

ПЕТРОВ И ЕГО ЛАБОРАТОРИЯ "СИСТЕМЫ ПЛАНЕТНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ"

Ржига О.Н., Зайцев А.А., Захаров А.И., Каевицер В.И., Родионова Н.В.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, <http://fire.relarn.ru>
Фрязино 141190, Моск.обл., Российская Федерация

Поступила 27.08.2018

Представлена действительным членом РАЕН В.В. Колесовым

Представлены фрагменты книги сотрудников бывшей 127 лаборатории Фрязинского филиала ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН "Системы планетной радиолокации": о руководителе лаборатории Петрове Г.М., о работах 60-80-х годов прошлого века по локации планет солнечной системы, о создании атласа поверхности Венеры, о гидролокации морей.

Ключевые слова: планетная радиолокация, астрономическая единица, картографирование

УДК 621.396.967; 621.396.962



ПЕТРОВ ГЕННАДИЙ МИХАЙЛОВИЧ

(1.06.1924-2.12.2008) специалист в области радиотехники и радиолокационной астрономии, кандидат физико-математических наук, лауреат Ленинской премии, заведующий лабораторией Института радиотехники и электроники АН СССР.

Участник Великой Отечественной войны с 1942. В 1955 окончил радиотехнический факультет Московского энергетического института и начал работать в Институте радиотехники и электроники АН СССР; с 1972 – заведующий Лабораторией систем планетной радиолокации. С 1968 защитил кандидатскую диссертацию по специальности "Радиоастрономия".

Г. М. Петров – один из ведущих специалистов в области радиолокационных исследований планет, автор более 90 печатных работ. Под его руководством создан большой комплекс аппаратуры планетного радиолокатора. Его диссертационная работа посвящена определению астрономической единицы по результатам радиолокационных наблюдений Венеры, Марса

и Меркурия, выполнявшихся в Советском Союзе в 1961-1964 г. Коллективом руководимой Г.М. Петровым лаборатории выполнена обширная программа радиолокационных наблюдений планет и радиофизических исследований в космосе с помощью автоматических межпланетных станций "Марс-4, -5, -6", "Венера-9, -10, -11, -12" и искусственного спутника Луны "Луна-22".

Г.М. Петров награжден орденом "Знак Почета", медалью "За боевые заслуги" и еще пятью медалями.

--

Геннадий Михайлович родился 1 июня 1924 г. в селе Дорогорское Мезенского района Архангельской области. В 1940 г. поступил учиться в техникум. С октября 1941 г. – на строительстве укреплений под Москвой – восстанавливал разрушенные здания в Москве. Призван в РККА в августе 1942 г., курсант школы зенитно-артиллерийского полка в Москве, а с 7 ноября 1942 г. до конца войны – в составе 130-го Отдельного бронепоезда ПВО, где участвовал в боях на Южном, Западном и Юго-Западном фронтах, от Калача под Сталинградом до Перемышля в Польше. Свой боевой путь он начал наводчиком орудия и закончил командиром орудия.

В 1955 г. После окончания радиофакультета МЭИ молодой инженер Петров был направлен в Институт радиотехники и электроники АН СССР, где проработал почти полвека, с 1956 по 2004 годы. Вначале он занимался вопросами помехоустойчивости радиолокаторов и разработкой методики траекторных измерений первых спутников Земли.

Но главным делом жизни Г.М. Петрова стала радиолокационная астрономия. При его непосредственном и во многом определяющем участии создавался первый отечественный планетный радиолокатор. Этот уникальный инструмент работал в дециметровом (39 см) диапазоне радиоволн и использовал две восьмизеркальные антенны Центра дальней космической связи в Крыму под Евпаторией. Одна из антенн являлась передающей, вторая – приемной.

Очень многое тогда приходилось создавать впервые. Геннадий Михайлович разработал и создал программно-временное устройство, так называемый "хронизатор", для этого радара. Диапазон измерения времени был до того невиданным – до 10 тысяч секунд – ведь запаздывание эхо-сигналов от планет составляло десятки минут. При этом инструментальная погрешность измерений должна была быть не хуже 1 микросекунды. А ведь тогда все делалось на допотопных радиолампах и на каждый триггер требовалась отдельная лампа.

Еще более уникальный прибор – первый параллельный цифровой анализатор спектра. Он, на десятилетия опередивший свое время, был разработан Петровым и создан под его руководством.

Дело в том, что передатчик радиолокатора посылает непрерывные когерентные сигналы с периодической модуляцией частоты. Отраженные от планеты сигналы имеют линейчатый и крайне узкий спектр, и поэтому оптимальным фильтром для них является именно параллельный гармонический анализатор.

Было это в середине 60-х годов прошлого века. Анализатор имел 15 параллельных каналов с частотным разрешением от 0.25 до 16 Гц. Он был выполнен размером в полкомнаты на пальчиковых лампах, двойных триодах 6НЗП (всего 600 ламп), потреблял несколько кВт.

С помощью этого первого планетного радиолокатора успешно исследованы планеты земной группы, получены уникальные высокоточные измерения, на основе которых была кардинально уточнена Астрономическая единица. Именно эти измерения позволили "попасть" в Венеру нашим первым межпланетным станциям.

Из сообщения ТАСС от 22 апреля 1964 года: "За радиолокационные исследования планет Венера, Марс и Меркурий Ленинская премия присуждена директору ИРЭ АН СССР руководителю работы академику В.А. Котельникову, сотрудникам того же института В.М. Дубровину, М.Д. Кислику, В.А. Морозову, Г.М. Петрову, О.Н. Ржиге, А.А. Шаховскому, начальнику лаборатории ГНИИ Минсвязи СССР В.П. Минашину".

Детальный анализ многолетних рядов радиолокационной астрометрии позволил создать впоследствии высокоточную теорию движения планет.

В 1982 году Г.М. Петрову в составе коллектива авторов за цикл работ "Создание единой релятивистской теории движения внутренних планет" была присуждена Государственная премия СССР.

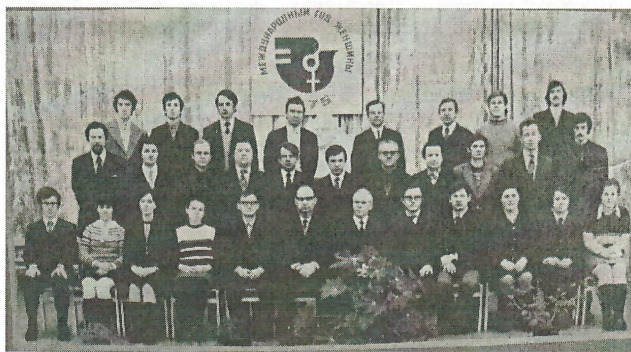
Фундаментальным вкладом Геннадия Михайловича Петрова в отечественную и мировую науку явилось и активное участие уже как заведующего созданной им лабораторией ФИРЭ РАН "Системы планетной радиолокации" в 1982-1984 годах в пионерском эксперименте по радиолокационному картографированию планеты Венера, которое выполнялось с помощью искусственных спутников "Венера-15" и "Венера-16". Немалый вклад он внес также и в создание первого в мире "Атласа планеты Венера".

Уже оставив по состоянию здоровья пост заведующего лабораторией, Геннадий Михайлович продолжал плодотворно трудиться в ФИРЭ РАН. К нему шли за квалифицированной помощью и консультациями, за мудрыми советами и воспоминаниями.

РОЖДЕНИЕ ЛАБОРАТОРИИ 127

Родилась 127 лаборатория "Системы планетной радиолокации" в 1972 году из темгруппы 127. Вся информация о сотрудниках лаб. 127 находилась в знаменитой амбарной книге, которую вел завлаб Г.М. Петров. В этой книге сохранились записи о более, чем 80 человек, работавших в то или иное время в 127 лаборатории. Сохранилась общая фотография сотрудников лаборатории, сделанная в 1975 году на сцене актового зала института.

На этой фотографии – нижний ряд (слева направо): Л.Н. Самознаев, Н.В. Родионова, Л.В. Вышлова, В.З. Суховерхова, Ю.Н. Александров, В.М. Дубровин, Г.М. Петров, В.М. Смольянинов,



Э.Г. Назаренко, Л.В. Абрамова (наша мат. ответственная), В.И. Каевицер, И.В. Турусина; средний ряд: А.С. Вышлов, А.С. Максимов, Б.И. Кузнецов, Е.А. Разумный, А.И. Сидоренко, Ю.В. Феофанов, Н.А. Савич, П.В. Чернов, В.Е. Зимов, В.К. Головков, В.А. Самовол; верхний ряд: А.В. Калинин, В.А. Иванов, А.Л. Зайцев, А.Ф. Хасянов, М.В. Сорочинский, С.М. Барабошкин, М.В. Лабутин, В.И. Чуркин.

ГРУППА ПЕТРОВА

Об основных направлениях работ группы Петрова рассказывают д.т.н. В.И. Каевицер и д.ф.-м.н. А.И. Захаров.

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАНЕТ В ИРЭ РАН

Радиолокационные исследования планет в ИРЭ РАН были начаты в 1960 году по инициативе директора института академика В.А. Котельникова. Применение радиолокационных методов в космических исследованиях, составляющие суть радиолокационной астрономии, дает новые возможности для изучения небесных тел Солнечной системы, новую информацию об их положении, движении, параметрах вращения, размерах, физических свойствах слагающих поверхность пород и многое другое. Повышенный практический интерес к развитию радиолокационных методов в интересах исследования планет в начале 1960-х годов, кроме всего прочего, был вызван необходимостью обеспечения навигации космических аппаратов в ходе планировавшихся межпланетных полетов.

Оптические наблюдения планет и Солнца, дающие измерения углового положения объектов на небесной сфере, проводились в мире на протяжении двух сотен лет. На основе этих наблюдений построены довольно совершенные теории движения планет, однако точность прогноза их положения была недостаточной для

высоких требований космонавтики. Дело в том, что точность измерения углового положения в оптических наблюдениях не превышает десятых долей угловой секунды и определяется, в основном, случайными отклонениями луча в атмосфере Земли. Из-за этого, например, ошибка измерения положения планеты Венера в картинной плоскости в момент её наибольшей близости к Земле равна 40 км. Дальность же до планеты измеряется косвенно, по измерениям положения планеты на разных участках её орбиты, и может иметь ошибку в десятки тысяч километров. Это совершенно недостаточно для межпланетных перелетов, поскольку диаметр любой из планет земной группы не превышает 12000 км.

В отличие от косвенных оптических, радиолокационные методы дают прямые измерения расстояния на основе времени прохождения радиосигнала до планеты и обратно. Кроме того, величина доплеровского сдвига частоты отраженного сигнала позволяет оценить радиальную скорость отражающего объекта, а полоса доплеровских частот - скорость вращения вокруг оси. Современные радиолокационные средства позволяют измерять дальность до планет Земной группы с точностью несколько сотен метров, а скорость - несколько сантиметров в секунду. Благодаря радиолокационным измерениям расстояния и скорости можно определять положение планет в пространстве с точностью на несколько порядков выше, чем на основе оптических наблюдений их углового положения.

Первые эксперименты по радиолокации небесных тел были проведены вскоре после войны в США и Венгрии имевшимися тогда военными радарными. Оказалось, что с их помощью возможно дотянуться только до Луны, поскольку по уровню отраженного сигнала этот спутник Земли для них сопоставим с самолетом. Для локации более удаленных объектов вроде Венеры требовалось улучшить параметры радара. Например, повысить излучаемую мощность в 10 миллионов раз, ведь мощность пришедшего к радару отраженного сигнала обратно пропорциональна четвертой степени расстояния до отражающего объекта.

Возможность радиолокации планет Солнечной системы появилась в мире только к началу 60-х годов благодаря созданию антенн с большей площадью, более мощных

передатчиков и чувствительных приемников, а также совершенствованию методов выделения сигналов из помех.

Радиолокационные исследования планет в Советском Союзе было решено проводить на базе комплекса приемных и передающих антенн АДУ-1000 приемного комплекса "Плутон" Центра дальней космической связи в Евпатории, создававшегося в то время для связи с межпланетными кораблями. Благодаря использованию готовых узлов и решений за короткое время были созданы два приемных и один передающий антенных комплекса.

Антенные системы этих комплексов состоят из 8 дюралевых параболических антенн диаметром 16 м, прикрепленных в виде решетки к корпусу дизельной подводной лодки, закрепленной на ферме железнодорожного моста, которая, в свою очередь, покоится на опорно-поворотном устройстве от орудийной башни главного калибра линкора (см. рис. 16, ст.2 этого выпуска).

Построенные всего за один год, эти антенны обеспечивали исследования дальнего космоса в Советском Союзе до конца 1970-х годов, когда была введена в строй система РТ-70 с 70-метровой антенной (рис. 2, ст. 2 этого выпуска).

О первых радиолокационных контактах с Венерой за рубежом сообщалось ещё в 1958 году, но позднее было установлено, что за эхо-сигнал от Венеры был принят шумовой выброс. Надежная регистрация отраженного Венерой сигнала была выполнена в начале 1961 года в момент нижнего соединения практически одновременно в США, Советском Союзе и Англии, когда дальность до планеты была около 40 млн км.

Отечественный радиолокатор работал на частоте 768 МГц, плотность потока мощности была 250 МВт на стерадиан, так что на всю видимую поверхность Венеры попадало 15 Вт. Излучаемый сигнал имел вид телеграфных посылок и пауз длительностью 128 или 64 мсек (амплитудная модуляция). Использовался также сигнал в виде чередующихся телеграфных посылок на двух частотах, смещенных на 420 кГц, каждая длительностью по 64 мсек (частотная модуляция). В частоты несущей сигнала и его манипуляции вводились поправки на смещение из-за эффекта Доплера, вызванного изменением расстояния между Землей и Венерой, а также вращением Земли. Передача велась сеансами

в течение времени прохождения сигнала до планеты и обратно. Управление сеансом велось с помощью специально разработанного высокоточного хронизатора. Для обеспечения возможности детального анализа данных радиолокации с перебором различных алгоритмов обработки была реализована магнитная запись принятого сигнала. Анализ эхо-сигнала выполнялся с помощью анализатора, представлявшего собой линейку фильтров.

В результате серии наблюдений с 18 по 26 апреля 1961 года были проведены измерения дальности до Венеры, позволившие существенно уточнить значение астрономической единицы (расстояние от Земли до Солнца). Точное знание астрономической единицы – расстояние от Земли до Солнца – важно потому, что в астрономии через эту единицу определяются все другие расстояния. Если до радиолокационных наблюдений наиболее достоверным считалось значение астрономической единицы 149527000 ± 10000 км, полученное по оптическим наблюдениям за малой планетой Эрос, то после первых же радиолокационных наблюдений оказалось, что она равна 149599300 ± 2000 км, что на 73 тысячи км больше, чем считалось в астрономии.

В июне 1962 года, после модернизации аппаратуры комплекса, заключавшейся в использовании более чувствительной приемной аппаратуры (использован парамагнитный усилитель на охлаждаемом гелием кристалле рубина на входе приемника, что дало повышение чувствительности в 6 раз), была впервые в мире проведена радиолокация планеты Меркурий. Излучаемый сигнал состоял из чередующихся посылок на двух частотах, отличавшихся на 62.5 Гц. Длительность посылок и пауз на каждой частоте составляла 1024 мсек. Оценки астрономической единицы, проведенные по измерениям дальности до Меркурия, находились в хорошем соответствии с оценками, полученными при радиолокации Венеры. Благодаря калибровке чувствительности приемной аппаратуры по излучению внеземного радиисточника Кассиопея А, был измерен коэффициент отражения поверхности Меркурия, равный 3-7%. Подобные измерения в США были проведены годом позже.

Осенью 1962 года была повторена радиолокация Венеры. В этих работах впервые

для измерения дальности до планеты был впервые использован сигнал с периодической линейной частотной модуляцией (в США в последующие годы использовался сигнал с фазокодовой манипуляцией), причем в параметры модуляции вводились поправки для компенсации изменения частоты из-за эффекта Доплера, вызываемого движением Венеры и Земли. Благодаря совершенствованию аппаратуры и методов формирования и обработки сигналов, измерения дальности до планеты, получавшиеся в каждом отдельном сеансе, имели ошибку менее 15 км. Коэффициент отражения Венеры оказался равным 12-18%, а по уширению спектра отраженного сигнала было установлено, что Венера вращается вокруг своей оси в обратную сторону по сравнению с Землей и с очень малой скоростью: один оборот за 200-300 суток. В оптических наблюдениях этого не удавалось сделать из-за непрозрачного мощного облачного покрова планеты. Повышение потенциала радиолокатора в этих работах позволило провести забавный эксперимент по радиотелеграфной связи с использованием Венеры как ретранслятора. Радиотелеграфным кодом в направлении Венеры были переданы слова "МИР", "СССР", "ЛЕНИН". Пройдя общее расстояние 85 млн км, сигнал был принят на Земле (см фрагмент записи сигнала на **рис. 2**).

В первой половине февраля 1963 года, в момент противостояния, была впервые проведена радиолокация Марса. Общие параметры радиолокатора были такие же, как и в сеансах радиолокации Меркурия, также был использован сигнал в виде чередующихся прямоугольных импульсов с различной частотой. Отраженный сигнал был надежно обнаружен в 48 сеансах в ночь с 7 на 8 февраля и с 8 на 9 февраля. Коэффициент отражения на различных участках Марса оказался меньше, чем у Венеры, но временами достигал 15%.

В сентябре-октябре того же года, благодаря дальнейшему повышению чувствительности

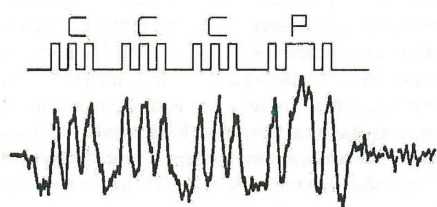


Рис. 2. Слово "СССР", переданное телеграфным кодом и отразившееся от Венеры 24 ноября 1962 г.

радиолокатора, удалось получить отражения от Юпитера в момент, когда он находился на расстоянии 600 млн км от Земли. Отраженный сигнал был настолько слаб, что для его обнаружения пришлось проводить накопление энергии в течение 20 часов. Коэффициент отражения оказался равным 10%. Проведенные в то же время в США попытки радиолокации Юпитера результатов не дали.

Пионерские работы по радиолокации планет были высоко оценены – группа сотрудников ИРЭ РАН во главе с академиком В.А. Котельниковым получила в 1964 году Ленинскую премию (В.М. Дубровин, В.А. Морозов, Г.М. Петров, О.И. Ржига, А.М. Шаховской).

В январе-феврале 1966 года были проведены совместные с английской обсерваторией Джодрелл-Бэнк радиолокационные наблюдения Венеры, в которых излучаемый из Евпатории монохроматический сигнал после отражения от Венеры принимался большим радиотелескопом в Англии. Записанные на магнитную ленту сигналы оцифровывались и анализировались в ФИРЭ РАН. За счет разнесения пунктов передачи и приема было увеличено время накопления сигнала и улучшен потенциал такой радиолокационной системы. Обработанные на ЭВМ в ИРЭ РАН данные позволили выявить аномалии отражательных свойств поверхности, уточнить ориентацию оси вращения планеты и период её вращения.

Радиолокационные наблюдения планет в ИРЭ РАН регулярно проводились и в последующие годы. Дальнейшее улучшение параметров аппаратуры и совершенствование методов обработки привели к повышению чувствительности планетного радиолокатора в среднем в 70 раз. Это позволило, например, повысить точность измерений дальности до Венеры от 1000 км в 1961 году до 0.3 км в 1978 году, а её радиальной скорости от 40 см/с в 1961 году до 0.8 см/с в 1978 году.

В 1978 году в Евпатории был построен уникальный радиотелескоп РТ-70 с диаметром зеркала 70 метров, один из крупнейших в мире. Новая антенна, более мощные передатчики и малошумящие приемные устройства увеличили потенциал планетного радиолокатора в 50 раз, что ещё более расширило возможности радиолокационных наблюдений. С помощью

этого радиолокатора в феврале-апреле 1980 года проводились наблюдения Меркурия, Венеры и Марса на больших участках орбиты этих планет: 139° дуги орбиты в районе нижнего соединения для Меркурия, 82° дуги орбиты в районе максимальной элонгации для Венеры и 29° дуги орбиты в районе противостояния для Марса. Длительные радиолокационные наблюдения 1980 года позволили получить детальные профили высот поверхности в подлокаторной точке и уточнить имевшиеся данные о рельефе планет.

Накопление фактического измерительного материала на интервале времени с 1961 по 1980 год дало возможность приступить к созданию новой теории движения планет. Единая релятивистская теория движения планет Земля, Венера, Марс и Меркурий, созданная ИРЭ РАН в сотрудничестве с рядом других организаций на основе отечественного и зарубежного радиолокационного и оптического измерительного материала, дала возможность прогнозировать их взаимное положение в 50-100 раз точнее прогноза по классической теории движения планет. Отклонения измеренных расстояний до планет от рассчитанных по единой теории их движения не превышают значений: для Венеры – 0.9 км за 1970-1980 гг.; для Марса – 2.5 км за 1967-1980 гг.; Меркурия – 2.0 км в 1980 г.

За цикл работ по созданию единой релятивистской теории движения планет группа советских ученых в 1982 году удостоена Государственной премии СССР. В числе награжденных – сотрудники ИРЭ РАН: академик В.А. Котельников и заведующий лабораторией радиолокационных исследований планет ФИРЭ РАН Г.М. Петров.

Высокая точность созданной теории движения планет сделала ненужными на некоторый период времени радиолокационные наблюдения. В результате последовавших вскоре социально-экономических преобразований в обществе и связанных с ними проблем с финансированием этот период затянулся до наших дней. Новые отечественные планы исследования космического пространства приводят в настоящее время к необходимости возобновления радиолокационных наблюдений планет и уточнения параметров их движения.

РАДИОЛОКАЦИОННОЕ КАРТИРОВАНИЕ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ ПЛАНЕТЫ ВЕНЕРА КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ ВЕНЕРА-15 И ВЕНЕРА-16

Радиолокационные исследования планет с Земли ограничены по детальности измерений и исследуемой площади планеты. Профили высот поверхности измеряются вдоль траектории перемещения подлокаторной точки по поверхности планеты. Этой же траекторией, как правило, ограничен профиль измерений отражательных характеристик поверхности. Наиболее результативный эксперимент по картированию планеты Венера с Земли был проведен из Аресибо (Пуэрто-Рико), с помощью уникального радиолокатора с диаметром зеркала 300 м. В этом эксперименте с помощью радиоволн удалось приоткрыть облачную завесу Венеры и увидеть ее поверхность. Было построено радиолокационное изображение небольшого участка на поверхности Венеры (см. фрагмент изображения области гор Максвелла с разрешением около 10 км на **рис. 3**). На этом рисунке более светлым фоном передана система хребтов гор Максвелла, имеющая повышенный коэффициент отражения на фоне более радиотемных гладких лавовых равнин. Двойная кольцевая структура в правой части горного массива - патера Клеопатра диаметром 100 км.

К 1980 году наиболее подробной картой поверхности Венеры была карта высот планеты в пределах от 60° ю.ш. до 75° с.ш., построенная с помощью высотомера американского космического аппарата "Пионер-Венера". Несмотря на сравнительно большой шаг измерений по поверхности ~ 50 -150 км, на этой карте выявляются детали континентального масштаба – Земля Иштар, Земля Афродиты, Область Бета и др. Более мелкие детали – хребты,

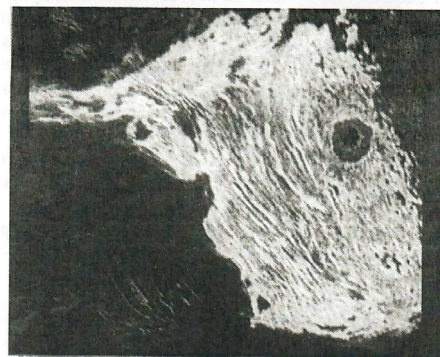


Рис. 3. Радиолокационное изображение области гор Максвелла, полученное радиолокатором в Аресибо.

рифтовые долины, ударные кратеры оказались не видны. Между тем, отсутствие таких деталей не позволяло судить о возрасте поверхности планеты, о геологической активности Венеры.

Для получения более детальной и важной для геологов информации в Советском Союзе был организован эксперимент по радиолокационному картированию этой планеты с борта космических аппаратов Венера-15 и Венера-16 – выполненный в 1983-1984 годах советскими учеными и заслуженно являющийся достижением мирового уровня. Впервые в мире с борта космических аппаратов была выполнена детальная радиолокационная съемка поверхности планеты, закрытой плотной атмосферой, недоступной для наблюдений в оптическом диапазоне. Площадь отснятой территории, расположенной севернее 30° с.ш., равна 115 млн км², что составляет четверть всей поверхности Венеры и лишь на треть меньше территории земной суши.

Успешное проведение эксперимента стало возможно благодаря тесной кооперации отечественных организаций, таких, как НИЦ имени Г.Н. Бабакина (искусственные спутники серии "Венера" управление спутниками в ходе эксперимента), ОКБ МЭИ (бортовая радиолокационная система), НИИ КП (разработка радиолинии, приём информации в Центре дальней космической связи в Крыму), ИПМ им. М.В. Келдыша (обработка траекторных измерений), ЦНИИГАиК (математические основы картографического обеспечения, подготовка карт), ГЕОХИ им. В.И. Вернадского (геолого-морфологический анализ). Идея проведения эксперимента и его научно-методическая основа разработана в ИРЭ РАН. Во Фрязинском филиале ИРЭ РАН был создан компьютерный центр, проведена вся обработка полученного материала и созданы цифровые карты Венеры. Необходимо отметить, что вся аппаратура, использовавшаяся при проведении работ в космосе и на Земле, была создана в Советском Союзе.

Радиолокатор с синтезированной апертурой с углом обзора 10° , установленный на борту космического аппарата, обеспечивал съемку полосы изображения поверхности сбоку по ходу движения с пространственным разрешением 1-2 км. Радиовысотомер-профилограф проводил измерения высот поверхности в надире.

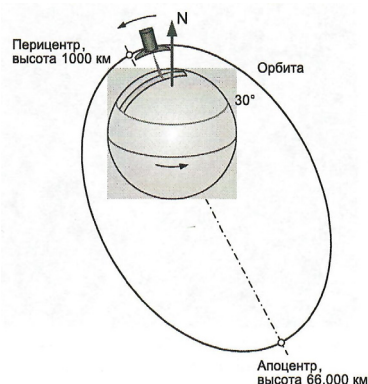


Рис. 4. Схема съемки полярной области Венеры с борта космического аппарата Венера-15/16.

Схема проведения измерений показана на рис. 4. Космический аппарат, находящийся на эллиптической орбите с периодом обращения в одни сутки, проводил в районе перигелия съемку полосы радиолокационного изображения поверхности шириной 150 км и длиной 7000 км. В районе апоцентра происходил сброс полученной информации по радиолинии на Землю. Отметим, что в качестве устройства приема информации на Земле использовался радиотелескоп РТ-70 в Евпатории. За время между последовательными съемками Венера проворачивалась относительно плоскости орбиты аппарата, чем обеспечивалось наращивание снимаемой области. Применение сложных зондирующих сигналов и метода синтеза апертуры дало относительно высокое пространственное разрешение на изображениях.

Достигнутое разрешение 1-2 км оказалось достаточным для открытия всех основных геологических структур, характерных только для Венеры (тессеры, арахноиды, венцы, лавовые равнины и купола и др.), и проведения достаточно детального геолого-морфологического анализа. Обнаружено более 100 ударных кратеров размерами от 8 до 146 км, плотность их размещения по планете позволила оценить возраст окружающей поверхности. Бортовой радиовысотомер разработки ОКБ МЭИ давал измерения высоты рельефа с точностью около 30 м по высоте, по которым была построена топографическая карта исследованной территории.

На рис. 5 показан пример изображения на район стыка плато Лакшми (лавовая равнинная поверхность слева внизу) и гор Максвелла со 100-километровой патерой Клеопатры (вверху



Рис. 5. Пример радиолокационного изображения района гор Максвелла.

(справа). В центре этой необычной патеры километровой глубины, находящейся на восточном склоне гор Максвелла, хорошо виден второй провал глубиной в 1 км (см. совмещенное изображение поверхности и профиль высот на рис. 6). По мнению геологов, внутренний провал является не следствием удара метеорита, а результатом обрушения дна патеры. В середине изображения на рис. 6 находится и самая высокая точка поверхности на Венере – пик высотой 11.5 км над средней сферой, что выше самого высокого горного пика на Земле.

В результате эксперимента были не только получены первые детальные карты поверхности, но и выявлены основные формы геологического строения Венеры. Было установлено, что близкая к Земле по размерам и удаленности от Солнца соседняя планета живет своей геологической жизнью. Например, на ней нет такого важного для формирования и обновления земной коры механизма, как тектоника плит, а процессы эрозии поверхности крайне медленны, что сохраняет детали рельефа неизменными в течение миллионов лет.

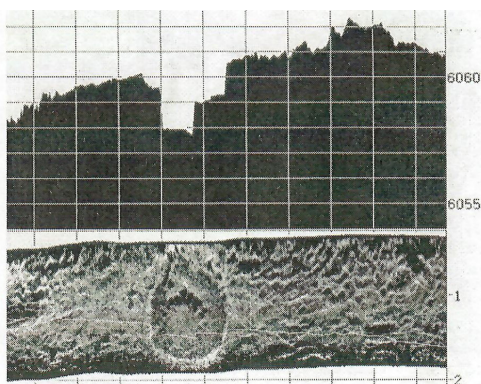


Рис. 6. Фрагмент полосы изображения и профиля высот патеры Клеопатра. Белой линией на изображении показано положение трассы измерений высот.

Полученные в Советском Союзе результаты радиолокационного картирования Венеры широко анализировались мировой научной общественностью, использовались при подготовке американского космического эксперимента "Магеллан" по глобальному радиолокационному картированию поверхности Венеры, проведенного через 8 лет после нашего эксперимента. Несмотря на глобальность полученных "Магелланом" радиолокационных изображений и на порядок большее пространственное разрешение, основные геологические открытия на Венере были сделаны по данным советских аппаратов "Венера-15" и "Венера-16".

За работы по радиолокационному картированию Венеры в 1985 году молодые сотрудники ФИРЭ РАН были удостоены Премии Ленинского комсомола (Захаров А.И., Зимов В.Е., Синило В.П., Шубин В.А.). Основные идеологи и исполнители работ ФИРЭ РАН были награждены в 1986 году Ленинской премией (Александров Ю.Н., Сидоренко А.И.) и Государственными премиями в 1986 году (Ржига О.Н.), в 1989 году (Загородний С.Ф., Захаров А.И., Крымов А.А.).

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ МОРСКОГО ДНА ГИДРОЛОКАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ СО СЛОЖНЫМИ ЗОНДИРУЮЩИМИ СИГНАЛАМИ

Опыт радиолокационных исследований планет в ИРЭ РАН позволил создать новое направление работ – дистанционное картирование протяженных объектов с помощью высокоэнергетических зондирующих сигналов и цифровых методов когерентной обработки эхо-сигналов. Цифровые методы синтеза и обработки сигналов, используемые при локации Земли и планет, в конце семидесятых годов были предложены в ФИРЭ РАН для создания нового поколения гидролокационных систем площадного картирования морского дна. Проблема дистанционных исследований морского дна и донных отложений дистанционными методами связана с тем, что только акустические волны распространяются в воде с малым затуханием. При этом, чем ниже частота колебаний, тем меньше затухание. Вторая особенность – это скорость распространения около 1500 м/сек., которая по трассе распространения может

изменяться в пределах нескольких процентов. И третья проблема – сохранение когерентности зондирующего сигнала при распространении и рассеянии на неоднородностях. В связи с этим методы радиовидения, развитые в радиодиапазоне, не могут быть прямым образом использованы при акустическом видении, требуются дополнительные исследования и технические разработки. Первые акустические системы – гидролокаторы бокового обзора, эхолоты и профилографы, разработанные в 60-е годы, излучали тональные импульсные посылки в диапазоне частот 3-500 кГц. При этом на низких частотах системы обеспечивали большие – несколько км дальности зондирования, но с малым разрешением по дальности из-за узкополосности акустических излучателей – около 10% от излучаемой частоты. Высокочастотные системы позволяют получить высокое разрешение до 5 см, но на дальностях до 50-100 м. Увеличение дальности действия гидролокационных систем за счет увеличения излучаемой мощности ограничивается кавитацией на поверхности излучателя. Противоречие снимается при применении сложных зондирующих сигналов с большой базой и корреляционной обработки эхо-сигналов. Однако реализация этого метода подразумевает сохранение когерентности сигнала при распространении и рассеянии, что отрицательно воспринималось морскими акустиком к началу наших работ.

Это были годы обнаружения на дне океана богатых запасов руд ценных металлов. Задача оценки запасов руды железомарганцевых конкреций предполагалась быть решенной с помощью гидролокации по мощности отраженных акустических сигналов. Для этих целей в Институте океанологии им П.П. Ширшова был разработан гидролокатор бокового обзора дальнего действия диапазона 6 кГц, использовавший традиционный в те годы тональный импульс, однако ограниченный энергетический потенциал обеспечивал дальность действия прибора до 6 км. Поскольку залежи железо марганцевых руд находятся на глубинах более 5000 м, эффективность прибора, испытанного во втором рейсе НИС "Академик Келдыш", оказалась невысокой, сравнимой с эхолотным промером. Однако удалось подтвердить существенное увеличение уровня

эхо-сигналов при рассеянии от рудных участков на донной поверхности. К этому времени в ФИРЭ РАН под руководством Каевичера В.И. был создан и испытан совместно с НИПИ "Океангеофизика" в г. Геленджике экспериментальный образец гидролокатора бокового обзора с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) зондирующего сигнала. Результаты работы позволили за короткое время модернизировать ГБО дальнего действия ИОРАН, увеличив его энергетический потенциал более, чем в 100 раз за счет применения сигнала с ЛЧМ и цифровой корреляционной обработки эхо-сигналов. Прибор был испытан в четвертом рейсе НИС "Академик Келдыш" в Тихом океане и шестом рейсе в Индийском океане. Экспериментальный гидролокатор имел обзор на один борт, при этом на глубинах 5-7 км обеспечивалась полоса картирования 12-15 км с детальностью около 5 м. В результате была разработана методика обнаружения и измерения продуктивности полей ЖМК.

Проведенные эксперименты подтвердили важные преимущества наших разработок в сравнении с традиционными гидролокаторами, использующими тональные зондирующие импульсы. Это увеличение энергетического потенциала и разрешающей способности, увеличение помехозащищенности и связанной с этим электрической и акустической совместимостью различных приборов, увеличение возможности автоматизации гидролокационных систем различного назначения.

Для создания промышленного образца ГБО дальнего действия в ФИРЭ РАН в середине 80-х годов была создана лаборатория, которая по заданию Мингео СССР разработала и совместно с НИПИ "Океангеофизика" создала буксируемый гидролокатор бокового обзора дальнего действия "Океан-Д", работающий в диапазоне частот 10 кГц и обеспечивающий полосу съёмки акустического изображения морского дна на глубинах до 6 км в полосе 30 км. Прибор был выпущен малой серией и широко использовался для разведки рудных образований на морском дне в НПО "Южморгеология". Работы, проводимые в ФИРЭ РАН, были поддержаны Главным управлением навигации и океанографии (ГУНИО МО СССР) и ГКНТ СССР (Миннауки). В результате в ФИРЭ РАН

были разработаны и испытаны несколько гидроакустических систем на новых принципах, использующих зондирующие сигналы большой длительности с внутримпульсной модуляцией и корреляционную систему цифровой обработки эхосигналов. К ним относятся: набортные гидроакустические комплексы площадной съемки рельефа и грунта морского дна – АГКПС-200 (80 кГц) и "Коралл"-300 (80-240 кГц), буксируемые АГКПС-1500 (30 кГц) и АГКПС-5000 (12 кГц), высокочастотный гидролокатор "Кедр" (400 кГц, набортный и буксируемый варианты), профилографы (5-15 кГц, набортный или буксируемый (последний в едином модуле с ГБО "Кедр"). Во всех системах используются цифровые методы формирования и обработки сигналов, применяются ЛЧМ зондирующие сигналы (производится соответствующая корреляционная обработка, согласованная фильтрация принятого сигнала, а в АГКПС-200/1500/5000 и "Коралл"-300 и фазовая обработка). Комплекс АГКПС 1500 во время испытаний позволил обнаружить затонувшую подводную лодку «Курск», определить точные координаты носовой и кормовой частей. Системы построены по модульному принципу и при работе могут комбинироваться в различных сочетаниях. Навигационные данные поступают в комплексы с любого спутникового приемника и цифровых датчиков определения пространственного положения. За рубежом подобные разработки появились только в середине 90-х годов.

В настоящее время акустические гидролокационные системы когерентного зондирования стали основным инструментом дистанционных измерений рельефа морского дна и структуры донных отложений. Для одновременных измерений рельефа и получения акустических изображений донной поверхности к настоящему времени сформировались два основных, в некоторой степени конкурирующих, класса систем – это интерферометрические гидролокаторы бокового обзора и многолучевые эхолоты. Если в состав обзорного ГБО входит обычно одна антенна на борт, интерферометрического ГБО – две, три, то многолучевые эхолоты представляют собой более сложный комплекс, состоящий из значительно большего числа

приемных элементов порядка 100 и выше. Для изучения подповерхностной структуры морского дна используются низкочастотные акустические профилографы. Это, как правило, одноканальные системы, обеспечивающие непрерывное профилирование грунта вдоль трассы движения судна.

Локационные методы бокового обзора основаны на последовательном формировании данных о морском дне при движении судна (рис. 7).

Импульс, излученный передающей антенной, последовательно отражается от отдельных элементов дна на разной дальности. Отраженные эхо-сигналы принимаются одной или несколькими приемными антеннами. Цикл, состоящий из передачи и приема, образует одну реализацию (одну горизонтальную строку акустического изображения). Совокупность последовательных реализаций, сформированных при движении судна, содержит информацию об отражательных характеристиках морского дна в полосе обзора и представляет собой акустическое изображение дна – аналог оптического и радиолокационного изображений. Такие изображения предназначены для визуализации и классификации объектов. Полоса обзора определяется диаграммой направленности приемных элементов, энергетическими характеристиками, формой рельефа морского дна, задается обычно в глубинах H_0 "под собой" и составляет 4-10 H_0 . Использование антенн с узкими диаграммами направленности в боковом направлении обеспечивает определенную двухмерность измерений в плоскости бокового обзора. Морское дно рассматривается как

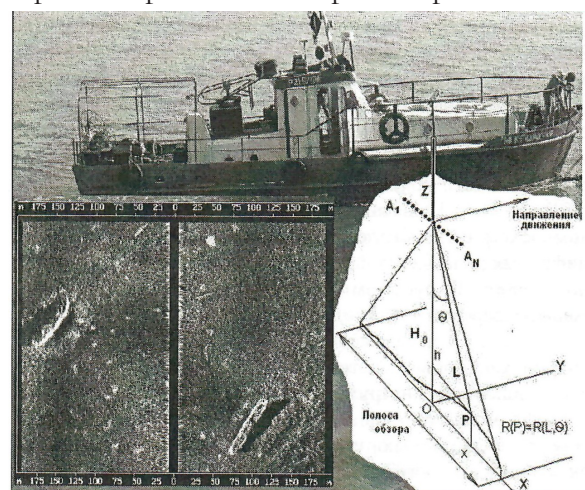


Рис. 7. Геометрия бокового обзора и фрагмент получаемого акустического изображения дна с затонувшими судами.

пространственная среда с коэффициентом обратного рассеяния, зависящим от дальности L и угла θ между вертикалью и направлением прихода в плоскости бокового обзора $R = R(L, \theta)$.

Задачей обработки является оценка коэффициента отражения $R(u, \tau)$ по совокупности измерений $Z_n(t)$ и последующего определения параметров морского дна. В зависимости от количества приемных антенн в разных системах используются различные методы оценки коэффициента отражения R и параметров морского дна, а также различные ограничения на предполагаемую форму рельефа морского дна.

Зависимость модуля коэффициента отражения R от дальности служит основой для построения карт акустического изображения дна. Отсутствие угловой избирательности в одноканальных обзорных ГБО не является препятствием при использовании этого класса систем для исследования относительно плоских районов морского дна, поиска малоразмерных предметов, деталей рельефа типа борозд, траншей, камней. Обычно обзорный ГБО представляют собой одноканальный гидролокатор правого и левого борта, с независимыми приемопередающими антеннами, имеющими узкую (около 1°) диаграмму направленности вдоль линии движения носителя и, как правило, цифровую систему формирования, обработки и регистрации сигналов. Тип излучаемых импульсов – тональные и ЛЧМ посылаки. Рабочие частоты от 10 до 500 кГц. В тональном режиме длительность импульса составляет доли миллисекунд, в ЛЧМ режиме достигает нескольких секунд. Для вычисления глубин в полосе съемки используются интерферометрические методы. Для анализа рельефа дна в полосе съемки в комплекс интерферометрического ГБО включают дополнительные приемные каналы с набором антенн в вертикальной плоскости. Обработка сигналов в интерферометрическом ГБО основана на вычислении угла прихода и осуществляется путем измерения фазы Ψ комплексно-сопряженного произведения пары отсчетов двух каналов (интерферометра).

Одним из одноканальных приборов, где ЛЧМ сигналы широко используются для повышения энергетического потенциала, являются акустические линейные профилографы.

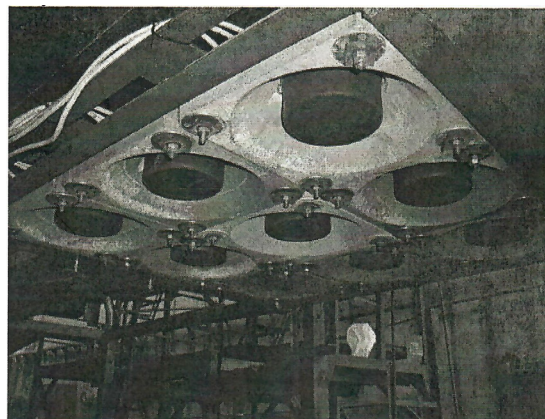


Рис. 8. Акустическая антенна эхолота-профилографа.

Многолетний опыт использования низкочастотного профилографа с ЛЧМ зондирующими сигналами, разработанного в ИРЭ РАН, подтвердил его высокие эксплуатационные возможности и позволил выявить некоторые особенности интерпретации получаемых результатов. Рабочая частота профилографа 5 кГц, полоса частот порядка 4 кГц, излучаемая мощность порядка 3 кВт. В состав профилографа входит: девятиэлементная антенная система (рис. 8), электронная система формирования зондирующих посылок (цифровой синтезатор), излучатель мощности, интерфейс ввода информации в РС. Прибор содержит цифровую систему сбора, отображения и обработки данных. Предназначен для обследования рельефа дна и донных отложений на глубинах от 20 м до 3000 м. Программы сбора данных обеспечивают когерентный ввод эхо сигналов, ввод навигационной информации с датчиков GPS и пространственного положения судна, отображение информации в реальном времени и архивирование полученных данных.

На рис. 9 приведен фрагмент профилирования морского дна в Чукотском

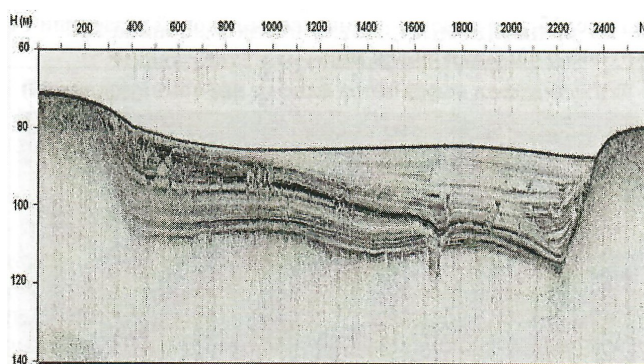


Рис. 9. Фрагмент профилирования морского дна в Чукотском море.

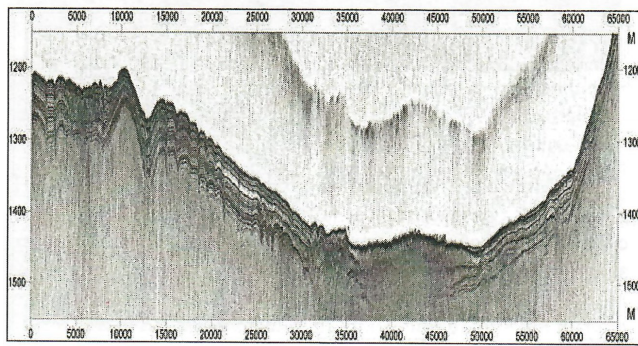


Рис. 10. Фрагмент профилирования морского дна в Японском море.

условиях Чукотского моря. Глубина примерно 70 метров. Результат профилирования показывает высокую помехозащищенность прибора, позволившую реализовать высокое разрешение донных отложений. Приведенный фрагмент интересен еще и тем, что хорошо видна впадина, заполненная осадками. Такой вид вполне могло иметь русло древней реки после опускания суши и наступлении моря. Высокий энергетический потенциал при применении ЛЧМ зондирующих сигналов позволяет производить профилирование донных отложений при больших глубинах моря. На рис. 10 показан результат профилирования с борта судна в Японском море на глубинах в диапазоне от 1200 м до 1400 м. Район характеризуется изменяющимся рельефом с толстым слоем пластичных отложений. Первое отражение соответствует глубине и подтверждено результатами промера однолучевым и многолучевым эхолотами. По горизонтальной оси отложено пройденное расстояние в метрах, а по вертикальной оси глубина в метрах. Как видно на рисунке, глубина профилирования составляет 100 и более метров, характер отложений на склонах имеет слоистую структуру, характерную для илистых глин. Во впадине характер профилограммы более однородный по глубине, что характерно для супесей.

Многолетние исследования сотрудников ИРЭ РАН в области разработки и применения новых методов синтеза и обработки сигналов для решения локационных задач широко применяются в настоящее время в дистанционном зондировании Земли из космоса, а также других научно-технических приложениях.

Из брошюры Ржиги Олега Николаевича [2]. Как научному руководителю космического эксперимента по радиолокационному картографированию планеты Венера автору памяты этапы создания уникального космического комплекса "Венера-15" и "Венера-16". Это был пример творческого сотрудничества предприятий промышленности и научных учреждений. Работа велась межведомственным коллективом, под руководством вице-президента АН СССР академика В.А. Котельникова, где каждый делал свое дело. Академия наук разработала методику эксперимента и провела обработку данных, ОКБ МЭИ Минвуза разработало аппаратуру радиолокационной системы, а кооперация предприятий промышленности создала космический аппарат и обеспечила управление им.

Идея эксперимента возникла в ИРЭ АН СССР осенью 1972 г. Непосредственно ее развивали Ю.Н. Александров, Г.М. Петров и автор. В ноябре 1975 г. автор был принят президентом АН СССР академиком М.В. Келдышем. Вскоре после этого эксперимент по радиолокационному картографированию Венеры был включен в программу космических исследований. За разработку аппаратуры радиолокационной системы взялся директор ОКБ МЭИ А.Ф. Богомолов. В ОКБ МЭИ оказался такой человек Г.А. Соколов, который сразу проникся задачей и поставил целью своей жизни осуществление эксперимента. Через него осуществлялась связь между ИРЭ АН СССР и ОКБ МЭИ. Он пользовался большим авторитетом, и все, о чем мы с ним договаривались, претворялось в жизнь.

Созданная аппаратура, включая антенны, испытывалась сначала автономно на полигоне ОКБ МЭИ Медвежьи Озера. Руководил этой ответственной работой Г.А. Подопривога. Затем в течение года, предшествовавшего полету, проводились испытания совместно с аппаратурой передачи данных на Землю и аппаратурой обработки. На вход приемников радиолокационной системы подавались сигналы, воспроизводящие отражения от точечных целей. Испытательная аппаратура, разработанная под руководством М.Н. Мешкова, позволяла автоматически изменять уровень сигналов, их запаздывание и частоту по определенной программе. Магнитные ленты с записью сигналов, прошедших через приемно-регистрирующую аппаратуру радиолокационной

системы, передавались для обработки и анализа в ИРЭ АН СССР. Эти испытания позволили выявить 2-3 серьезных дефекта, после устранения которых аппаратура работала безукоризненно. Большой труд в организацию испытаний вложен В.Г. Тимониным.

Чтобы проверить работу радиолокатора совместно с новой радиолинией, испытания были продолжены в полете. Воспроизводилась информация, записанная заранее на Земле на магнитных запоминающих устройствах. Включался передатчик радиолокатора, его антенны поочередно направлялись на Землю, и на Медвежьих Озерах измерялась мощность зондирующего сигнала, его частота и структура модуляции. Медленно поворачивая аппарат по программе, проверяли форму диаграмм направленности антенн.

У сотрудников ИРЭ АН СССР, занимающихся радиолокационными наблюдениями планет в Центре дальней космической связи, стало традицией создавать своими руками сложную аппаратуру для проведения фундаментальных научных исследований. В этой связи является показательным создание комплекса аппаратуры (Центра) для обработки радиолокационной информации космических аппаратов "Венера-15" и "Венера-16" и разработка математических программ. В создании Центра и в организации обработки информации большую настойчивость проявил его руководитель А.И. Сидоренко.

Разработка процессора для ускоренного выполнения преобразования Фурье над отраженными сигналами была начата в ИРЭ АН СССР под руководством Ю.Н. Александрова. Затем эта работа перешла в Институт электронных управляющих машин Минприбора, где технической разработкой руководил Б.Я. Фельдман, а научное руководство осуществлялось Ю.Н. Александровым. Специализированный Фурье-процессор (СПФ-СМ), разработанный специально для обработки отраженных сигналов при съемке Венеры с помощью космических аппаратов "Венера-15" и "Венера-16", в настоящее время выпускается промышленностью для научных исследований и народнохозяйственных целей.

Методика, алгоритмы и программы обработки информации создавались целиком в ИРЭ АН СССР. За полтора года до начала эксперимента

выяснилось, что программы, написанные на стандартном языке Фортран, работают слишком медленно. Например, оказалось, что одна из 6 основных программ для обработки информации, полученной за один сеанс съемки (программа построения полосы радиолокационного изображения), требует 26 ч машинного времени. Поскольку заставить машину работать быстрее невозможно, пришлось применить «маленькие хитрости», такие, как переход на язык Ассемблер, использование целочисленной арифметики, разложение сложных функций в конечные ряды, интерполяция. Все, вместе взятое, сократило время счета примерно в 10 раз.

Математические программы должны были обеспечить полную обработку поступившей информации, включая построение полос радиолокационных изображений и измерение высотного рельефа поверхности Венеры. Кроме быстроты счета, от них требовалась самостоятельность в принятии решений в случае возникновения искажений информации. В процессе обработки должны были вычисляться характерные значения параметров отраженных сигналов, такие, как мощность, частота, запаздывание, чтобы оперативно судить о работе радиолокатора и ходе обработки. О сложности программ судят по числу элементарных операций, на которые распадается программа. Некоторые программы имели до 4000 таких операций, а полное их число во всех программах достигало 50000!

В мае 1983 г. за несколько месяцев до начала эксперимента по разным причинам уволилось несколько человек из числа тех сотрудников ИРЭ АН СССР, которые готовили алгоритмы и программы. В создавшейся ситуации, когда были потеряны те, кого в течение нескольких лет обучали "маленьким хитростям", никто помочь не мог. Выход был один – работать более напряженно, предельно целеустремленно. Некоторые работали в период своего отпуска, в выходные дни. В последние два месяца работали с 8 утра до 8 вечера, но не больше, чтобы восстановить силы.

В результате все основные программы были отлажены к моменту поступления магнитных лент с записью информации первого сеанса съемки. Теперь мы находились на последнем этапе длинной цепи, начавшейся с создания радиолокатора и космического аппарата. От

нашей работы зависело, насколько успешно завершится труд многих тысяч людей, участвующих в эксперименте. Это и было главным стимулом в работе.

Эксперимент такой сложности осуществлялся впервые, и когда в начале июня 1983 г. космические аппараты стартовали к Венере, было много опасений в его успехе. Сработает ли аппаратура? Не исказит ли изображение атмосфера Венеры? Правильно ли мы понимаем, как отражаются радиоволны поверхностью Венеры? Ведь после первых некачественных радиолокационных изображений, полученных в США, некоторые считали, что Венера такая же гладкая, как и бильярдный шар, и там нечего снимать!

И вот настали знаменательные дни. 16 октября 1983 г. космический аппарат "Венера-15" впервые осуществил радиолокационную съемку планеты Венера. 18 октября магнитные ленты с записью информации первого сеанса съемки скорым поездом были доставлены в Москву Е.П. Молотовым, который руководил разработкой аппаратуры приема и помехоустойчивой регистрацией информации космических аппаратов. 20 октября около 15 ч на экране дисплея появился фрагмент первого изображения поверхности Венеры (рис. 11). Все работало безукоризненно.

Когда началась регулярная ежедневная съемка Венеры, стало нарастать отставание в обработке.

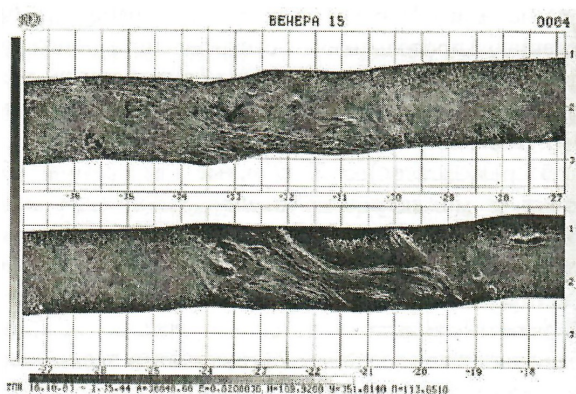


Рис. 11. Часть полосы изображения поверхности Венеры, полученного в первом сеансе съемки 16 октября 1983 года аппаратом "Венера-15". По горизонтали отложена в градусах орбитальная долгота, отсчитанная от перигелия орбиты, по вертикали – орбитальная широта, отсчитанная от плоскости орбиты. Космический аппарат двигался слева направо, его трасса проходила выше полосы. Регулярные смещения полосы относительно плоскости орбиты связаны с изменением высоты аппарата, двигавшегося по сильно вытянутой эллиптической орбите, нерегулярные – вызваны местным рельефом.

Тогда в конце 1983 г. решено было перейти на двухсменную работу, включая субботу и воскресенье. Все сотрудники, участвующие в обработке, были разбиты на 3 бригады. Одна из них работала днем, другая – вечером, а третья в эти сутки отдыхала. В создании сложного комплекса программ, разработке аппаратуры Центра и обработке информации большая роль принадлежала молодым научным сотрудникам А.И. Захарову, В.Е. Зимову, А.П. Кривцову, И.А. Кучерявенковой, Н.В. Родионовой, В.П. Синоло и В.А. Шубину.

Каждую неделю в ГЕОХИ АН СССР и ЦНИИГАиК ГУГК передавалось 100-150 фотоотпечатков с изображениями и профилями высот поверхности Венеры. Чтобы ускорить выпуск карт, было решено строить карты цифровыми методами, используя аппаратуру Центра. К середине 1987 г. для снятой территории Венеры построены все 27 карт в четырех вариантах. Они переданы на магнитных лентах в ЦНИИГАиК для подготовки к изданию. Две карты из них изданы небольшим тиражом в 1986 г. В ноябре 1987 г. А.А. Крымовым и О.С. Шампаровой закончено построение полной карты снятой территории Венеры, включившей в себя весь материал, полученный с помощью космических аппаратов "Венера-15" и "Венера-16".

Номенклатура деталей поверхности Венеры для издаваемых карт утверждена XIX Генеральной ассамблеей Международного астрономического союза, состоявшейся в ноябре 1985 г. в Дели. В подготовке номенклатуры принимали участие советские специалисты А.Т. Базилевский, Г.А. Бурба, М.Я. Маров, Ю.С. Тюфлин и др. Номенклатура содержит свыше 250 наименований. В ней широко представлены русские женские имена, женские имена народов СССР и социалистических стран. На картах Венеры мы встретим фамилии известных женщин-ученых, поэтесс, актрис, общественных деятелей. Так, на первой изданной карте "Плато Лакшми" мы видим кратеры имени Екатерины Дашковой, Анны Ахматовой, Полины Осипенко, Эжени Коттон. Издание карт Венеры продолжалось в 1987 г.

Результаты радиолокационной съемки Венеры с помощью космических аппаратов "Венера-15" и "Венера-16" вызвали огромный интерес не только в Советском Союзе. Готовясь к повторению радиолокационных исследований

Венеры с орбиты искусственного спутника по проекту "Магеллан", американские ученые обратились к Академии наук СССР с просьбой передать материалы радиолокационной съемки Венеры. Передача магнитных лент с изображениями и профилями высот поверхности Венеры осуществляется регулярно через совет "Интеркосмос". В свою очередь, мы получили все данные радиолокационной съемки Венеры с помощью космического аппарата "Пионер-Венера", а также подробные карты Марса, построенные по результатам телевизионной съемки с помощью космических аппаратов "Маринер-9" и "Викинг".

Полет космических аппаратов "Венера-15" и "Венера-16" открыл новую эпоху в изучении этой планеты. В обращении Генерального секретаря ЦК КПСС М.С. Горбачева к членам делегации конгресса лауреатов Нобелевской премии мира в ноябре 1985 г. этот эксперимент поставлен в один ряд с запуском первого спутника, первым полетом человека в космос и высадкой на Луну, посадкой автоматических станций на Венеру и Марс. Карта Венеры названа прекрасной!

ГРУППА СМОЛЬЯНИНОВА

Основной темой работы группы Смольянинова Вячеслава Михайловича была помехоустойчивая передача и прием сигналов в различных средах.

В настоящее время происходит интенсивное развитие различных цифровых систем передачи данных. Все системы используют для передачи данных беспроводные каналы, в которых на передаваемый сигнал действуют помехи различной физической природы. Это приводит к тому, что принятые данные с достаточной вероятностью будут содержать ошибки. В то же время для многих практических приложений допустима лишь очень небольшая доля ошибок в обрабатываемых дискретных данных. В результате возникает проблема обеспечения надежной передачи цифровой информации по каналам с шумами.

Важнейший вклад в решение данной проблемы вносит теория помехоустойчивого кодирования. На ее основе разрабатываются методы защиты от ошибок, базирующиеся на применении помехоустойчивых кодов. Использование этих кодов позволяет получить энергетический выигрыш кодирования, который характеризует степень возможного снижения

энергетики передачи при кодировании по сравнению с отсутствием кодирования, если достоверность передачи в обоих случаях одинакова. Этот выигрыш можно использовать для улучшения параметров и характеристик многих важных свойств систем передачи данных, например, для уменьшения размеров очень дорогих антенн, повышения дальности связи, увеличения скорости передачи данных, снижения необходимой мощности передатчика и т.д.

Развитие помехоустойчивого кодирования насчитывает полвека. Если сначала оно опиралось на алгебраические методы, в дальнейшем сменилось методами мажоритарного кодирования и, как более эффективным, переборным алгоритмом Витерби. Недостатком последнего является экспоненциальный рост сложности для длинных кодов. Следующим этапом были каскадные коды на базе сверточных кодов и кодов Рида-Соломона. Каскадные коды обеспечивали более высокие характеристики помехоустойчивости при меньшей сложности декодирования, но были далеки от теоретически возможных пределов (теорема Шеннона для каналов).

Открытые в 1993 году турбо-коды позволили почти полностью использовать емкость цифровых каналов связи и приблизились к кодам со скоростями, близкими к пропускной способности каналов, что особенно актуально в наши дни с увеличением дальности связи.

ГРУППА САВИЧА

Группа Николая Александровича Савича выделилась из 117 лаборатории в 1972 году, войдя в состав 127 лаборатории. В июне 1978 года группа Савича оформилась в отдельную темгруппу 114. Основное направление работы группы Савича связано с исследованием ионосфер планет Венеры и Марса.

ОБНАРУЖЕНИЕ НОЧНОЙ ИОНОСФЕРЫ МАРСА [3]

Во время пролета станции "Марс-4" вблизи планеты Марс 10.2.1974 г. проводилось радиопросвечивание атмосферы планеты двумя когерентными монохроматическими сигналами в дециметровом ($\lambda \approx 32$ см) и сантиметровом ($\lambda \approx 8$ см) диапазонах длин волн с отношением частот, равным 4, которые излучались со станции и принимались на Земле.

Задача состояла в обнаружении плазмы над неосвещенной Солнцем поверхностью Марса и определении профиля электронной

концентрации в ночной ионосфере. На наземном приемном пункте осуществлялся раздельный прием каждого из сигналов и их обработка одновременно двумя независимыми системами дисперсионного интерферометра. Обе системы обработки дали идентичные результаты. По полученным данным в предположении сферической симметрии ионосферы был рассчитан высотный профиль распределения электронной концентрации в ночной ионосфере Марса (рис. 12). На графике четко виден основной максимум ионизации на высоте порядка 110 км над поверхностью с концентрацией частиц $N_m \approx 4.6 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ и полутолщиной слоя порядка 35 км. Ошибка измерений в области максимума составляет порядка 5%.

Многочастотное одночастотное просвечивание ночной ионосферы Марса было осуществлено при помощи станции "Маринер 9". Однако погрешности измерений, присущие одночастотному методу в некогерентном режиме при работе бортового передатчика от кварцевого генератора, не позволяют обнаружить ночную ионосферу Марса без априорной информации.

Измерения двухчастотного радиопросвечивания позволили получить достоверное распределение электронной концентрации в ночной ионосфере Марса и установить его основные характеристики: высоту основного максимума и величину электронной концентрации.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ ВЕНЕРЫ МЕТОДОМ ДВУХЧАСТОТНОГО РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ ПРИ ПОМОЩИ СТАНЦИЙ ВЕНЕРА-9, 10

До начала полетов космических аппаратов к Венере сведения о ее атмосфере ограничивались, в основном, данными наземных и радиоастрономических

наблюдений. Оценка параметров ионосферы Венеры основывалась на аналогиях с земной и носила гипотетический характер.

Первые экспериментальные данные о параметрах ионосферы Венеры были получены радиофизическим методом при пролете аппарата "Маринер-5" в 1967 году. Двухчастотное радиопросвечивание было проведено по запросной линии связи "Земля-космический аппарат" двумя когерентными сигналами 49.8 МГц и 423.3 МГц, и результаты измерений приведенной разности доплеровских частот, а также амплитуды сигналов, принесли первую информацию о распределении электронной концентрации $N(h)$ в дневной и ночной ионосфере Венеры. Основные выводы данной работы: 1. Дневная ионосфера имеет главный максимум ионизации на высоте ~ 140 км с концентрацией частиц $N_m \sim 5.5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ и вторичный на высоте ~ 130 км с $N_m \sim 2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, 2. Ночная ионосфера имеет главный максимум ионизации на высоте ~ 142 км с $N_m \sim 2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$.

В 1974 году при пролете аппарата "Маринер-10" вблизи Венеры было вторично осуществлено двухчастотное радиопросвечивание дневной и ночной ионосферы Венеры, но уже на более высоких частотах (~ 2295 МГц и ~ 8415 МГц) по линии связи "Земля-космический аппарат". В результате было показано, что 1) Дневная ионосфера имеет главный максимум ионизации $N_m \sim 3 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ на высоте ~ 145 км, 2) Ночная ионосфера имеет два максимума ионизации.

Для уточнения структуры дневной и ночной ионосферы Венеры необходимы были систематические экспериментальные данные о высотных профилях электронной концентрации, которые можно было получить при помощи долгоживущего спутника планеты. Поэтому при создании спутников "Венера-9, 10" было предусмотрено осуществление многократного радиопросвечивания ионосферы и атмосферы Венеры методом дисперсионного интерферометра.

Вывод в октябре 1975 года автоматических межпланетных станций "Венера-9" и "Венера-10" на орбиты искусственных спутников Венеры впервые открыл возможности для осуществления многократного двухчастотного радиопросвечивания атмосферы Венеры. На обеих станциях в дополнение к штатному

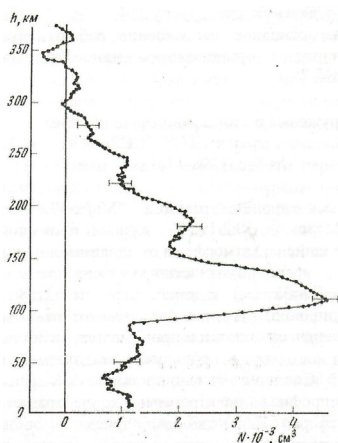


Рис. 12. Распределение концентрации электронов по высоте в ночной ионосфере Марса.

передатчику дециметрового (32 см) диапазона был установлен когерентный сантиметровый радиопередатчик (8 см), разработанный и изготовленный в СКБ ИРЭ АН СССР. В результате в период с 24.10.76 по 7.12.76 г. успешно осуществлено 22 сеанса радиопросвечивания ночной и 13-дневной ионосферы Венеры методом дисперсионного интерферометра.

Установлено, что в ночной ионосфере Венеры, как правило, высотное распределение ионизации имеет два максимума (16 случаев) и очень редко один (2 случая). Электронная концентрация в верхнем максимуме ночной ионосферы Венеры лежит в пределах $N_m \sim (2.9 \pm 16.0) \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$, а высота его в большинстве случаев $\sim 140 \pm 5$ км. Нижний максимум концентрации имеет параметры $N_m \sim (1.8 \pm 11.2) \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ и высота 120 ± 13 км. Впервые было показано, что распределению электронной концентрации в ночной ионосфере Венеры свойственна значительная изменчивость во времени как по плотности ионизованных слоев, так и по форме профиля.

В дневной ионосфере Венеры (зенитные углы от 10° до 87°) электронная концентрация в главном максимуме, расположенном на высотах 140 ± 166 км, лежит в пределах $N_m \sim (1.25 \pm 4.4) \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$. Кроме того, подтверждено регулярное существование нижнего ионизованного слоя с максимальной концентрацией $N_m \sim (4.6 \pm 13) \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ на высотах 125 ± 138 км и дополнительного верхнего на высотах 180 ± 210 км, который наблюдается при малых зенитных углах Солнца и исчезает полностью при зенитных углах $\geq 74^\circ$.

Группа Максимова

Одним из направлений работы сотрудников группы Максимова Александра Степановича было создание и исследование полупроводниковых аналогов индуктивности. Дело в том, что в устройствах, хорошо работающих на низких частотах, при перестройке их на инфранизкие частоты начинает проявляться ряд специфических особенностей: увеличение шумов, уменьшение добротности реактивных элементов, увеличение габаритов и веса. Проблема уменьшения габаритов и веса реактивных элементов для инфранизких частот стоит особенно остро как при микроминиатюризации аппаратуры, так и при создании сверхмощных реактивных элементов.

В ИРЭ АН СССР были предложены новые принципы создания миниатюрных элементов с большой эквивалентной индуктивностью ($10^3 \div 10^6$ Гн) и, соответственно, с большой постоянной времени при использовании как тонкопленочной, так и твердотельной технологии. В основе принципа действия этих приборов лежат явления захвата и освобождения носителей заряда медленными поверхностными состояниями. Было показано, что более перспективным является использование твердотельной технологии для создания индуктивных элементов. На основе *p-n*- и *p-n-p-n*-германиевых и кремниевых структур со специально обработанной поверхностью была показана возможность их воспроизводимого получения, стабильности параметров во времени и практическая реализация в ряде радиотехнических устройств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение приведем список всех сотрудников лаборатории 127, в то или иное время работавших в ней и внесших свой посильный вклад в ее славу и гордость ИРЭ РАН: Абрамова Л.В., Азаров В.В., Александров Ю.Н., Барабошкин С.М., Белицкий М.Р., Березина С.И., Бурков В.Д., Васильев М.Б., Вышлов А.С., Вышлова Л.В., Гаврик А.А., Гатилова М., Герасимов С.В., Головков В.К., Долотов С.А., Дубровин В.М., Зайцев А.А., Зайцева О.С., Захаров А.И., Зимов В.Е., Зяблов А.Б., Иванов В.А., Каевицер А.В., Каевицер В.И., Калинин А.В., Ковтун В.В., Копнина Т.Ф., Королева Т.С., Кривцов А.П., Крылов Г.А., Крымов А.А., Кузнецов А.А., Кузнецов Б.И., Кузнецов О.О., Кузнецова Л.В., Кукушкин А.С., Кучерявенкова И.А., Куценко Е.Ф., Лабутин М.В., Максимов А.С., Маргачев В.В., Метельская З.Т., Моисеенко В.Ю., Назаренко Э.Г., Назаров Л.Е., Некрасов А.Я., Первушин С.А., Перфилова Н.И., Петров Г.М., Прокофьев И.В., Прокуронов В.В., Разумный Е.А., Ржига О.Н., Родионова Н.В., Романова Г.В., Рябова Н.В., Савич Н.А., Сальников В.П., Самовол В.А., Самознаев Л.Н., Семаев В.Н., Семилетников В.В., Сидоренко А.И., Синило В.П., Скарня А.В., Смольянинов В.М., Сорокин В.К., Сорочинский М.В., Суховерхова В.З., Турусина И.В., Феофанов Ю.В., Хасянов А.Ф., Хлебников М.Н., Царфин Д.А., Чаликов С.Ф., Чельшев Н., Чернов П.В., Чуркин В.И., Шаталова А.И., Шубин В.А., Шумилова Л.В., Юркова В.И.

ЛИТЕРАТУРА

1. Родионова НВ (сост. и ред.). *Петров и его команда*. М., Эдитус, 2018, 220 с.
2. Ржига ОН. *Новая эпоха в исследовании Венеры (радиолокационная съемка с помощью космических аппаратов "Венера-15" и "Венера-16")*. М., Знание, 1988. 64 с.
3. Васильев МБ, Вышлов АС, Колосов МА, Савич НА, Самовол ВА, Самознаев ЛН, Сидоренко АИ, Александров ЮН, Даниленко АИ, Дубровин ВМ, Зайцев АА, Петров ГМ, Ржига ОН, Штерн ДЯ, Местэртон АП. Обнаружение ночной ионосферы Марса. *ДАН СССР*, 1974, 218(6):1298-1301.

Ржига Олег Николаевич

д.т.н., проф.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал
Фрязино 141190, Моск. обл., Россия
info@cplire.ru

Зайцев Александр Леонидович

д.ф.-м.н., с.н.с.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал
Фрязино 141190, Моск. обл., Россия
alzaitsev@gmail.com

Захаров Александр Иванович

д.ф.-м.н., с.н.с.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал
Фрязино 141190, Московская область, Россия
aizakhar@ire.rssi.ru

Каевицер Владлен Иосифович

д.т.н., с.н.с.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал
Фрязино 141190, Московская область, Россия
kvi43@mail.ru

Родионова Наталья Васильевна

к.ф.-м.н., с.н.с.

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал
Фрязино 141190, Моск. обл., Россия
rnv1948123@yandex.ru

PETROV AND HIS LABORATORY "PLANETARY RADAR SYSTEMS"

Oleg N. Rzhiga, Alexander L. Zaitsev, Alexander I. Zakharov, Vladlen I. Kaevitser, Nataly V. Rodionova

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Fryazino Branch, <http://www.cplire.ru>
Fryazino 141190, Moscow Region, Russian Federation

info@cplire.ru, alzaitsev@gmail.com, aizakhar@ire.rssi.ru, kvi43@mail.ru, rnv1948123@yandex.ru

Abstract. Some book fragments of the former 127 laboratory Kotelnikov FIRE RAS scientific researchers are presented. They include information about Petrov G.M. - the laboratory head, the solar system planet radar works in the 60-80s last century by Petrov and his colleagues, Venus surface atlas and so on.

Keywords: planetary radar, astronomical units, mapping

UDC 621.396.967; 621.396.962

Bibliography - 3 references

RENSIT, 2018, 10(2):175-192

Received 10.09.2018

DOI: 10.17725/rensit.2018.10.175