пространства, в частности, поверхности Земли, достаточно "черной" в радиодиапазоне. На сантиметровых и дециметровых волнах яркостные температуры радиоизлучения атмосферы и космического радиоизлучения малы по сравнению с температурой диска и земли, поэтому важно исключить радиоизлучение земли, попадающее в дифракционную диаграмму системы антенна-диск. Для этого диск надо наблюдать под большими углами к горизонту (порядка $20-25^\circ$), то есть располагать на мачте или использовать рельеф местности. Расстояние от антенны до диска должно быть достаточно большим, порядка $2D^2/\lambda$ (D — диаметр антенны, λ — длина волны), так как диск располагается в дальней зоне антенны. Поэтому в экспериментах НИРФИ, проводимых на радиоастрономической станции в районе Кара-Дага, диск устанавливали на вершине горы в полукилометре от радиотелескопа, а диаметр диска равнялся 5 метрам.

Возможен и другой способ измерений на расстояниях

в 10-20 раз меньше, однако при этом приходится фокусировать антенну радиотелескопа на диск [6]. Этим методом проводятся измерения на РАС НИРФИ "Старая Пустынь", где 1-2 - метровые диски располагаются на 25-метровых вышках на расстояниях 50-100 м от антенн радиотелескопов.

Методом "черного" диска в НИРФИ были измерены с погрешностью в несколько процентов потоки радиоизлучения наиболее мощных дискретных источников Кассиопеи-А, Лебедя-А, Тельца-А и Девы-А в диапазоне волн от 3 до 150 сантиметров (см., например, [7-9]). В настоящее время составлены весьма точные каталоги спектров интенсивностей упомянутых источников. Эти каталоги общепризнаны как наиболее точные в мире и используются в качестве опорных при создании шкал потоков для более слабых источников как в нашей стране [11], так и за рубежом (см., например, [10]).

Изучение спектров излучения мощных дискретных источников позволило выявить ряд интересных особенностей. Например, потоки радиоизлучения от Кассиопеи-А и Крабовидной туманности (Тельца-А), являющихся остатками вспышек сверхновых звезд, должны с течением времени уменьшаться из-за адиабатического расширения оболочки сверхновой звезды. В результате точных измерений, проведенных в НИРФИ, удалось обнаружить частотную зависимость уменьшения потока от Кассиопеи-А [12], а также уменьшение потока радиоизлучения Крабовидной туманности [13]. В результате многолетних наблюдений в НИРФИ обнаружена странная и пока не объясненная переменность в интенсивности радиоизлучения Кассиопеи-А и Крабовидной туманности с характерным временем порядка нескольких лет [14, 15].

С помощью метода "искусственной Луны" удалось проэталонировать среднюю яркостную температуру радиоизлучения Луны в диапазоне миллиметровых-дециметровых радиоволн [16, 17], а также обеспечить регулярные прецизионные измерения потоков радиоизлучения Солнца на сантиметровых-метровых волнах, ведущиеся на РАС НИРФИ "Зименки" [18]. Эти измерения позволяют использовать Луну и Солнце в качестве эталонных по интенсивности из-

ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ

Принимая радиоизлучение Солнца, можно следить за его активностью и в какой-то степени прогнозировать ее последствия на Земле и в околоземном пространстве. Это было понято более чем за полтора десятилетия до первых полетов космонавтов (когда приходится учитывать возможную радиационную опасность при повышенной солнечной активности), и в результате были организованы сначала эпизодические, а затем регулярные и непрерывные наблюдения за радиоизлучением Солнца на различных длинах волн — от сантиметровых до декаметровых — так называемая "Радио служба Солнца". Центральной организацией "Радио службы Солнца" в нашей стране является радиоастрономическая обсерватория "Зименки" НИРФИ, регулярно публикующая специальный выпуск "Радиоизлучение Солнца". Постоянные наблюдения в системе "Служба Солнца", кроме НИРФИ, проводятся в Главной астрономической обсерватории АН СССР, Крымской астрономической обсерватории АН СССР, Астрономической обсерватории АН Латвийской ССР, Абастуманской астрофизической обсерватории АН Армянской ССР, ИЗМИРАН АН СССР, Кисловодской горной станции и Уссурийской горно-таежной станции АН СССР.

В области солнечно-земных связей выделяют два направления исследований: первое, связанное с разработкой методов прогноза и диагноза солнечных геоэффективных явлений, и второе, направленное на изучение связей физических процессов на Солнце и в земном и околоземном пространстве.

Проблема прогнозирования солнечных вспышек по всей сложности и значимости сравнима с фундаментальными физическими проблемами. Ее решение в научных программах развитых стран стоит наряду с решением энергетических и

экологических проблем. Существующие в настоящее время многочисленные прогностические схемы базируются, в основном, на богатом эмпирическом материале, в том числе и в радиодиапазоне, и в то же время не позволяют достичь степени оправдываемости выше 70–80%. Существенную роль в прогрессе прогнозирования солнечных вспышек может сыграть развитие физически обоснованных методов прогноза, основанных на знании моделей активных областей и динамики предвспышечных процессов. Наиболее перспективным при этом представляется изучение процессов возникновения и развития неустойчивостей, находящихся отражение во флуктуационных характеристиках излучения.

Проводимое в Горьковском НИРФИ изучение флуктуационных процессов на Солнце в радиодиапазоне привело к обнаружению эффекта возрастания амплитуды долгопериодных ($T \geq 20$ минут) пульсаций микроволнового радиоизлучения Солнца перед протонными вспышками [19]: Исследование этого эффекта позволяет надеяться на создание на основе наблюдения слабых временных вариаций солнечного радиоизлучения метода краткосрочного прогноза мощных солнечных вспышек.

Необходимо отметить, что изучение долгопериодных пульсаций в прогностических целях является одним из наиболее признанных перспективных направлений в радиодиапазоне, в связи с чем такие исследования стали активно развиваться в других радиоастрономических организациях.

В последнее время появляется все больше исследований тонкоструктурных образований в непрерывном спектре сантиметрового радиоизлучения Солнца как показателя развития активных областей в предвспышечный период.

Во втором направлении исследований в области солнечно-земных связей отметим обнаружение корреляционной зависимости между пульсациями солнечного радиоизлучения и колебаниями магнитного поля Земли (МПЗ) в предвспышечные периоды [20], позволяющее надеяться на использование пульсаций МПЗ как возможного параметра при прогнозировании протонных вспышек.

ИССЛЕДОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Характеристики атмосферы (тропосферы и ионосферы) имеют существенное значение для радиосвязи, радиолокации, радиометеорологии, радионавигации и т.д. Наиболее существенным для изучения условий распространения в атмосфере является использование радиоизлучения Солнца. Поскольку Солнце является мощным генератором радиоизлучения, расположенным вне земной атмосферы и видимым с Земли под различными углами в зависимости от времени суток, то, принимая это радиоизлучение, например, на восходе или заходе, можно измерить рефракцию, то есть искривление лучей в атмосфере. Учет рефракции, достигающей десятков угловых минут вблизи горизонта, чрезвычайно важен для практики, в частности при решении конкретных задач радиолокации и радионавигации. По результатам этих же измерений можно определить и поглощение радиоволн в атмосфере, так как при разных углах наблюдения радиоизлучение проходит слои атмосферы, имеющие разную толщину, и следовательно, по-разному ослабляется.

Радиоастрономия дала возможность использовать и другой способ определения поглощения в нижней части атмосферы — тропосфере, примененный сначала (1945 г.) в Массачусетском технологическом институте Дике и его сотрудниками, а затем (начиная с 1948 г.) и в нашей стране.

Способ основан на измерении собственного теплового радиоизлучения тропосферы. Сущность его заключается в следующем. Тепловое радиоизлучение тропосферы однозначно связано с ее поглощением, определяемым для безоблачной атмосферы в основном молекулами кислорода O_2 и водяного пара H_2O . Это поглощение носит резонансный характер (резонансные частоты кислорода соответствуют диапазону миллиметровых волн вблизи значения 0,5 см, а водяного пара — также в диапазоне миллиметровых волн и вблизи значения 1,35 см) и, естественно, тем больше, чем больше концентрация O_2 и H_2O и чем большая толща атмосферы участвует в пог-

лошении. Когда радиоизлучение принимается антенной, направленной в зенит, оно определяется эффективной высотой поглощающей атмосферы $H_{O_2} \approx 5$ км для O_2 и $H_{H_2O} \approx 2,5$ км для H_2O . В тех же случаях, когда главный луч диаграммы направленности антенны находится под углом ψ к горизонту, он пронизывает большую толщину тропосферы, определяемую как $H \csc \psi$. До углов порядка $7-5^\circ$ к горизонту сохраняется прямая зависимость интенсивности принимаемого радиоизлучения от $\csc \psi$, и по ее наклону можно судить о величине поглощения.

Поскольку поглощение в водяном паре пропорционально абсолютной влажности ρ , то, строя зависимость измеренных величин поглощения от абсолютной влажности и экстраполируя эту прямую к нулевой влажности, можно определить поглощение в кислороде (при $\rho = 0$), а по наклону прямой — поглощение в водяном паре [21].

Наиболее интенсивно радиоастрономические методы исследования условий распространения радиоволн в атмосфере развивались и использовались в нашей стране. В 1951-52 годах в г. Горьком [21] впервые были разработаны методы раздельного измерения поглощения в кислороде и водяном паре атмосферы и измерено радиоизлучение тропосферы на волнах 3 и 10 см, в 1956 году в ФИАН СССР впервые измерили поглощение раздельно в кислороде и водяном паре в миллиметровом диапазоне, на волне 8 мм [22], а в НИРФИ в 1960 г. на 4 мм [57].

Следует особо отметить чрезвычайно интересные исследования эффективных высот и линий поглощения малых атмосферных составляющих [58, 59].

К настоящему времени благодаря применению указанных методов получены обширные данные о поглощении в безоблачной тропосфере волн от миллиметрового до метрового диапазонов [25, 59].

Измерения радиоизлучения облачной атмосферы и радиоизлучения дождя позволяют получить данные о средней водности и эффективной температуре облаков, а также об интенсивности дождя и о полном поглощении на наклонных трассах [60, 61].

Значительно расширяются возможности радиометричес-

ких исследований тропосферы при наблюдениях с самолетов и искусственных спутников Земли. Эти исследования по существу смыкаются с пассивной радиолокацией. [23, 24].

Что касается ионосферы Земли, то ее исследование радиоастрономическими методами позволило определить поглощение, рефракцию и полную электронную концентрацию на луче зрения в этой части атмосферы. В этой области существенные результаты получены в НИРФИ, ФИАН СССР, ИРЭ АН УССР.

Дискретные источники космического радиоизлучения позволяют путем интерферометрических наблюдений за источником по измерениям кажущегося смещения источника определять рефракцию в ионосфере, вызванную регулярным изменением в пространстве электронной концентрации N и крупномасштабными неоднородностями ионосферной плазмы, а также следить за крупномасштабными изменениями регулярных и хаотических градиентов в ионосфере по изменению во времени характерных периодов интерференционной картины, записанной на выходе интерферометра. По замыванию (в среднем) этой картины, вызванному неоднородностями сравнительно малых масштабов (размером $l \leq d$, где d — расстояние между антеннами интерферометра), можно измерять при наличии интерферометров с разными базами спектральные характеристики ионосферных неоднородностей. Рассеяние на ионосферных неоднородностях приводит к тому, что в точку приема излучение от источника приходит различными путями (статистическая многолучевость). В результате интерференции различных мод возникают пространственные вариации интенсивности принимаемого от источника излучения, а при эффективном движении ионосферных неоднородностей относительно луча зрения на источник возникают временные флуктуации сигнала ("мерцание радиоисточника"). Характер этих флуктуаций различен на различных несущих радиочастотах, поэтому факт широкополосного излучения космических радиоисточников используется для изучения параметров неоднородностей ионосферы. Пространственно разнесенный прием используется для изучения движений в ионосфере.

Радиоастрономические методы исследования ионосферы и ее нерегулярной структуры внесли на заре ионосфер-

ных исследований значительный вклад в наше понимание происходящих в ионосфере физических процессов и с успехом используются в настоящее время, например, при изучении эффектов воздействия мощного радиоизлучения на ионосферу.

В ФИАН СССР наиболее интенсивно работы по исследованию ионосферы проводились в период с 1951 по 1969 гг. на Крымской научной станции ФИАН (подробнее см. [26]). С 1951 г. проводились исследования неоднородной структуры ионосферы с помощью "просвечивания" ее излучением Кассиопеи-А, Лебедя-А и Тельца-А.

Был предпринят большой цикл исследований неоднородностей малых масштабов в ионосфере по программе МГСС (Международного года спокойного Солнца). Были детально исследованы размеры, форма и движение неоднородностей с характерными размерами порядка нескольких километров, их суточный и сезонный ход. Эти работы были выполнены методом пространственно-разнесенного приема сигналов от радиисточников Кассиопея-А, Лебедь-А, Дева-А с помощью "малого треугольника", составленного тремя параболическими антеннами, работавшими на волне 6 метров.

Другой большой цикл работ, продолжавшийся до 1969 года, был посвящен исследованию крупномасштабной структуры ионосферы. Основным методом исследований были измерения различных составляющих рефракции радиоволн от внеземных источников в ионосфере с помощью интерферометров. Использовались как вертикальные (морские) интерферометры (г.Козьма, г.Кастель), так и интерферометры с горизонтальными базами. Горизонтальные интерферометры, составленные из двух антенных полотён, использовались не только как отдельные инструменты, но и как составляющие "большого треугольника" (п.Кацивели - п.Кипарисное - п.Научный). В результате этих работ были измерены величины нерегулярной рефракции радиоволн в ионосфере, найдены их зависимости от зенитного угла, времени суток и года, от направления прихода лучей относительно стран света, их связь с активностью Солнца.

На основании выполненного в 1955-1959 гг. цикла одновременных измерений рефракции при зенитных углах

0–30° и 77–90° с помощью морского интерферометра с базой 286,3 м (гора Кошка) и горизонтального интерферометра с базой 520 м, ориентированной в направлении восток–запад (антенны "ломоть" 18x2 м и диаметром 30 м) были получены данные о параметрах крупномасштабных ионосферных неоднородностей.

В НИРФИ радиоастрономические методы используются в ионосферных исследованиях начиная с 1959 года. В этот период был существенно развит метод и проведены обширные радиометрические исследования поглощения радиоволн в ионосфере на умеренных и высоких широтах и получены данные об электронной концентрации и эффективном коэффициенте рекомбинации в нижней ионосфере (слой D) в условиях спокойной ионосферы, в периоды солнечных затмений, солнечных вспышек, а также в условиях возмущенной ионосферы авроральных широт [27]. С помощью измерений флуктуаций интенсивности и углов прихода радиоизлучения дискретных источников (Лебедь–А и Кассиопея–А) были получены сведения о параметрах неоднородностей F–слоя ионосферы умеренных и авроральных широт (в различных геофизических условиях) в диапазоне масштабов от сотен метров до десятков–сотен километров. При этом с помощью многочастотного приема была впервые проанализирована структура дифракционной картины от дискретного источника на поверхности Земли, ее селективные свойства, что позволило, во-первых, показать наличие в ионосфере широкого спектра масштабов (степенной спектр флуктуаций концентрации) неоднородностей, исследовать фокусирующие свойства ионосферных неоднородностей, а во-вторых, изучить поведение частотной корреляции флуктуаций, обусловленных неоднородностями малых ($l \leq 1$ км) масштабов и показать, что в частотной корреляции содержится информация о крупномасштабных структурах среды [28]. Эти свойства частотной корреляции впоследствии были использованы при изучении неоднородной структуры межзвездной плазмы.

После начала исследований эффектов воздействия мощным радиоизлучением на ионосферу радиоастрономический метод был с успехом применен для исследования искусственной ионосферной турбулентности. С его помощью (при-

ем излучения источника на высоконаправленную антенну и интерферометр) были обнаружены мелкомасштабные $l \lesssim 20$ м искусственные неоднородности ионосферы, а также получены сведения об искусственной турбулентности с $l \gtrsim 0,3-1$ км [29].

Для определения электронной концентрации в ионосфере в НИРФИ было предложено [30] использовать открытое В.А.Разиным [31] явление поляризации космического радиоизлучения. Радиоастрономический поляризационно-фарадеевский метод [30] позволяет определить полное электронное содержание на луче зрения в ионосфере N_p по фарадеевскому вращению плоскости поляризации линейно-поляризованного радиоизлучения областей Галактики. Первые измерения этим методом были выполнены на РАС НИРФИ "Старая Пустынь" в 1970 г. и с 1976 г. эти измерения ведутся регулярно. Начиная с 1984 г. такие измерения стали проводиться в г.Ашхабаде (ФТИ АН Туркм. ССР) и в г.Мурманске (ПГИ КФ АН СССР).

По сравнению со спутниковыми методами определения электронного содержания радиоастрономический метод обладает рядом преимуществ. Исключение из схемы эксперимента спутника позволяет существенно удешевить измерения и производить их из любого пункта на поверхности Земли. Последнее особенно существенно для полярных широт. Дело в том, что для высоких широт геостационарный спутник находится вблизи горизонта. Поэтому для изучения временных вариаций электронного содержания в полярной ионосфере спутниковые методы становятся затруднительными, а радиоастрономический метод приобретает особую ценность. Проведенные в НИРФИ исследования поляризации галактического радиоизлучения в широком диапазоне волн (0,18-3м) позволили определить наиболее яркие в поляризованном радиоизлучении участки небосвода, пригодные для измерений полного электронного содержания, и оптимальные для этой цели длины волн. Разработана методика этих измерений.

За почти десятилетний период наблюдений электронного содержания на РАС НИРФИ "Старая Пустынь" накоплен богатый экспериментальный материал, относящийся к различным фазам цикла солнечной активности. На базе

этих данных, в частности, проводилось изучение явления ночного возрастания электронного содержания. Был получен сезонный ход вероятности появления этого возрастания, а также установлена связь этого явления с уровнем геомагнитной активности.

Многолетние исследования радиоизлучения тропосферы привели к разработке методов дистанционного радиометрического определения высотных распределений температуры и водяного пара, общего влагосодержания тропосферы, высоты, толщины, температуры и влажности облаков и созданию в последние годы в НИРФИ так называемого радиометеоскопа — комплекса радиотелескопов, способных принимать и измерять радиоизлучение тропосферы на ряде длин волн от 1,6 мм до 1,35 см [32].

Существенным преимуществом радиометеоскопа является его всепогодность. Комбинирование метода, в основе которого лежит использование радиотелескопа с оптическими, акустическими и радиолокационными методами позволяет получить ряд новых ценных сведений о состоянии атмосферы в обширном регионе, например, о количестве содержащегося в ней углекислого газа, загрязнении дымом, наличии вредных примесей и т.д. Таким образом, создается возможность применить радиоастрономические методы и приборы для целей охраны окружающей среды.

Расположение радиометеоскопов на спутниках Земли открывает реальные перспективы оперативного получения метеоданных в глобальном масштабе нашей планеты и тем самым существенного повышения точности прогнозирования погоды.

РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАНЕТ

РАДИОМЕТРИЯ В МЕДИЦИНЕ

Принцип действия радиометеоскопа основан на том, что на различных длинах волн за излучение ответственны различные слои тропосферы (особенно резко это проявляется вблизи линий резонансного поглощения).

На этом же принципе основаны методы исследования по их собственному радиоизлучению физико-химических свойств различных тел, в частности, приповерхностных слоев Луны и других планет. Принимая радиоизлучение и точно измеряя яркостную температуру, например, Луны, на различных длинах волн, можно фактически зондировать подповерхностные слои Луны до глубин в несколько метров и таким образом определять физико-химические характеристики лунной поверхности. Эти исследования проводились с 1956 г. в течение 10 лет двумя группами исследователей в Горьком и в Москве в ФИАНе (см., напр., [33, 34, 59]).

Использование разработанного в НИРФИ метода прецизионных измерений потоков радиоизлучения — метода "искусственной Луны" — позволило достаточно точно установить параметры лунной поверхности, что оказалось полезным при определении условий посадки автоматических станций на Луну. В частности, была опровергнута широко распространенная гипотеза о "пылевой шубе" Луны и был обнаружен поток тепла из недр Луны, за что В.С.Троицкому и В.Д.Кротикову был выдан диплом об открытии [35].

Дистанционное радиометрическое зондирование открыло неожиданные возможности и перспективы в столь далекой от радиоастрономии области, какой является медицина. Принимая собственное радиоизлучение человеческого тела на различных длинах волн, можно весьма точно измерять и контролировать температуру в глубине тела, что чрезвычайно важно не только для диагностики, но и для лечения различных заболеваний. Эти работы в последние годы успешно развиваются в НИРФИ и ИИФ АН СССР в сотрудничестве с медиками г. Горького (см., например, [36, 62]).

РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В НАВИГАЦИИ

Широко используется радиоастрономия в навигации. Всем известен солнечный секстан — оптический прибор для определения местоположения корабля или самолета. Но он, как и все оптические инструменты, действует лишь в безоблачную погоду. Достижения радиоастрономии позволили создать радиосекстан, основанный на приеме радиоизлучения Солнца. В отличие от оптического, этот прибор является всепогодным, так как сантиметровые радиоволны практически свободно проходят через облака и дождь.

В 50-х годах особое внимание уделялось разработке радиосекстанов в США. Различными фирмами были изготовлены и выпущены образцы радиосекстанов, предназначенные для кораблей и подводных лодок. В нашей стране впервые радиосекстаны разрабатывались в Ленинграде и Горьком. Так, в 1950 г. в Ленинграде были разработаны основные принципы создания 3-сантиметрового солнечного "радиокомпаса" [37], а на Горьковской радиоастрономической станции "Зименки" прототип радиосекстана работал уже в 1951 г. и представлял собой радиотелескоп с так называемым сканированием луча. Сейчас широко используются не только солнечные радиосекстаны, но и радиосекстаны, принимающие радиоизлучение дискретных источников — галактических и внегалактических источников радиоизлучения. Это объясняется тем, что Солнце имеет сравнительно большие угловые размеры (около половины градуса), а его центр радиоизлучения не всегда совпадает с оптическим. Поэтому приходится специально измерять положение центра тяжести радиоизлучения Солнца (ЦТР). Дискретные источники радиоизлучения имеют малые (единицы минут дуги) угловые размеры и поэтому позволяют реализовать большую точность определения местоположения радиосекстана. Тем не менее и солнечные радиосекстаны не утратили своего значения, а для фиксации ЦТР Солнца проводятся специальные наблюдения. Изучение смещения ЦТР Солнца было начато в 1956 г. на волне 3,2 см [38] и в настоящее время эти исследования ~~продолжаются~~.

РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНТЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Радиосекстан по существу представляет собой небольшой радиотелескоп, состоящий из антенны и радиоприемной системы. Чтобы определить местоположение, например, корабля, луч антенны должен быть наведен на радиисточник с заранее известными координатами. При этом необходимо точно знать расположение самого луча в пространстве (связь направления оси луча с координатной системой радиотелескопа), то есть провести юстировку антенны. Юстировка небольших антенн особых трудностей не представляет, для этого можно использовать, например, передатчик, расположенный на небольшой вышке. Но юстировка крупных (с диаметром в несколько десятков метров) антенн радиолокационных станций и систем космической связи является сложнейшей технической проблемой, так как источники радиоизлучения с известными параметрами должны располагаться на гигантских (сотни метров высотой) вышках или летательных аппаратах. Возникла мысль использовать для юстировки антенн и измерения их диаграмм направленности Солнце и дискретные источники. Именно этот способ впервые одновременно и независимо был предложен в 1950 г. в США и в нашей стране [37, 39].

В дальнейшем радиоастрономические методы антенных измерений активно развивались в Москве, Ленинграде и Горьком (см., например, [40-42]).

Юстировка антенн по радиоизлучению внеземного источника сводится к сопоставлению расчетного момента прохождения источника через направление максимума диаграммы направленности антенны (этот момент нетрудно рассчитать, зная координаты источника и местоположение антенны) с моментом приема антенной сигнала максимального уровня от указанного источника. Одновременно с юстировкой можно по радиоизлучению движущегося по небу источника (или ~~меняя ориентацию~~ антенны) измерить диаграмму направлен-

ности антенны, то есть форму ее луча.

Кроме юстировки и измерения диаграммы направленности внеземное радиоизлучение позволяет измерять эффективную площадь, коэффициент полезного действия и другие параметры антенны. Коэффициент полезного действия измеряется по собственным шумам антенны. Этот метод был разработан в начале 50-х годов в Горьком и Ленинграде [43, 44]. Метод основан на известном законе термодинамики о взаимной пропорциональности излучательной и поглощательной способностей тел. Антенна с потерями не только ослабляет внешний сигнал, но и излучает пропорционально своей температуре и коэффициенту поглощения. Направляя антенну в область неба со слабым радиоизлучением (например, в зенит), можно по величине выходного сигнала приемника, обусловленного в основном собственным радиоизлучением (шумами) антенны, много большим, чем внешнее излучение, определить потери (КПД) антенны. Коэффициент рассеяния и усиление можно измерять по собственному радиоизлучению покрытого поглощающим материалом "черного" диска, как это было предложено в 1960 году в НИРФИ [5], а также по собственному радиоизлучению земной поверхности, в частности, леса и среза почвы [45, 46] и по распределенному космическому радиоизлучению [47].

В настоящее время использование "черных" дисков и внеземных источников радиоизлучения для калибровки антенн стало обычной и повседневной практикой, а достигаемая при этом экономия весьма существенна.

Для измерения эффективной площади антенн по внеземным источникам необходимо точно измерить, проэталонировать на волнах различной длины интенсивности радиоизлучения этих источников (см. разд. 1 настоящей статьи).

ПАССИВНАЯ РАДИОЛОКАЦИЯ

Еще одним важным направлением практического использования методов радиоастрономии является пассивная радиолокация. Она основана на том, что различные предметы и поверхность земли излучают и отражают радиоволны, которые могут улавливаться радиотелескопами, позволяя тем самым определить местоположение этих предметов. Интенсивность излучения различных тел зависит от физических свойств их материала и конструкции. Например, наблюдаемое сверху радиоизлучение водных поверхностей существенно меньше, чем излучение поверхности земли; покрытый лесом участок излучает иначе, чем пашня или нива; асфальтовые дороги излучают меньше, чем окружающая их поверхность. Дома, различные постройки также отличаются своим радиоизлучением. Таким образом с помощью установленного на летательном аппарате радиотелескопа можно радиокартографировать местность, причем в любую погоду. При этом не нужно посылать какое-то излучение, как в обычном активном локаторе. Поэтому определение местонахождения различных объектов по тепловому радиоизлучению получило название пассивной радиолокации. Указанное направление интенсивно развивается в нашей стране и за рубежом. Это подтверждается, в частности, значительным количеством публикаций, посвященных физике и технике пассивной радиолокации (см., например, [48-50]).

РАДИОМЕТРИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА

Развитие радиоастрономии, как известно, приходится на послевоенное время, когда для удовлетворения нужд различных направлений радиоэлектроники, главным образом радиолокации, достигла достаточного совершенства техника приема и усиления: были существенно уменьшены собственные шумы радиоламп, смесителей и других элементов.

Необходимость именно в таком направлении работ обусловлена тем, что интенсивность сигнала, принимаемого даже от Солнца, оказалось намного меньше интенсивности собственных шумов аппаратуры, не говоря уже о радиоизлучении Луны, планет и дискретных источников. Для измерения радиоизлучения этих источников нужно было различить слабый сигнал на фоне в сотни раз более мощных шумов аппаратуры.

Были созданы специальные приемные системы — радиометры. Чувствительность их в тысячу раз выше, чем обычных приемников, и они позволяют улавливать тепловое радиоизлучение на сантиметровых волнах даже от слабо нагретых тел, например, от человека. На этом основано уже упомянутое выше применение радиометров в медицине, которое, по-видимому, будет быстро развиваться.

Возможность приема радиоизлучения от нагретых даже до невысокой температуры тел привела к созданию точного измерителя очень малых мощностей, составляющих миллиардные доли микроватта, то есть значительно меньших, чем собственные шумы. Принцип основан на сравнении измеряемой малой мощности, например, какого-либо промышленного генератора стандартных сигналов с мощностью излучения "черного" тела, нагретого до определенной температуры (это излучение определяется температурой тела и точно известно, то есть является эталонным).

Такие приборы впервые позволили непосредственно измерить очень малые мощности, причем с высокой точностью. Первые макеты микроваттметров были разработаны в Горьковском университете уже в 1950 году. Перспективность таких приборов была сразу оценена и в 50-е годы была начата разработка промышленных образцов. В 1958 г. эти приборы на выставке в США получили серебряную медаль.

На основе дальнейших разработок таких приборов промышленность серийно выпускает целый комплекс радиометров на широкий диапазон длин волн для общеизмерительных целей. Эти приборы вошли в жизнь практически в той же степени, как и генераторы стандартных сигналов, являющиеся основой измерительной техники.

РАДИОАСТРОМЕТРИЯ

С ПРИМЕНЕНИЕМ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

СО СВЕРХДЛИННОЙ БАЗОЙ

Середина семидесятых – начало восьмидесятых годов нашего столетия явились годами становления в астрометрии нового направления – радиоастрометрии, основными инструментами которой явились радиоинтерферометры со сверхдлинными базами (РСДБ). Причем для астрометрии, базирующейся до этого времени на позиционных оптических наблюдениях, это дало не только освоение нового участка спектра электромагнитного излучения космических объектов – радиочастотного, но и новые методические приемы и новые возможности для фундаментальных и прикладных исследований [51]. Положительную роль здесь сыграл тот факт, что разработчиками радиоастрономического направления явились не астрометристы, а радиоастрономы, сумевшие первыми увидеть исключительные возможности создаваемой ими новой техники радиоастрономических исследований – РСДБ. Для решения астрометрических задач методами длиннобазовой радиоинтерферометрии оказалось весьма удачным сочетание свойств электромагнитного излучения в радиочастотном диапазоне, параметров земной атмосферы и космической среды, а также наличие сверхкомпактных космических радиоисточников, неразрешимых даже на межконтинентальных базах. В радиодиапазоне можно наблюдать объекты, удаленные на "край" Вселенной, практически вне зависимости от погодных условий, что обеспечивает существенное преимущество радиоастрометрии перед оптической – возможность проведения непрерывных измерений. При этом "сверхудаленность" наблюдаемых космических объектов – квазаров и ядер радиогалактик делает их идеальными реперами невращающейся фундаментальной небесной системы координат – первоосновы для астрометрических приложений в решении задач гео- и планетодинамики, геодезии, службы времени.

Инициатором астрометрического применения РСДБ

явился Горьковский НИРФИ; по данному направлению в городе Горьком в 1968 г. было проведено первое Всесоюзное совещание. Сотрудниками НИРФИ были выполнены в 1972 г. и первые радиоастрономические приложения результатов РСДБ - наблюдения космических мазеров в линии излучения водяных паров (на базе Пушино-Симеиз [52]). В последующем в НИРФИ были разработаны методические основы радиоастрометрии на основе дифференциальных радиоинтерферометрических наблюдений космических источников на сверхдлинной базе [53].

Большая работа по развитию методов радиоастрометрии с применением РСДБ проводилась в ЛФСаО, ГАО и ИТА АН СССР. Пулковскими радиоастрономами в развитие метода дифференциальной радиоастрометрии был разработан так называемый "метод дуг" [54], дающий геометрическое решение задачи установления небесной системы координат, не требующий, в принципе, каких-либо априорных предположений о характере кинематики и динамики системы интерферометрически наблюдаемых источников. В ИТА проводились исследования вопросов применения для решения астрономо-геодезических задач многоэлементных радиоинтерферометрических комплексов [55]. В ИКИ АН СССР и НИРФИ разрабатывались также вопросы применения РСДБ для планетных исследований и задач космической навигации. Сотрудниками этих учреждений в 1983 г. с использованием аппаратного комплекса РСДБ НИРФИ была проведена интерферометрия АМС "Венера-15", находящейся за Солнцем на малом угле элонгации. Таким способом оказывается возможным исследование околосолнечной плазмы.

В области небесной механики, динамики солнечной системы, космической навигации методы РСДБ позволяют исследовать орбитальное движение планеты и ее осевое вращение путем приема сигналов от радиопередатчиков, установленных на планете. В сочетании с наблюдениями квазаров (для уточнения базовых расстояний системы РСДБ), при этом могут быть уточнены орбиты планет и спутников, исследована динамика системы планета-спутник, в частности, системы Земля-Луна. Позволяя измерять весьма точно (до 10^{-3} - 10^{-4} угл.с) угловое расстояние между излучающими объектами (например, радиомаяком и само-

ходным аппаратом на Луне) системы РСДБ вносят существенный вклад в космическую навигацию.

Системы РСДБ позволяют определять величину вектора базы интерферометра с погрешностью порядка 10см , что существенно для решения задач геофизики и геодинамики (движение полюсов Земли, дрейф континентов, вековое изменение момента вращения Земли), а также для создания сети высокоточных геодезических базисов.

Применение методов РСДБ позволяет также создать радиоастрономическую службу всемирного времени и широты, а также систему единого времени на Земле с синхронизацией шкал времени с погрешностью порядка 1нс .

Фундаментальные ограничения на точность решения радиоастрометрических задач и их приложений связываются, в первую очередь, с многокомпонентностью структуры большинства космических радиоисточников [56] и их переменностью и, далее, с релятивистскими эффектами. Первое обстоятельство вызывает необходимость тщательных астрофизических исследований космических радиоисточников, рекомендуемых для решения радиоастрономических задач. В свою очередь, прецизионные (на уровне $10^{-3} + 10^{-4}\text{угл.с}$) измерения положения этих источников, их возможного взаимного перемещения даст неоценимый материал для исследования динамики Вселенной, ее космологических теорий.

Дата поступления статьи
28 августа 1985 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Очерки истории радиоастрономии в СССР. - Киев: Наукова думка, 1985.
2. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. - М.: Наука, 1966.
3. Плечков В.М., Разин В.А. Труды пятого совещания по вопросам космологии, с. 430, Изд. АН СССР, М, 1956.
4. Кротиков В.Д., Порфирьев В.А., Троицкий В.С. - Изв. вузов. - Радиофизика, 1961, т.4, №6.
5. Троицкий В.С., Цейтлин Н.М. - Изв.вузов. - Радиофизика, 1961, т. 4, №3.
6. Дмитренко Д.А., Цейтлин Н.М. - Изв.вузов. - Радиофизика, 1969, т. 12, №5.
7. Разин В.А., Федоров В.Т. - Изв.вузов. - Радиофизика, 1963, т. 6, №5, с.1052.
8. Троицкий В.С., Станкевич К.С., Цейтлин Н.М. и др. - Астрон.ж., 1971, т. 48, №6.
9. Цейтлин Н.М., Дмитренко Д.А. и др. - Изв.вузов. - Радиофизика, 1976, т. 19, №8.
10. Beers J.W.M., Hartsuiker A.P. - *Astron. Astrophys.*, 1972, v.17, p.172.
11. Иванов В.И., Станкевич К.С. Преприят НИРФИ №183, 1984г.
12. Дмитренко Д.А., Цейтлин Н.М., Виноградова Л.В., Гитерман Х.Ф. - Изв.вузов. - Радиофизика, 1970, т. 13, №6, с.823.
13. Виняйкин Е.Н., Разин В.А. - Астрон.ж., 1979, т. 56, №5, с. 913.
14. Станкевич К.С., Иванов В.П. Тезисы докладов ХУ Всесоюзной конференции по радиоастрономии, Харьков, 1983.

15. Цейтлин Н.М., Дмитренко Л.В., Снегирева В.В. - Изв. вузов. - Радиофизика, 1980, т. 23, №8.
16. Троицкий В.С., Тихонова Т.В. - Изв.вузов. - Радиофизика, 1970, т. 13, №9.
17. Пелюшенко С.А. Диссертация, Горький, 1983.
18. Радиоизлучение Солнца, НИРФИ, РАС "Зименки".
19. Кобрин М.М., Коршунов А.И., Снегирев С.Д., Тимофеев Б.В. Солнечные данные, 1973, №10, с.79.
20. Быстров М.В., Кобрин М.М., Снегирев С.Д. - Геомагнетизм и аэрономия, 1979, т. 19, №2.
21. Жевакин С.А., Троицкий В.С., Цейтлин Н.М. - Изв.вузов. - Радиофизика, 1958, т. 1, №2,с.19.
22. Саломонович А.Е., Атаев О.М. - Изв.вузов. - Радиофизика, 1960, т. 3, №4, с. 606.
23. Саломонович А.Е., Соломонов С.В., Хайкин А.С., Гусев В.Н., Кобзев А.А. - ДАН СССР, 1975, т. 233, №4.
24. Саломонович А.Е., Соломонов С.В., Домбковская Е.П., Хайкин А.С. - Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана, 1977, т. 13, №4,.
25. Кисляков А.Г., Станкевич К.С. - Изв.вузов. - Радиофизика, 1967, т. 10, №9-10.
26. Догель В.А., Илясов Ю.П., Кайдановский Н.Л. и др.- В кн.: Очерки истории радиоастрономии в СССР. - Киев: Наукова думка, 1985, с. 3-78.
27. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А. - Изв.вузов. - Радиофизика, 1969, т. 12, №10.
28. Ерухимов Л.М. - Геомагнетизм и аэрономия, 1964, т. 4, с. 75, 1966, т. 6, №4.
29. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Гетманцев Г.Г. и др.- Изв.вузов. - Радиофизика, 1975, т. 18, №4.
30. Разин В.А. и др. - Изв.вузов. - Радиофизика, 1968, т. 11, с. 1461.

31. Разин В.А. Диплом открытия, № 26, с приоритетом от июня 1956.
32. Троицкий В.С., Кузнецова М.Г., Рассадовский В.А. - Изв.вузов. - Радиофизика, 1979, т. 22, № 8.
33. Троицкий В.С., Кротиков В.Д. - УФН, 1963, т. 81, вып. 4, с. 589-639.
34. Саломонович А.Е. Докторская диссертация, М., 1964.
35. Кротиков В.Д., Троицкий В.С. Диплом открытия с приоритетом от 12 ноября 1962.
36. Троицкий В.С., Горбачев В.П. и др. - Изв.вузов. - Радиофизика, 1981, т. 24, № 1.
37. Молчанов А.П. Кандидатская диссертация, Ленинградский госуниверситет, Л., 1950.
38. Вейсиг Г.С., Кушнир В.Ф., Молчанов А.П. Солнечные данные, 1967, №1-2, с. 108.
39. Aarons J. - Proc.IRE, 1953, v.41, N 3.
40. Кузьмин А.Д., Саломонович А.Е. Радиоастрономические методы измерения параметров антенн. - М.: Сов.радио, 1964.
41. Цейтлин Н.М. Применение методов радиоастрономии в антенной технике. - М.: Сов. радио, 1966.
42. Цейтлин Н.М. Антенная техника и радиоастрономия. - М.: Сов. радио, 1976.
43. Труды пятого совещания по вопросам космогонии. Изд. АН СССР, М., 1956.
44. Троицкий В.С. - Радиотехника и электроника, 1956, т. 1, №5.
45. Саломонович А.Е. - Астрон.ж., 1958, т. 35, с.129.
46. Троицкий В.С., Цейтлин Н.М. - Изв.вузов. - Радиотехника, 1960, т. 3, с. 667.
47. Цейтлин Н.М. - Изв.вузов. - Радиофизика, 1958, т. 1, №5-6.

48. Николаев А.Г., Перцов С.В. Радиотеплолокация (пассивная радиолокация). - М.: Сов. радио, 1964.
49. Башаринов А.Е., Тучков Л.Т., Поляков В.М., Аванов Н.И. Измерение радиотепловых и пламенных излучений. - М.: Сов.радио, 1968.
50. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радиоизлучение Земли как планеты. - М.: Наука, 1974.
51. Троицкий В.С., Алексеев В.А., Никонов В.Н. - УФН, 1975, т. 117, вып. 2, с. 363.
52. Алексеев В.А., Гаталок Э.Д., Липатов Б.Н. и др. - Изв. вузов. - Радиофизика, 1975, т.18, №12, с.1777-1785.
53. Алексеев В.А., Липатов Б.Н., Шекотов Б.В. - Изв.вузов. - Радиофизика, 1976, т.19, №11, с.1669-1677.
54. Дравских А.Ф., Красинский Г.А., Финкельштейн А.М. - Письма в АЖ, 1975, т.1, №5, с.43-48.
55. Жонголович И.Д., Валяев В.И., Малков А.А., Сабанина Т.Б. - Бюл. ИТА АН СССР, 1980, т.14, №3, с.529-551
56. Алексеев В.А. - В кн.: Астрономические исследования. - Киев.: Наукова думка, 1981, с.71-75.
57. Кисляков А.Г., Никонов В.Н., Стрежнева К.М. Изв. АН СССР, сер. Физика атмосферы и океана, т.4, с.321-324, 1968.
58. Кисляков А.Г., Куликов Ю.Ю., Рыския В.Г., Препринт ИПФ АН СССР, 1979, с.84-123.
59. Кисляков А.Г. Докторская диссертация. Горький, 1976.
60. Кисляков А.Г., Сухонин Е.В. Тр. Всес. школы-симпозиума по распр. мм и субмм волн в атмосфере, М.,1983, с.236-241.
61. Соколов А.В., Сухонин Е.В. - В кн.: Итоги науки и техники, Радиотехника, т.20, М., АН СССР, 1980, с.107-202.
62. Лихтерман Л.Б., Кисляков А.Г., Тимофеева Т.В. и др., 1 Всес. биофиз. съезд, 1982, Тезисы докл., т.1У, с.94.

Наум Моисеевич Цейтлин

ПРИКЛАДНАЯ РАДИОАСТРОНОМИЯ

Подписано в печать 18.10.85г. МЦ 01964. Формат 60x84/16.

Бумага писчая. Печать офсетная. Объем 1,83 усл. п. л.

Тираж 120. Заказ 4304. Бесплатно.

Отпечатано на ротапринтере НИРФИ