



ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

УДК 621.396.676

Становление и развитие солнечной радиоастрономии в Саратове

А. В. Хохлов

Хохлов Артур Вениаминович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, hohlovav@info.sgu.ru

В статье представлены воспоминания одного из инициаторов радиоастрономических исследований в Саратовском университете. Обсуждается создание радиоастрономической группы, разработка радиофизических методов прогнозирования солнечной активности, двух малых радиотелескопов и программно-аналитического метода управления ими. Рассмотрены теоретическое обоснование и практические реализации прецизионного дифференциально-коммутиционного метода СВЧ-поляриметрии.

Ключевые слова: малый радиотелескоп, солнечное радиоизлучение, всплеск, радио-поляриметр, автоматическое управление, дифференциально-коммутиционный метод, $n-i-p-i-p$ -коммутиатор, турникетное соединение волноводов.

DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2019-19-3-223-236>

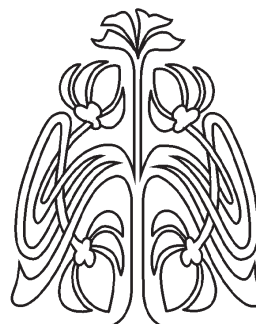
Введение

Радиоастрономия как наука, изучающая Вселенную и ее отдельные объекты путем приема и анализа их собственного излучения радиофизическими методами, с 50-х годов XX века стала интенсивно развиваться во многих странах. Астрономия тысячи лет была оптической, а диапазон частот принимаемых волн составлял около одной октавы. Изучая радиоволны в диапазоне более десятка октав, радиоастрономия обогатила физику и астрономию открытием новых явлений.

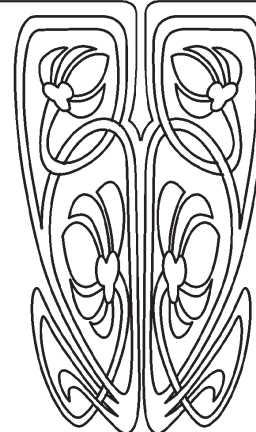
Заведующий кафедрой радиофизики Саратовского государственного университета (СГУ) профессор Григорий Моисеевич Герштейн будучи соратником и продолжателем дел Венедикта Ивановича Калинина – создателя кафедры радиофизики и радиофизического отделения в СГУ, увидел, какие возможности заключены в радиоастрономии для развития астрофизики и научной концепции мироздания в целом и как можно расширить перечень спецкурсов для наших студентов, устанавливая связи электродинамики и электроники СВЧ с новыми проблемами радиоастрофизики. Весной 1968 г. сразу после утверждения меня в ученой степени кандидата физико-математических наук, он предложил мне к началу нового учебного года подготовить курс «Основы радиоастрономии», никогда ранее не читавшийся в СГУ. Так появился в учебном плане кафедры курс радиоастрономии. Лишь несколько лет спустя я понял, какой огромный подарок сделал мне мой мудрый учитель.

Первые лекции и минисеминары по радиоастрономии в СГУ

Вузовского учебника по радиоастрономии в то время не было. Кроме хороших учебников по общей и практической астрофизике



ПРИЛОЖЕНИЯ





можно было использовать переводы иностранных монографий [1, 2] и работы по отдельным вопросам российских ученых [3–5]. Самой удобной для введения в радиоастрономию оказалась небольшая по объему книга профессора Горьковского университета С. А. Каплана «Элементарная радиоастрономия», но она была далека от основных направлений подготовки наших студентов по электродинамике и электронике СВЧ. Используя доступные материалы, создавался спецкурс, приближающийся по методике к основным курсам радиофизического направления. Содержание курса сразу вызвало значительный интерес у студентов. Начиная с сентября 1970 г. они стали обращаться ко мне и просили привлечь для выполнения курсовых и дипломных работ. Мы организовали минисеминар и обсуждали сначала обзорные работы по радиоастрономической аппаратуре и методам измерения космического радиоизлучения, затем по радиоизлучению Солнца на основе периодических публикаций и бюллетеня «Солнечные данные». Позже студенты писали рефераты по радиоизлучению хромосферы Солнца. В 1973–74 учебном году к минисеминару присоединился студент 4-го курса Виктор Мельников. Он сделал два научных доклада по физике Солнца, быстро завоевал лидирующее положение и с блеском защитил курсовую работу. Оценив исключительные способности, кафедра обратилась с ходатайством о направлении В. Ф. Мельникова на преддипломную практику в Горьковский Научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ) с 3 сентября 1974 г. по 1 февраля 1975 г. Весной этого года он защитил дипломную работу и уехал работать в НИРФИ. В настоящее время В. Ф. Мельников – доктор физико-математических наук, ведущий сотрудник Главной астрономической обсерватории РАН. В 1977–1979 гг. группа студентов кафедры активно участвовала в исследовании СВЧ-элементов, используемых в радиотелескопах и радиометрах, и осенью 1978 г. по ходатайству кафедры были направлены на преддипломную практику в НИРФИ и в Крымскую астрофизическую обсерваторию.

Ситуация с литературой не изменялась, и я обратился к Г. М. Герштейну с предложением написать учебное пособие по радиоастрономии и подумать о начале радиоастрономических исследований в СГУ. Написание учебного пособия он одобрил, а от практических исследований отговаривал, ссылаясь на то, что потребуются большие радиотелескопы вдали от города, где радиопомехи минимальны, а значит, и нужны

большие финансовые вложения. Мне было трудно ему возражать. Неожиданная поддержка поступила от директора НИИ механики и физики СГУ профессора В. Н. Шевчика. Ему представлялось неестественным, что уникальные СВЧ-полупроводниковые приборы, разрабатываемые в СГУ под руководством профессора З. И. Кирьяшкиной, используются во многих организациях, но не у нас в СГУ. Пожелание использовать достижения наших ученых и инженеров поддержал также начальник Станции наблюдения искусственных спутников Земли (далее – Станция) Ю. А. Склярков.

Повышение квалификации по астрономии. Встречи с радиоастрономами Москвы и Горького

В 1973 г. мне предстояло пройти повышение квалификации в МГУ. По согласованию с Г. М. Герштейном я стал слушателем по специальности «Астрономия» вместе с Ю. А. Склярковым. Он был знаком со многими профессорами МГУ и познакомил с ними меня.

Одним из самых больших подарков этого ФПК для меня стало знакомство с великим ученым академиком Я. Б. Зельдовичем. Просматривая расписание занятий студентов МГУ, я обнаружил курс «Космология», который он читал 2 раза в неделю для пятикурсников, и стал посещать все его лекции. Это был очень непростой, сильно математизированный оригинальный курс. С самой первой лекции мне понравилась методика, которой он пользовался. Каждый раздел лекция состоял из трех частей. Сначала называлась тема и подробно на качественном уровне излагалась суть проблемы. Затем почти без комментариев строилась математическая модель, и, наконец, происходил анализ математических выкладок и формулировались основные выводы, иногда даже в виде теорем, что меня сильно удивляло.

Примерно через две или три недели Я. Б. Зельдович заметил меня, попросил остаться после лекции и поговорил со мной. Помню, что ему особенно импонировало, что я радиофизик. После лекций я иногда задавал вопросы. Совершенно неожиданным для меня явилось его предложение посещать научные семинары в отделе релятивистской астрофизики Государственного астрономического института имени П. К. Штернберга (ГАИШ). Семинары были интересны и очень поучительны.

Наши встречи с московскими радиоастрономами продолжались. Я привез с собой еще несброшюрованное мое пособие «Введение в



радиоастрономию» и показал его московским коллегам. Книга из трех глав [6] была ориентирована на радиофизиков. В первых двух главах вводились характеристики поля космического радиоизлучения и принципы их измерения радиофизическими методами. Основная цель – установить связь электродинамических характеристик, принятых в радиофизике и электронике, и термодинамического описания, распространенного в оптической астрофизике и основанного на использовании равновесного теплового излучения абсолютно черного тела. Студентам следовало показать, как вместо мощности и плотности потока использовать понятие радиояркостной температуры $T_{\text{я}}(\theta, \phi)$ как физической температуры эквивалентного источника в состоянии термодинамического равновесия: $T_{\text{я}}(\theta, \phi) = \lambda^2 I(\theta, \phi)/2k$, где λ – длина волны, м, $I(\theta, \phi)$ – яркость источника, $\text{вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{стер}^{-1}$, θ и ϕ – координаты, $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ дж·градус $^{-1}$ – постоянная Больцмана. Это позволяло выражать через яркостную температуру плотность потока радиоизлучения S и антенную температуру T_A , соответствующую принятой мощности излучения, по формулам

$$S = \frac{2k}{\lambda^2} \iint_{\Omega_{\text{ист}}} T_{\text{я}}(\theta, \phi) d\Omega, \quad (1)$$

$$T_A = \frac{A_{\text{эфф}}}{\lambda^2} \iint_{\Omega_{\text{ист}}} T_{\text{я}}(\theta, \phi) P_{\text{н}}(\theta, \phi) d\Omega,$$

где $A_{\text{эфф}}$ и $P_{\text{н}}(\theta, \phi)$ – апертура и нормированная диаграмма направленности антенны. Кроме того, используя радиофизический подход, удалось построить пространственно-частотную характеристику (ПЧХ) антенны. Проводя аналогию между распределением яркости $I(\theta)$ источника излучения (Солнца или Луны) и прямоугольным импульсом напряжения $U(t)$, я предлагал представить $I(\theta)$ интегралом Фурье и получить известный в радиофизике спектр гармоник, но гармоник не временных, а угловых или пространственных. Для двумерных источников получался двумерный спектр пространственно-частотных гармоник.

Теперь об антеннах. Когда антенна имеет однородное распределение поля $E(x_\lambda)$ в раскрыве ($-a_\lambda/2 \leq x_\lambda \leq a_\lambda/2$, $x_\lambda = x/\lambda$ – координата), ее диаграмма направленности по напряженности равна $E(\sin \theta) = \sigma[\sin(\pi a_\lambda \sin \theta)]/(\pi a_\lambda \sin \theta)$, где σ – коэффициент пропорциональности. Нормированная диаграмма направленности по мощности $P_{\text{н}}(\theta) = E^2(\theta)$, а ее Фурье-трансформанта со-

гласно теореме о свертке удовлетворяет соотношению $P_{\text{н}}(x_\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} E^*(y) E(x_\lambda - y) dy$, имеет треугольную форму и обращается в нуль при $x_\lambda = \pm a_\lambda$. Это и есть ПЧХ антенны как фильтра низких частот. ПЧХ как Фурье-трансформанта $P_{\text{н}}(\theta)$ встречалась в книгах по радиоастрономии, но ее вывод отсутствовал. Последняя, третья глава рассматривала различные методы описания поляризации и принципы поляризационных измерений. Поляриметрия долгое время использовалась только в оптике. Здесь сформировались понятие частичной поляризации, поляризационных параметров Стокса и поляризационных матриц. В радиофизике электромагнитные колебания считались полностью поляризованными, обладали линейной или эллиптической поляризацией и хорошо описывались параметрами поляризационного эллипса. При согласовании радиофизического и оптического описания все параметры Стокса, отвечающие за пространственную структуру поляризованной части волны, мною впервые были введены в разностной (дифференциальной) форме:

$$Q = E_x^2 - E_y^2, \quad U = E_{45}^2 - E_{-45}^2, \quad V = E_R^2 - E_L^2, \quad (2)$$

где E_x^2 , E_y^2 , E_{45}^2 , E_{-45}^2 , E_R^2 , E_L^2 – мощности составляющих поля, линейно поляризованных вдоль осей OX и OY выбранной декартовой системы координат, под углами 45° и -45° к оси OX , правосторонне (R) и левосторонне (L) поляризованных по кругу (характеристическое сопротивление среды принято равным единице). Четвертый параметр Стокса I , характеризующий полную мощность излучения, определялся как $I = E_x^2 + E_y^2 = E_{45}^2 + E_{-45}^2 = E_R^2 + E_L^2$. Оказалось, что при разложении волны в круговом (e_R, e_L) или линейном (e_{45}, e_{-45}) базисе разность сигналов E_R и E_L или E_{45} и E_{-45} равна напряженности горизонтально поляризованной компоненты волны E_x , а их сумма – вертикально составляющей E_y . Одновременно появился строгий вывод для мощности W в виде суммы половины мощности неполяризованной компоненты и полной мощности выбранной поляризованной составляющей:

$$W = \frac{1}{2} S A_{\text{эфф}} (1 - d) + S A_{\text{эфф}} d \cos \frac{MM_A}{2}, \quad (3)$$

где d – степень поляризации волны, MM_A – дуга на поляризационной сфере Пуанкаре между поляризационными состояниями волны и антенны. Все выводы преследовали единственную



цель – показать студенту-радиофизику откуда появляются эти соотношения, однако именно выводы заинтересовали радиоастрономов больше всего.

Интересно, что в это время в ГАИШ приехали несколько сотрудников НИРФИ, в том числе профессор С. А. Каплан и ведущий инженер НИРФИ Ю. Б. Веденеев. Выяснилось, что в НИРФИ разработаны малые солнечные радиотелескопы, удобные для исследований радиоизлучения Солнца и рассчитанные на работу в полевых условиях, а комплект чертежей на экваториальные поворотные устройства (ЭПУ) можно запросить у ОКБ НИРФИ.

Изготовление поворотных устройств радиотелескопов и создание радиометра

Когда пришли чертежи, мы обратились к профессору СГУ, Генеральному директору научно-производственного объединения «Тантал» Г. А. Умнову и попросили рассмотреть возможности изготовления радиотелескопов. Он пообещал изготовить три радиотелескопа за небольшую сумму, которую выделил Ю. А. Складоров из собственных денег, зарабатываемых на выполнении хоздоговорных НИР. В 1971 г. Станция наблюдения ИСЗ во главе с Ю. А. Складоровым была преобразована в лабораторию астрономии и геофизики (ЛАГ) СГУ. В лаборатории появились программы наблюдения комет и астероидов, визуальных наблюдений покрытий звезд Луной, оригинальные работы в области переменных звезд и другие. Поэтому развертывание радиоастрономических исследований представлялось вполне естественным. Хочу сразу отметить, что в создании радиотелескопов нам помогали многие люди (студенты, сотрудники лаборатории и многих предприятий г. Саратова), но если бы не моральная, техническая и материальная поддержка Ю. А. Складорова, радиоастрономия в Саратовском университете скорее всего не появилась бы никогда. Несмотря на огромный объем ежедневных собственных работ и исследований, он постоянно интересовался как идет изготовление радиотелескопов и, если было нужно, подсказывал и помогал.

Из литературы по радиоастрономии и бесед с российскими специалистами в Москве стала ясной структура простого модуляционного радиометра супергетеродинного типа без предварительного усиления в виде совокупности высокочастотного (ВЧ) и низкочастотного узлов. В ВЧ-узел входили рупорный облучатель

антенны, модулятор интенсивности принятого СВЧ-сигнала, преобразователь последнего в напряжение промежуточных частот и усилитель промежуточных частот (УПЧ) с детектором. Низкочастотный узел (УНМР) служил для усиления сигналов модуляции и преобразования в выходной сигнал, пропорциональный мощности радиоизлучения. ВЧ-узел каждая обсерватория делала по-своему, обеспечивая минимальный уровень шумов. Нам советовали для начала скопировать один из работающих солнечных радиометров.

Прежде чем создавать радиометр, выбрали диапазон рабочих частот радиотелескопа. На кафедрах факультета и в НИИМФ СГУ многие эксперименты проводились в трехсантиметровом диапазоне волн, т.е. у нас был опыт работы с СВЧ-элементами в этом диапазоне, а в НИРФИ уже работал солнечный радиотелескоп на частоте 9.1 ГГц (3.3 см). Поэтому выбрали частоту 8.9 ГГц (3.37 см). В отведенной комнате в ЛАГ был установлен стеллаж (рис. 1, а) для пультов управления малыми радиотелескопами и измерительных приборов.

Весной 1974 г. я поехал в НИРФИ для консультации. Ю. Б. Веденеев и его коллеги встретили меня очень доброжелательно, подробно рассказали и даже показали как устроены СВЧ-узлы радиометра, облучатель антенны и малощумящий УПЧ, а УНМР порекомендовали купить у ОКБ ИРЭ или обратиться к ним за чертежами. Денег на покупку у нас не было, и мы решили использовать второй вариант. Кроме этого, Ю. Б. Веденеев, узнав, что мы пока не нашли подходящие параболические антенны, подарил Саратовскому университету двухметровое зеркало. Еще одну антенну диаметром 1.1 м мы получили от Саратовского радиоприборного завода.

Нам предстояло изготовить, настроить и измерить рупорный облучатель антенны, модулятор интенсивности и смеситель. Конструкцию этих узлов я проектировал и делал чертежи сам, а готовые узлы подстраивали и измеряли их характеристики студенты. Замечу, что все описанные узлы по представлению лаборатории изготавливались в механических мастерских НИИМФ. Тройники и изогнутые по радиусу волноводы они изготавливали с точностью до 0.1 мм, причем поверхность после обработки была зеркальной без каких-либо следов резца.

Дублирование радиометра НИРФИ началось с копирования и расчета рупорного облучателя антенны (рис. 1, б) и волноводного Y-модулятора



a/a



б/б

Рис. 1. А. В. Хохлов у стеллажа для управления радиотелескопами (а) и с рупорным облучателем (б)
 Fig. 1. A. V. Khokhlov at the rack for control of radio telescopes (a) and with horn feed (b)

интенсивности СВЧ-сигналов. Для переключения сигналов в модуляторах требовались коммутаторы. После консультаций с известным специалистом в области физики полупроводников доцентом Д. А. Усановым было решено коммутаторы на входах волноводного тройника делать в виде тонких резонансных диафрагм с *n-i-p-i-n*-диодами, которые с успехом производило предприятие «Тантал». Диафрагмы легко размещались на фланцах волноводов, обладали очень малым ослаблением при обесточенном (открытом) диоде и огромным – при закрытом диоде. Но переключения диафрагмы из одного состояния в другое сопровождалось искажением прямоугольной формы импульсов мощности из-за инерционности переходных процессов при рассасывании носителей заряда. Я предложил новое устройство управления диодами, содержащее операционный усилитель с асимметричным питанием и специальными цепями обратной связи, сокращавшее длительность переходных процессов почти в 10 раз и позволившее увеличить частоту коммутации до 20 кГц. Получить авторское свидетельство на изобретение удалось не сразу, хотя Д. А. Усанов мгновенно оценил достоинства предложенной структуры управления. В дальнейшем СВЧ-коммутаторы использовались при коммутации поляризованных составляющих в радиополяриметрах, причем независимая работа нескольких коммутаторов обеспечивалась оптронными парами на входах. Студенты-радиофизики не только измеряли пропускание отдельных диафрагм, но и аккуратно увеличивали длины щелей в диафрагмах, добиваясь поглощения в открытом состоянии до 0.1 дБ.

Важным узлом радиометра являлись преобразователь СВЧ-сигнала в промежуточные частоты (смеситель) [7] и УПЧ с детектором. Наша копия радиометра НИРФИ позволила получить чувствительность ~ 1 К [8], которая нас не устраивала. Чтобы ослабить шумы, в радиолокации были разработаны балансные смесители на волноводно-щелевых мостах (ВЩМ) [7]. На это обратил мое внимание известный в городе специалист по радиолокации сотрудник радиоприборного завода С. Б. Гельбух. Физика ВЩМ оказалась удивительно красивой, хотя структура смесителя требовала тщательного расчета и парных смесительных диодов. Я до сих пор не понимаю, почему в радиоастрономии ВЩМ так и не прижились. С ВЩМ нам удалось повысить чувствительность радиометра до 0.3 К, что соответствовало лучшим результатам. Не менее успешным оказался УПЧ на низкошумящих транзисторах. Обладая полосой пропускания от 1 до 450 МГц, он имел высокую стабильность и коэффициент усиления 65 дБ. Достоинства УПЧ оценили сотрудники других лабораторий НИИМФ, и профессор Б. Н. Климов использовал его для проведения своих экспериментов.

Первые готовые узлы ЭПУ для радиотелескопов поступили в 1976 г., а последние – осенью 1978 г. С помощью сотрудников обсерватории и студентов детали трех ЭПУ были подняты к нам, на шестой этаж восьмого учебного корпуса, и началась подготовка и монтаж радиотелескопов. Сначала долго выбирали место расположения первого радиотелескопа. По предложению Ю. А. Склярера мы установили треногу ЭПУ близко к наружному портику корпусу так, что его хорошо было видно из ближайших окрестностей. Это понравив-



лось фотографам и корреспондентам саратовских газет, и они часто помещали свои снимки в различных изданиях. Следующая задача состояла в ориентации главной оси ЭПУ на северный полюс мира. Здесь главным действующим лицом стал сотрудник ЛАГ М. Б. Богданов. Вместе с Л. Н. Бердниковым (оба давно стали докторами наук и успешно работают в астрофизике), используя прекрасное знание звездного неба, они точно ориентировали ЭПУ и обеспечили отличное сопровождение Солнца.

Полный монтаж радиометра затянулся до апреля 1979 г. Одновременно с ВЧ-узлом радиометра началось создание УНМР. Его электрическая схема нуждалась в модернизации, и я начал проектировать и рисовать новые печатные платы генераторов сигналов модуляции, синхронного фильтра и синхронного детектора (всего 8 плат). Сборка и настройка УНМР заняла у нас более полугода. Невозможно даже назвать все трудности, возникавшие в работе, поскольку солнечный радиотелескоп создавался с нуля. Не было волноводных узлов, комплектующих и, конечно, достаточного опыта. Поэтому многочисленные ошибки были неизбежными.

В июне студенты, выезжавшие на преддипломную практику в другие обсерватории, защитили дипломные работы, и двое из них, О. В. Епифанова и В. В. Борисов, изъявили желание заниматься солнечной радиоастрономией в ЛАГ. Руководство обсерватории согласилось принять их на работу. Так сформировалась радиоастрономическая группа (рис. 2, *а*). Ю. А. Складов опять из денег, зарабатываемых на собственных хозяйственных темах, платил им зарплату в течение трех лет, пока я не получил дополнительное финансирование. Наконец, в конце июля малый радиотелескоп с двухметровой антенной (рис. 2, *б*) впервые измерил радиоизлучение Солнца, и в ЛАГ наряду с оптическими исследованиями начались регулярные солнечные радионаблюдения. Первые наблюдения позволили выявить всплески радиоизлучения, отличающиеся по величине интенсивности и длительности от результатов других солнечных станций. Коллеги из НИРФИ сразу предположили, что различие обусловлено более широкой полосой пропускания нашего радиотелескопа.



а/а



б/б

Рис. 2. Радиоастрономическая группа СГУ (*а*) и радиотелескоп с двухметровым зеркалом (*б*)
Fig. 2. SGU radio astronomy group (*a*) and the radio telescope with a two-meter antenna (*b*)

21 декабря 1979 г. областная газета «Коммунист» известила саратовцев о том, что в Саратовском университете имени Н. Г. Чернышевского вступил в строй первый в области радиотелескоп и поместила его фотографию.

Для обработки результатов ежедневных наблюдений нужны были абсолютные значения потока солнечного радиоизлучения. Калибровать

поток решили по радиоизлучению Луны. Такой метод калибровки для большинства малых радиотелескопов не применим из-за недостаточной чувствительности, но чувствительность нашего радиотелескопа оказалась достаточной. С помощью М. Б. Богданова была разработана подробная методика и проведена первая калибровка. Она оказалась удачной, так как измеренная плот-



ность потока совпала с данными, полученными другими методами. Начинаясь долгосрочная программа регулярной службы активности Солнца в радиодиапазоне, по представлению НИРФИ уже через год одобренная Астросоветом АН СССР. Радиоастрономическая группа СГУ включается в разработку радиофизических методов прогнозирования солнечной активности по плану секции «Радиоизлучение Солнца» Совета по радиоастрономии АН СССР, а руководителя группы ввели в состав Совета. Головной организацией, осуществляющей научно-методическое руководство сетью станций радиослужбы Солнца был НИРФИ, а финансирование станций осуществлял Институт прикладной геофизики АН СССР (ИПГ). В Астросовете порекомендовали обсудить возможности финансирования с директором ИПГ С. И. Авдюшиным. Я несколько раз встречался с ним, показывал наши результаты. Когда в конце 1981 г. я рассказал, что в СГУ впервые в мире создан радиополяриметр для малых радиотелескопов, это его заинтересовало, и с 1982 г. нам были выделены бюджетные ассигнования. Деньги были небольшие, но они поступали в бюджет ЛАГ и, кроме зарплаты, позволяли хоть частично компенсировать затраты на нашу группу.

Аналитический метод автоматического наведения антенн малых радиотелескопов на Солнце

В 1980 г. с увеличением длительности светового дня возникла новая проблема: пару раз антенна после заката упиралась в покрытие крыши и могла быть повреждена, если сопровождение не выключалось вовремя. Мы стали интересоваться, как аналогичные проблемы решаются в других солнечных обсерваториях, и ничего подходящего не нашли. После длительного анализа и вывода необходимых уравнений мною был предложен метод автоматического наведения радиотелескопа на Солнце в утренние часы и выключения после захода Солнца, а инженер В. В. Борисов разработал структуру комплекса. Примерно за полгода мы полностью собрали автомат и вздохнули с облегчением: после захода Солнца радиотелескоп автоматически переводился в точку восхода и выключался [9]. Было ясно, что идея аналитического наведения на Солнце и структура устройства автоматического наведения оригинальны. Заявку на изобретение пришлось защитить на экспертном совещании в Москве, так как оказалась, что она раскрывает

некие секреты военного ведомства. Нам выдали авторское свидетельство с грифом «Для служебного пользования», а разглашение структуры автомата было запрещено, хотя нашим методом управления заинтересовались многие организации. Позже впервые в отечественной практике был создан автоматический информационно-измерительный комплекс радиотелескопов, не имеющий аналогов за рубежом.

Поиск метода радиополяриметрии для малых радиотелескопов

Измерять и фиксировать вспышки солнечного радиоизлучения – интересная задача, но она уже решалась в других обсерваториях, в частности на солнечной станции «Зименки» в НИРФИ. Учитывая это, решили измерять не только поток, но и поляризацию солнечного излучения на малом радиотелескопе. Многие специалисты считали, что это невозможно.

Публикации, в которых поляризация солнечного радиоизлучения измерялась бы на малом радиотелескопе, отсутствовали. Мы первыми решили попытаться создать солнечный радиополяриметр для малого радиотелескопа. Чтобы измерять степень поляризации радиоизлучения, поляриметр должен был обладать высокой чувствительностью. Было ясно, что высокую точность измерений можно получить, вычисляя параметры Стокса в дифференциальной форме (2), так как при разложении в любом ортогональном базисе согласно (3) половины мощности неполяризованной части волны компенсировались.

Поиски преобразователей поляризации в литературе по технике СВЧ [10] привели к турникетным соединениям волноводов (ТСВ), как будто специально созданным для разностного измерения ортогонально поляризованных компонентов.

ТСВ – симметричные сочленения четырех прямоугольных волноводов с волной H_{10} , образующих крестообразное соединение в H -плоскости, и круглого волновода с волной H_{11} , перпендикулярного плоскости креста (рис. 3, а). При полном согласовании коэффициент стоячей волны (КСВ) равен 1, и отсутствию потерь ТСВ описывает матрица рассеяния [11]. Для согласования в область сочленения волноводов вводился трехэлементный поршень из двух концентрических цилиндров и штыря (см. рис. 3, а). Его размеры в литературе не приводились.

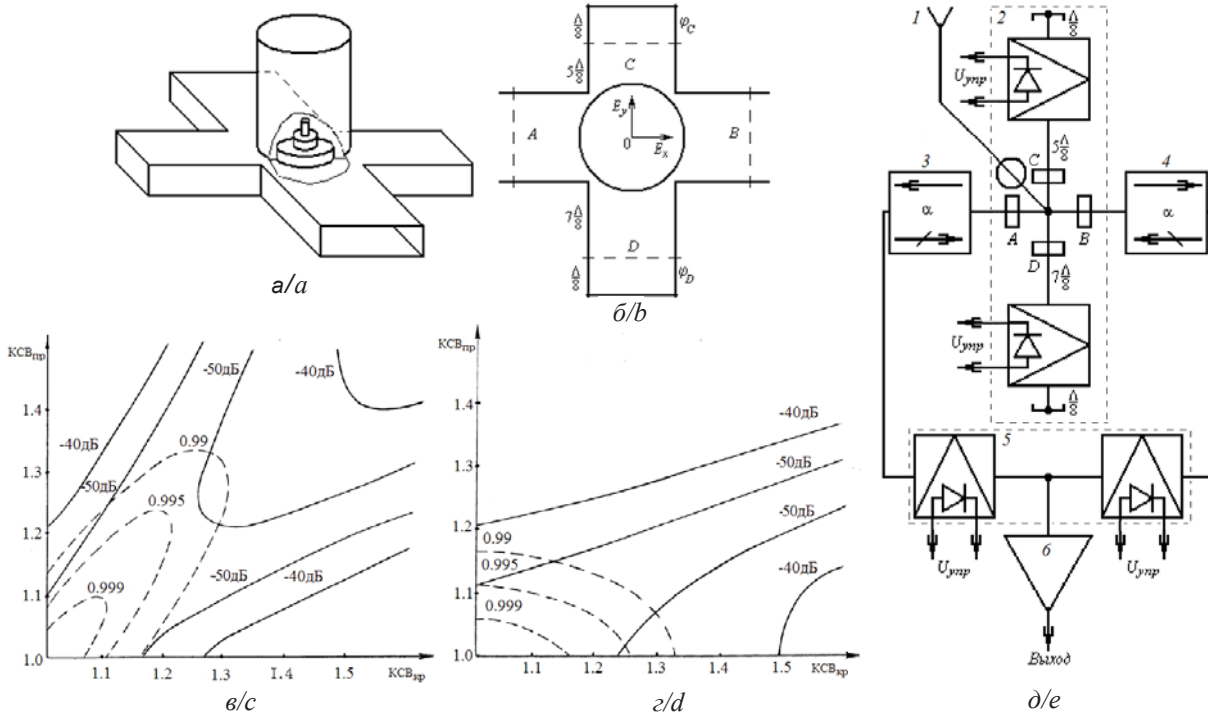


Рис. 3. Общий вид турникетного соединения волноводов с трехэлементным согласователем (а), схема соединений в разделителе поляризаций (б), зависимости поляризационных развязок выходов от коэффициента стоячей волны круглого и прямоугольных волноводов (в, з) и схема ВЧ-узла радиополяриметра (д)

Fig. 3. General view of the WTC with a three-element matching device (a), a circuit diagram of the polarization separator (b), the dependence of the polarization outputs of the outputs on the SWR of the round and rectangular waveguides (c, d) and the HF node of the radio polarimeter (e)

Расчет трехэлементных согласователей методом реберных конечных элементов сделал мой аспирант А. В. Бровко [12], который в результате исследований ТСВ и других СВЧ-систем позже защитил кандидатскую, а затем и докторскую диссертации.

Подбирая размеры согласующих элементов, удалось уменьшить коэффициенты отражения в прямоугольных и круглом волноводах, но полная компенсация отражений оказалась недостижимой, т.е. матрица рассеяния не соответствовала реальным ТСВ. Предстояло проанализировать матрицу рассеяния при конечных отражениях. Нам удалось разбить матрицу рассеяния на четыре подматрицы [13], анализ которых показал, что при определенном соотношении КСВ в круглом и прямоугольных волноводах поляризационные развязки выходов достигают -50 и даже -60 дБ, а потери мощности в ТСВ – до 0.1% (рис. 3, в и 3, з). Эксперименты на реальных ТСВ при тщательном согласовании ($КСВ < 1.1$) подтвердили развязку выходов -50 дБ, и внутренним рассогласованием можно было пренебречь.

Произвольно поляризованная волна в круглом волноводе согласованного ТСВ согласно матрице рассеяния разлагается на две линейно поляризованные в направлениях осей креста составляющие ($E_x = E_{0x}$, $E_y = E_{0y} e^{j\delta}$). Для разложения волны в других ортогональных базисах в два противоположащих прямоугольных волновода следовало вводить закорачивающие СВЧ-шлейфы с электрически управляемой длиной. Если электрические длины шлейфов φ_C и φ_D (см. рис. 3, б) отличались на $\Lambda/2$ и равны нечетному числу $\Lambda/8$ (например, $5\Lambda/8$ и $7\Lambda/8$, где Λ – длина волны в волноводе), то происходит разложение на поляризованные по кругу составляющие $E_R = \frac{\sqrt{2}}{2}(E_{0x} + jE_{0y}e^{j\delta})$, $E_L = \frac{\sqrt{2}}{2}(-E_{0x} + jE_{0y}e^{j\delta})$. Если же электрические длины φ_C и φ_D равны четному и нечетному числу $\Lambda/4$ (например, $3\Lambda/4$ и Λ), волна разлагалась на ортогональные линейно поляризованные компоненты $E_{45} = \frac{\sqrt{2}}{2}(E_{0x} + E_{0y}e^{j\delta})$,



$E_{-45} = \frac{\sqrt{2}}{2} (-E_{0x} + E_{0y} e^{j\delta})$ с позиционными углами 45° и -45° относительно осей креста. На выходах *A* и *B* появлялись E_R и E_L или E_{45} и E_{-45} по отдельности, а мощность неполяризованной компоненты делилась поровну. Из этих сигналов по формулам (2) строятся параметры Стокса *U* и *V*, а параметр Стокса *I* получается как сумма мощностей любых ортогональных составляющих.

Чтобы одновременно разложить волну в двух базисах нами было предложено и запатентовано сдвоенное ТСВ в виде соединения стандартного и проходного ТСВ, но поступающая на вход волна разлагалась неравномерно, что в радиополяриметре малого радиотелескопа было неприемлемо. Более эффективной оказалась идея поочередного (квазидновременного) разложения волны в ТСВ с периодически изменяющимся базисом, т.е. быстрая по сравнению с квазипериодом огибающих коммутация базисов разложения путем создания управляемой фазовой задержки.

Итак, используя согласованное ТСВ, предлагалось измерять параметры Стокса в дифференциальной форме, а базисы разложения быстро коммутировать волноводными диафрагмами с *n-i-p-i-n*-диодами. Такой поляриметр был назван дифференциально-коммутационным радиополяриметром (ДКРП).

Турникетный солнечный радиополяриметр и международное признание

Радиополяриметр для малых радиотелескопов не пытались создавать ни в одной обсерватории, так как усредненная по диску Солнца степень поляризации мала, а метод измерения слабо поляризованных сигналов отсутствовал. Поэтому дифференциально-коммутационный метод (ДКМ) измерения параметров Стокса, предложенный в Саратовском университете и обладающий повышенной точностью измерений, делал наши исследования уникальными. Было решено радиотелескоп с двухметровым зеркалом (РТ-2) не трогать, а солнечный радиополяриметр установить на РТ-1, заново собирая новый радиометр и новый НЧ-блок.

ВЧ-узел радиополяриметра состоял из турникетного преобразователя поляризации (ТПП), переключателя поляризаций (ПП) и модуляционного радиометра (рис. 3, *д*). Солнечное радиоизлучение, отраженное от антенны, собиралось в фокусе, где располагался рупорный облучатель *I*. Облучатель был рассчитан заново, чтобы

исключить кросс-поляризацию из-за различия диаграмм направленности в *E*- и *H*-плоскости.

К рупору подключался ТПП 2 с *n-i-p-i-n*-коммутаторами базисов разложения. Его выходы соединялись с ПП 5 через ферритовые вентили 3 и 4, защищающие ТСВ от отражений от *n-i-p-i-n*-коммутаторов, а выход ПП соединялся с радиометром 6. Антенный узел выполнялся из прямоугольных волноводов сечением $23 \times 10 \text{ мм}^2$. Его конструкция была выбрана такой, чтобы ТПП целиком оставался в тени рупорного облучателя (рис. 4, *а*). Для управления волноводно-щелевыми диафрагмами использовались три задающих генератора: самую низкую частоту имел модулятор интенсивности в радиометре, вдвое большей частотой обладали переключатели базисов разложения и, наконец, учетверенная частота потребовалась в ПП. Задающие генераторы синхронизировались. Благодаря синхронной работе СВЧ-коммутаторов на выходе ВЧ-узла поочередно формировались все ортогонально поляризованные составляющие поля, необходимые для вычисления параметров Стокса. Был разработан новый НЧ-блок с тремя генераторами опорных частот и тремя выходами, который мог записывать все параметры Стокса.



Рис. 4. Общий вид СВЧ-узла радиополяриметра

Fig. 4. General view of the microwave node of the radio polarimeter

Исследование и настройка радиополяриметра наталкивались на неожиданные трудности. Так, например, для настройки ТСВ был нужен генератор поляризованных по кругу волн. Просмотр зарубежных публикаций не дал ответа, и мы использовали один из ТСВ как преобразователь линейно поляризованного излучения в поляризованную по кругу волну. На вход поступал ЧМ-сигнал с полосой $300 \div 500 \text{ МГц}$ от панорамного измерителя КСВ, а качество полученной волны контролировалось индикаторным блоком панорамы КСВ. Вращая его вход с интервалами



$20\div 30^\circ$ удалось определить частотный диапазон, в котором амплитуда поля в круглом волноводе оставалась постоянной. Он оказался равным 200 МГц, и полосу частот УПЧ пришлось сократить до 100 МГц. Такая узкополосность радиополяриметра хорошо согласовалась с минимальным усреднением поляризации на краях частотного диапазона.

При проектировании радиополяриметра в лаборатории были созданы и подробно исследовались несколько макетов, отличающихся способами управления коммутаторами и обработки результатов измерений. Многие оригинальные идеи и технические решения были защищены авторскими свидетельствами. Совершенствовалась и методика радиофизических экспериментов.

Одновременные наблюдения на двух радиотелескопах (РТ-1 с рабочим диапазоном частот

9150 ± 100 МГц и чувствительностью 0.7 К и РТ-2 с рабочим диапазоном 8900 ± 450 МГц и чувствительностью 0.3 К) начались в марте 1981 г., а 31 июля в ЛАГ проводилось наблюдение солнечного затмения в радиодиапазоне и визуальные наблюдения моментов открытия и закрытия активных областей биноклем БМТ-110М. В момент начала затмения ($1^{\text{h}}33^{\text{m}}$ UT) Солнце находилось на высоте 1.12° над горизонтом, и антенна РТ-2 экранировалась местными предметами. Поэтому накануне оба телескопа разобрали, вручную перенесли на площадку фонаря восьмого корпуса, собрали заново и отъюстировали (рис. 5). В наблюдениях с поляриметром были получены и опубликованы [14] интересные данные покрытия корональной конденсации, групп пятен 329 + 332 и 345. На следующий день радиотелескопы были возвращены на места.



Рис. 5. О. В. Епифанова готовит радиотелескопы РТ-1 и РТ-2 к наблюдениям солнечного затмения

Fig. 5. O. V. Epifanova prepares radio telescopes RT-1 and RT-2 for observations of a solar eclipse

Радиополяризационные наблюдения в течение ряда лет позволили обнаружить более 1000 всплесков солнечного радиоизлучения, в том числе новые явления: группу из 50 всплесков, у которых в максимуме интенсивности степень поляризации минимальна, и группы всплесков со сменой знака поляризации и с «аномальным поведением круговой поляризации» (импульсное изменение степени поляризации происходило при неизменной суммарной интенсивности излучения). Это позволило построить модель,

объясняющую «аномальные всплески поляризации» образованием короткоживущих открытых конфигураций магнитного поля.

Самым значительным событием, зафиксированным комплексом из двух малых радиотелескопов, оказался мощный всплеск радиоизлучения 3 февраля 1983 г. [15].

Событие началось в $05^{\text{h}}43^{\text{m}}$ UT и длилось более 4 часов. Ход изменения плотности потока S_0 на РТ-1 и РТ-2 был идентичен и имел сложную структуру. Степень круговой поляризации $d_{\text{кр}}$



достигала 11%, а степень линейной поляризации $d_{\text{лин}}$ не превышала 0.2% (рис. 6, а). Наблюдались 2 главных максимума интенсивности: $S_0 = 3067$ с.е. (солнечных единиц) в $06^{\text{h}} 00^{\text{m}} 45^{\text{s}}$ UT и $S_0 = 7458$ с.е. в $06^{\text{h}} 06^{\text{m}} 15^{\text{s}}$ UT.

На начальной стадии, в максимуме интенсивности и в начале спада круговая поляризация была левой (L) и $d_{\text{кр}}$ изменялась от 4.5 до 10.9%, причем максимум поляризации предшествовал главному максимуму S_0 . В $6^{\text{h}} 23^{\text{m}}$ UT $d_{\text{кр}}$ приблизилась к нулю, через 8 мин стала правой (R) и начала расти с 7^{h} UT до $7^{\text{h}} 30^{\text{m}}$ UT, достигая максимума $d_{\text{кр}} = 15\%$, а затем в течение следующего часа монотонно уменьшалась до нуля. Структура всплеска свидетельствовала о существенной перестройке магнитного поля и вероятном выходе релятивистских электронов, но не могла быть расшифрована только на основе этих данных.

Комплексное исследование в различных областях спектра радиоволн (рис. 6, б) с участием сотрудников Института Земного магнетизма и распространения радиоволн АН СССР (ИЗМРАН), Сибирского ИЗМИРАН, НИРФИ и Исследовательского института астрофизики Нагойского университета [16] позволило отождествить радиовсплеск 3 февраля с двухленточной протонной вспышкой, воссоздать динамику вспышки и определить ее основные параметры. При этом самые высокочастотные данные по измерению интенсивности и изменений характера и степени поляризации были получены в СГУ и признаны важными для создания модели вспышки, так как особенно хорошо согласовывались с наблюдениями в линии H_{α} . Изменение поляризационной структуры радиоизлучения солнечного диска в целом, полученное только на радиополяриметре

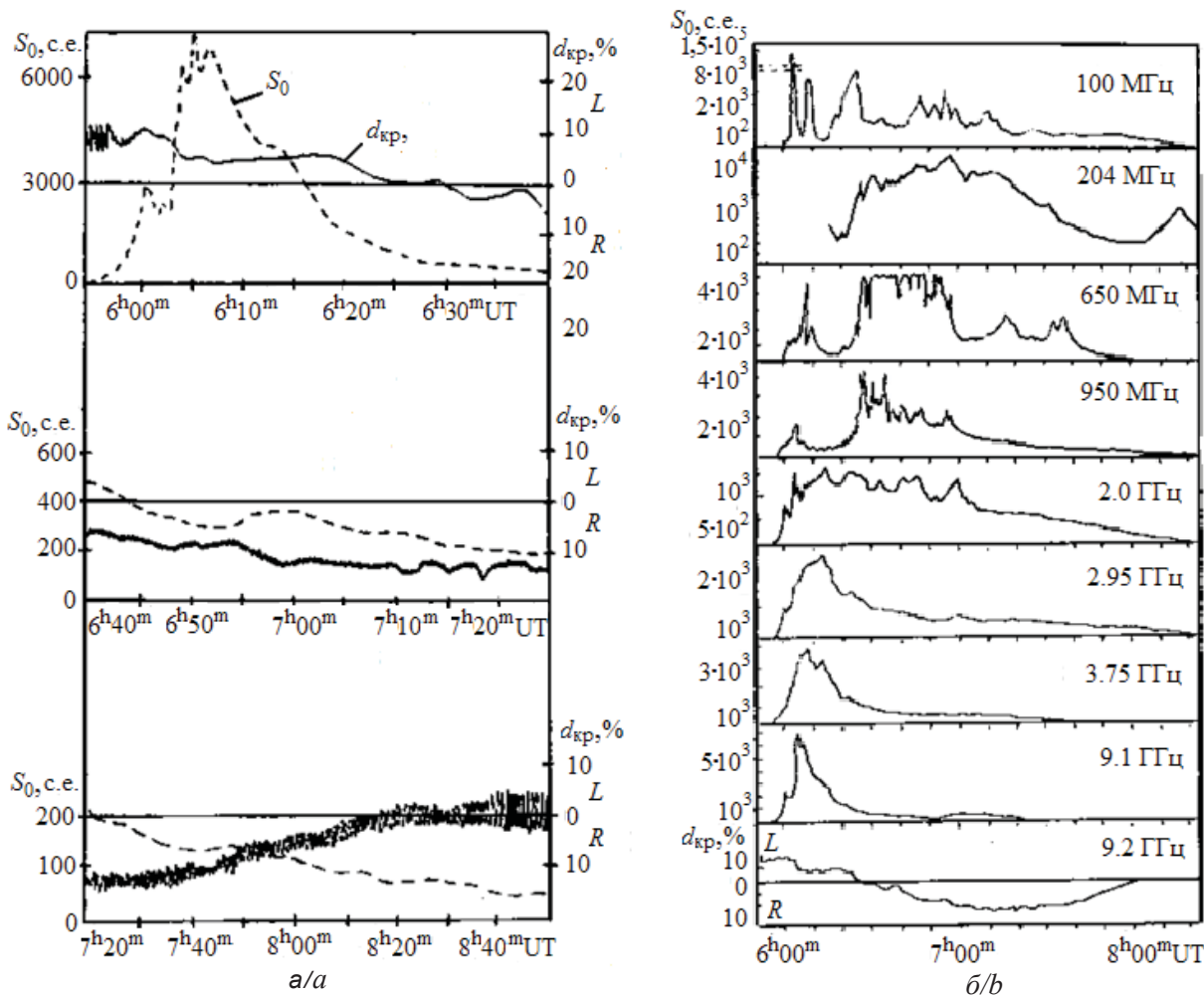


Рис. 6. Плотность потока S_0 и степень круговой поляризации, измеренные в Саратовском государственном университете (а), и временные профили комплексных исследований на 8 частотах (б) [16]

Fig. 6. The flux density S_0 and the degree of circular polarization, measured in Saratov State University (a) and time profiles of complex studies at 8 frequencies (b) [16]



РТ-1, использовалось при анализе перестройки магнитного поля, а квазипериодические колебания S_0 , зафиксированные РТ-2, по мнению астрофизиков, свидетельствовали о быстром подъеме магнитных арок. Это было первое международное признание радиополяриметрических исследований в СГУ. Малые радиотелескопы работали в нескольких обсерваториях СССР, но ни один не имел радиополяриметра.

Прецизионные дифференциально-коммутиционные радиополяриметры

Поляризационные исследования СВЧ-излучения наряду с радиоастрономией активно используются в радиоэлектронике и связи. Одновременное (или почти одновременное) измерение четырех параметров Стокса существенно увеличивает информацию об объекте и позволяет получать качественно новые результаты. Однако степень поляризации излучения природных объектов редко достигает 1–2%, так как отвечающие за поляризацию сигналы измеряются на уровне существенно большего сигнала, характеризующего неполяризованную часть волны. Успешные измерения слабо поляризованного солнечного радиоизлучения на малом радиотелескопе дифференциально-коммутиционным методом показали, что использованы еще не все возможности ДКМ. Оказалось, что чувствительность радиополяриметров только за счет подстройки СВЧ-элементов можно повысить, по крайней мере, на порядок, т.е. создать сверхточные (прецизионные) ДКРП. При этом вносить изменения в ВЧ-блок не потребовалось, но возникла необходимость изменить методику тестирования коммутаторов и учесть многократные отражения волн.

Все ДКРП – узкополосные измерительные приборы. Полоса частот радиополяриметров определяется резонансными свойствами СВЧ-элементов: короткозамкнутых плеч ТСВ, входных плеч ПП и, наконец, волноводных диафрагм *n-i-p-i-n*-коммутаторов. Их полосы пропускания различны. Минимальную полосу имеет ТСВ, так как высокая поляризационная изоляция выходных портов обеспечивается только в 2%-ной полосе частот. Остальные элементы настраиваются на резонансную частоту ТСВ. При создании прецизионного ДКРП это оказалось недостаточным. Теперь настроенные диафрагмы устанавливались в ТСВ и тестировался ТПП целиком: проверялась и подстраивалась точность переключения базисов разложения. При обнаружении погрешностей более длинный фланец ТСВ или $\Lambda/8$ -поршня

доводился до нужных размеров полировкой с абразивной пастой на притирочном столике. Аналогичные операции сопровождали настройку ПП. На следующем этапе осуществлялся контроль точности деления неполяризованной части волны. Действительно, если в отсутствие поляризованных составляющих мощности на входах коммутатора поляризаций будут различаться, то радиополяриметр отождествит эту разность с поляризованной компонентой и внесет недопустимую погрешность в измерения параметров Стокса. Подбирая пропускание ферритовых вентилях и корректируя длины соединительных волноводов, разность мощностей удавалось довести до -40 дБ, что соответствовало точности измерений 0.02%. Я специально рассказал об этих процедурах, чтобы стал понятным непростой и длительный процесс настройки и достижения высокой точности измерений.

Оставалась проблема учета многократных отражений. Так как в узлах радиополяриметра возникают взаимные отражения и появляются замкнутые контуры передачи сигналов, то матрицы рассеяния ТСВ и других СВЧ-элементов, а также поляризационные развязки выходов радиополяриметра следовало уточнить.

Используя мой опыт расчета электрических цепей с обратной связью методом С. Мэсона [17], аспирант А. В. Мясников построил сигнальный граф, вывел уравнение радиополяриметра и предложил способы минимизации погрешностей ДКРП [18]. По результатам работ А. В. Мясников и О. В. Епифанова защитили кандидатские диссертации.

За десятилетия работы радиоастрономической группы в СГУ возникло новое научное направление: изучение физики и методологии поляризационного анализа радиоволн СВЧ- и КВЧ-диапазона, их применение в солнечной радиофизике и связи. Были созданы прецизионные ДКРП различных диапазонов частот [19]. Один из радиополяриметров восьмисантиметрового диапазона использовался для прецизионных измерений степени деполяризации и настройки приемных СВЧ-модулей спутниковой системы «Москва». Со скалярным облучателем коэффициент передачи модуля увеличился с 93 до 99%, а ортогонально поляризованная компонента была ослаблена до -43 дБ.

Г. М. Герштейн постоянно следил за работой нашей группы и в 1988 г. обратился к заведующему кафедрой физики колебаний МГУ академику В. В. Мигулину с просьбой оценить результаты



наших работ по созданию в СГУ нового научного направления. Осенью 1989 г. будучи на ФПК я представил В. В. Мигулину полученные результаты, выступил по его рекомендации в лаборатории радиоастрономии ИЗМИРАН и на семинаре А. Е. Саломоновича в секторе спектроскопии ФИАН. По итогам этих выступлений с обзором наших работ состоялся научный семинар кафедры физики колебаний МГУ. Сотрудники кафедры вынесли решение, что «полученные А. В. Хохловым результаты могут рассматриваться как основа докторской диссертации», а В. В. Мигулин согласился стать официальным оппонентом, предложив использовать в качестве ведущей организации ИРЭ АН Украины. У меня не было контактов с ИРЭ АНУ, и неоценимую помощь в установлении контактов оказал заведующий кафедрой электроники СГУ Д. И. Трубецков, попросивший оказать содействие. Защита диссертации состоялась в феврале 1993 года.

Исследования в области радиополяриметрии продолжались еще около 10 лет силами аспирантов и студентов. За 25 лет исследований были опубликованы более 50 статей, сообщений и тезисов докладов на конференциях, получены 10 авторских свидетельств и патентов, подготовлены три кандидата наук.

Благодарности

Автор искренне благодарен Дмитрию Александровичу Усанову и Михаилу Борисовичу Богданову за помощь в подготовке настоящей статьи.

Список литературы

1. *Pawsey J. L., Bracewell R. N.* Radio Astronomy. Oxford : Clarendon Press, 1955. 381 p. (Russ. ed.: *Пози Дж. Л., Брейсуэлл Р. Н.* Радиоастрономия. М. : Изд-во иностр. лит., 1958. 414 с.)
2. *Steinberg J. L., Lequeux J.* Radioastronomie. Paris : Dunod, 1960. 294 p. (Russ. ed. : *Стейнберг Ж., Леку Ж.* Радиоастрономия. М. : Изд-во иностр. лит., 1963. 312 с.)
3. *Шкловский И. С.* Радиоастрономия. Популярный очерк. М. : Гостехиздат, 1953. 215 с.
4. *Шкловский И. С.* Космическое радиоизлучение. М. : Гостехиздат, 1956. 492 с.
5. *Железняков В. В.* Радиоизлучение Солнца и планет. М. : Наука, 1964. 558 с.
6. *Хохлов А. В.* Введение в радиоастрономию : учеб. пособие. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 1974. 138 с.
7. *Клич С. М.* Проектирование СВЧ устройств радиолокационных приемников. М. : Сов. радио, 1973. 320 с.
8. *Борисов В. В., Епифанова О. В., Скляр Ю. А., Хохлов А. В.* Радиотелескоп и радиометр трехсантиметрового диапазона для патрульных наблюдений активности Солнца // Вопросы электроники СВЧ. Некоторые проблемы радиофизики : междунар. науч. сб. / под ред. Г. М. Герштейна. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 1983. С. 119–126.
9. *Борисов В. В., Хохлов А. В.* Автоматическое наведение приемно-измерительных устройств на астрономические объекты // Специальная радиоэлектроника. 1990. Вып. 4. С. 58–60.
10. *Хохлов А. В., Епифанова О. В.* Разложение электромагнитной волны на ортогонально поляризованные составляющие и волноводные разделители поляризации (Обзор) // Приборы и техника эксперимента. 1991. № 3. С. 15–26.
11. *Altman J. L.* Microwave Circuits. Toronto, New York, London : Van Nostrand Inc., 1964. 462 p. (Russ. ed. : *Альтман Дж.* Устройства СВЧ. М. : Мир, 1968. 487 с.)
12. *Бровко А. В., Рожнев А. Г., Хохлов А. В.* Метод реберных конечных элементов для расчета волноводных сверхвысокочастотных многополюсников // Радиотехника и электроника. 1998. Т. 43, № 11. С. 1314–1320.
13. *Хохлов А. В., Брянцева О. В.* О внутреннем согласовании турникетных разделителей поляризации // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17, вып. 13. С. 16–20.
14. *Борисов В. В., Епифанова О. В., Хохлов А. В.* Наблюдение солнечного затмения 31 июля 1981г. в Саратове // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. М. : Наука, 1982. Вып. 62. С. 220–223.
15. *Борисов В. В., Епифанова О. В., Хохлов А. В.* Смена знака поляризации в мощном микроволновом всплеске // Астрономический циркуляр. 1983. № 1234. С. 1–3.
16. *Bakunin L. M., Ledenev V. G., Nefedev V. P., Potapov N. N., Smolkov G. Ya., Uralov A. M., Chernov G. P., Fomichev V. V., Melnikov V. P., Podstrigach T. S., Epifanova O. V., Khokhlov A. V., Enome Sh.* Spatial, spectral and polarization properties of radio emission of the 3 February, 1983 proton flare // Solar Phys. 1991. Vol. 135. P. 107–129.
17. *Mason S. J., Zimmermann H. J.* Electronic circuits, signals, and systems. New York ; London : John Wiley & Sons, Inc., 1960. 616 p. (Russ. ed. : *Мэзон С., Циммерман Г.* Электронные цепи, сигналы и системы. М. : Изд-во иностр. лит., 1963. 619 с.)
18. *Хохлов А. В., Мясников А. В.* К теории дифференциально-коммутационного радиополяриметра СВЧ // Радиотехника и электроника. 1995. Т. 40, вып. 4. С. 675–684.
19. *Хохлов А. В., Бровко А. В.* Прецизионные дифференциально-коммутационные радиополяриметры С.В.Ч.- и К.В.Ч.-диапазонов. Практические реализации и перспективы использования // Приборы и техника эксперимента. 2000. № 3. С. 88–97.

Образец для цитирования:

Хохлов А. В. Становление и развитие солнечной радиоастрономии в Саратове // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2019. Т. 19, вып. 2. С. 223–236. DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2019-19-2-223-236>



Formation and Development of Solar Radio Astronomy in Saratov

A. V. Khokhlov

Arthur V. Khokhlov, <https://orcid.org/0000-0003-0273-6473>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, hohlovav@info.sgu.ru

The article presents the memories of one of the initiators of radio-astronomy research at Saratov State University. The creation of a radio astronomical group in the laboratory of astronomy and geophysics and the development of radiophysical methods for predicting the solar activity are being discussed. The theoretical substantiation and practical implementations of the precision differential-switching microwave polarimetry method are considered. The development of two radio telescopes and a programmatic-analytical method for controlling small radio telescopes are described.

Key words: small radio telescope, sunny radio emission, splash, radio polarimetr, automatic control, differential-switching method, *n-i-p-i-n*-switch, Waveguide Turnstile Connection.

References

1. Pawsey J. L., Bracewell R. N. *Radio Astronomy*. Oxford, Clarendon Press, 1955. 381 p.
2. Steinberg J. L., Lequeux J. *Radioastronomie*. Paris, Dunod, 1960. 294 p.
3. Shklovskij I. S. *Radioastronomiya. Popularnj ocherk* [Radioastronomy. Popular essay]. Moscow, Gostekhisdat Publ., 1953. 215 p. (in Russian).
4. Shklovskij I. S. *Kosmicheskoe radioizluchenie* [Cosmic Radio Emission]. Moscow, Gostekhisdat Publ., 1956. 492 p. (in Russian).
5. Zhelesnyakov V. V. *Radioizluchenie Solnca i planet* [Radio Emission of a Sun and planets]. Moscow, Nauka Publ., 1964. 558 p. (in Russian).
6. Hohlov A. V. *Vvedenie v radioastronomiyu: ucheb. posobie* [Introduction to radio astronomy]. Saratov, Izd-vo Sarat. un-ta, 1974. 138 p. (in Russian).
7. Klich S. M. *Proektirovanie SVCH ustrojstv radiolokacionnyh priemnikov* [Design of microwave devices for radar receivers]. Moscow, Sov. Radio Publ., 1973. 320 p. (in Russian).
8. Borisov V. V., Epifanova O. V., Sklyarov Yu. A., Hohlov A. V. Radiotelescope and radiometer of the three-centimeter range for patrol observations of solar activity. In: *Voprosy elektroniki SVCH. Necotorye problemy radiofiziki*. Pod red. G. M. Gershtejna [Questions of microwave electronics. Some problems of radiophysics. International scientific collection. Ed. by G. M. Gershtejn]. Saratov, Izd-vo Sarat. un-ta, 1983, pp. 119–126 (in Russian).
9. Borisov V. V., Hohlov A. V. Automatic guidance of receiving-measuring devices on astronomical objects. *Special'naya radioelektronika* [Special Radio Electronics], 1990, vol. 4, pp. 58–60 (in Russian).
10. Hohlov A. V., Epifanova O. V. Decomposition of an electromagnetic wave into orthogonally polarized components and waveguide polarization separators (Overview). *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and Experimental Techniques], 1991, no. 3, pp. 15–26 (in Russian).
11. Altman J. L. *Microwave Circuits*. Toronto, New York, London, Van Nostrand Inc., 1964. 462 p.
12. Brovko A. V., Rozhnev A. G., Hohlov A. V. The method of finite elements for the calculation of waveguide microwave multipoles. *Radiotekhnika i elektronika* [Radio Engineering and Electronics], 1998, vol. 43, no. 11, pp. 1314–1320 (in Russian).
13. Hohlov A. V., Bryanceva O. V. On the internal coordination of the turnstile polarization dividers. *Pis'ma v ZhTF* [Letters ZhTF], 1991, vol. 17, no. 13, pp. 16–20 (in Russian).
14. Borisov V. V., Epifanova O. V., Hohlov A. V. Observation of a solar eclipse on July 31, 1981 in Saratov. *Issled. po geomagnetizmu, aeronomii i fisike Solnca* [Research on Geomagnetism, Aeronomy and Solar Physics]. Moscow, Nauka Publ., 1982, iss. 62, pp. 220–223 (in Russian).
15. Borisov V. V., Epifanova O. V., Hohlov A. V. Change of the polarization sign in a powerful microwave burst. *Astronomicheskij cirkulyar* [Astronomical tsirkulyar], 1983, no. 1234, pp. 1–3 (in Russian).
16. Bakunin L. M., Ledenev V. G., Nefedyev V. P., Potapov N. N., Smolkov G. Ya., Uralov A. M., Chernov G. P., Fomichev V. V., Melnikov V. P., Podstrigach T. S., Epifanova O. V., Khokhlov A. V., Enome Sh. Spatial, spectral and polarization properties of radio emission of the 3 February, 1983 proton flare. *Solar Phys.*, 1991, vol. 135, pp. 107–129.
17. Mason S. J., Zimmermann H. J. *Electronic circuits, signals, and systems*. New York, London, John Wiley & Sons, Inc., 1960. 616 p.
18. Hohlov A. V., Myasnikov A. V. On the theory of differential-switching microwave radiopolarimeter. *Radiotekhnika i elektronika* [Radio Engineering and Electronics], 1995, vol. 40, iss. 4, pp. 675–684 (in Russian).
19. Hohlov A. V., Brovko A. V. Precision differential-switching radio polarimeters of the S.V.CH.- i K.V.CH.-bands. *Prakticheskie realizacii i perspektivy ispol'sovaniya of use. Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and Experimental Techniques], 2000, no. 3, pp. 88–97 (in Russian).

Cite this article as:

Khokhlov A. V. Formation and Development of Solar Radio Astronomy in Saratov. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2019, vol. 19, iss. 3, pp. 223–236 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2019-19-3-223-236>