

РАДИОЛОКАЦИОННАЯ АСТРОНОМИЯ

В. А. Котельников, Г. М. Петров

Наука и человечество, М., Знание, 1982

В последние два десятилетия успешно развивается новое направление наблюдательной астрономии, использующее физические принципы и методы радиолокации для исследования небесных тел Солнечной системы: их положения, движения, вращения, размеров, физических свойств слагающих пород, рельефа и других характеристик поверхности.

Быстрое развитие радиолокационной астрономии стимулировалось и поддерживалось практическими потребностями космонавтики, так как для полетов космических станций к планетам были необходимы более точные сведения о положении и движении планет. Наблюдения планет и Солнца, более двух столетий проводившиеся с помощью оптических телескопов, позволили построить весьма совершенные теории их движения, однако точность расчета положения планет на их основе все же не удовлетворяла высоким требованиям космонавтики.

Особенно недостаточным оказалось знание размеров планетных орбит, выраженных в километрах, поскольку прямые измерения расстояний до планет недоступны для оптических средств классической наблюдательной астрономии. Косвенные же методы, основанные на измерениях разности угловых положений планет на небесной сфере при наблюдениях из разных пунктов Земли, приводили к большим ошибкам — в сотни тысяч километров.

В отличие от косвенных оптических методов радиолокация позволяет определить расстояние до планеты непосредственно по прямым измерениям промежутка времени, в течение которого радиоволны распространяются до планеты и после отражения от нее обратно до радиолокатора. Скорость распространения радиоволн, равная скорости света, известна с высокой точностью, поэтому и точность измерения расстояния тоже получается высокой. Кроме того, радиолокация дает возможность также непосредственно и с высокой точностью по измерениям доплеровского смещения частоты отраженных радиоволн определять скорость изменения расстояния до планеты (лучевую скорость).

В современных планетных радиолокаторах расстояние до ближайших участков планет измеряется с точностью до нескольких сотен метров, скорость — до нескольких сантиметров в секунду. Например, наш планетный радиолокатор (длина волны 39 см), расположенный

в Крыму, позволяет измерять расстояние до Венеры с точностью до 300 м, скорость движения планеты — до 0,8 см/с. При этом удается разделить и измерить радиосигналы, отраженные от отдельных частей лоцируемой планеты, поскольку эти сигналы приходят с разным запаздыванием и имеют различное доплеровское смещение частоты, вызванное вращением планеты.

Радиолокация Луны была осуществлена в первые годы после второй мировой войны; созданные к тому времени радиолокаторы имели для этого достаточную мощность. Однако вследствие того что мощность возвращающихся к локатору отраженных радиоволн убывает пропорционально четвертой степени расстояния до лоцируемого объекта, для успешной локации планет было необходимо поднять мощность радиолокатора в десятки миллионов раз или соответственно увеличить размеры антенны и чувствительность приемников.

Первая успешная радиолокация планеты — это была Венера — в СССР, США и Англии была выполнена в апреле 1961 г., когда она находилась на минимальном расстоянии от Земли (40 млн км). В 1962 г. радиолокация Венеры была повторена в СССР, Англии и США, а в 1964 г. — в СССР и США.

В наблюдениях 1962 г. чувствительность радиолокатора СССР была повышена в 6 раз — в то время он был самым чувствительным (чувствительность радиолокатора зависит от излучаемой им мощности, размеров антенны и чувствительности приемника). Повышение чувствительности позволило провести измерения расстояния до Венеры на протяжении двух месяцев и уменьшить их ошибки по сравнению с 1961 г. в 70 раз. Расстояние в 1962 г. определялось с точностью 12–15 км, скорость — 6 см/с.

Впервые было получено распределение энергии эхо-сигнала по времени запаздывания с высоким разрешением (рис. 1), что позволило сделать выводы о природе отражающей поверхности Венеры. Тогда же впервые (в СССР и США) было определено направление и период вращения Венеры. Основным результатом наблюдений Венеры в 1961, 1962 и 1964 гг. было кардинальное (почти в 1000 раз) уточнение астрономической единицы — среднего расстояния от Земли до Солнца. Этот фундаментальный результат помимо большой научной ценности имел крайне важное практическое значение для решения навигационных задач при полетах межпланетных станций.

Повышение чувствительности радиолокатора СССР дало возможность в июне 1962 г. впервые провести успешную радиолокацию Меркурия. Первые эксперименты по радиолокации Марса и Юпитера проводились и 1963 г. в СССР и США.

В январе–феврале 1966 г. были выполнены совместные советско-английские радиолокационные наблюдения Венеры, в которых радиоволны к планете излучались из Центра дальней космической связи в Крыму, а отраженные от планеты сигналы принимались и регистри-

ровались на магнитной ленте в Джодрелл Бэнк¹⁾). Их обработка выполнялась независимо в СССР и Англии. Анализ полученных частотных спектров эхо-сигналов позволил уточнить период вращения Венеры и дополнить сведения об отражающих свойствах ее поверхности.

С 1969 г. планетным радиолокатором СССР выполнялись регулярные измерения расстояния и радиальной скорости Венеры с целью прогнозирования положения планеты на завершающем этапе полетов к ней межпланетных станций. В процессе подготовки к наблюдениям непрерывно совершенствовались аппаратура и методика наблюдений с целью повышения точности измерений.

Благодаря повышению мощности передатчика, усовершенствованию антенны и приемника, а также улучшению методов обработки эхо-сигналов с помощью вычислительных машин чувствительность радиолокатора в СССР к 1971 г. была увеличена в 70 раз. Это позволило во время великого противостояния²⁾ Марса 1971 г. (минимальное расстояние до Земли — около 56 млн км) в течение двух месяцев проводить измерения его расстояния от Земли, что было необходимо для обеспечения полетов к нему межпланетных станций «Марс-2» и «Марс-3».

В 1979 г. в Центре дальней космической связи в Крыму была построена полноповоротная параболическая антенна с диаметром зеркала 70 м (рис. 2), на базе которой создан более совершенный планетный радиолокатор (на той же длине волны). Применение высокоэффективной антенны, повышение мощности передатчика и улучшение чувствительности приемника дали возможность повысить чувствительность радиолокатора СССР еще в 50 раз, что более чем в 2,5 раза увеличило предельную дальность радиолокации планет.

С помощью этого радиолокатора в период с февраля по апрель 1980 г. выполнены радиолокационные наблюдения Венеры, Марса и Меркурия на значительных участках их орбит, при этом наибольшие расстояния составляли: 161 млн км — до Венеры, 135 млн км — до Марса, 139 млн км — до Меркурия (указанные расстояния не являются предельными для локатора). Получена новая высокоточная астрометрическая информация по трем планетам, которая совместно с результатами наблюдений прошлых лет позволила построить единую теорию движения внутренних планет (Меркурия, Венеры, Земли и Марса). Кроме того, были получены новые сведения о рельефе и отражательных свойствах поверхности этих планет.

¹⁾ Подробнее об этой работе см. в статье директора обсерватории в Джодрелл Бэнк Б. Ловелла в ежегоднике «Наука и человечество. 1968». — *Ред.*

²⁾ В противостояниях Марс виден на небосводе в созвездиях, противоположных Солнцу («стоит против Солнца»). В этом случае расстояние между Марсом и Землей минимально в отличие от других положений этих планет на орбитах.

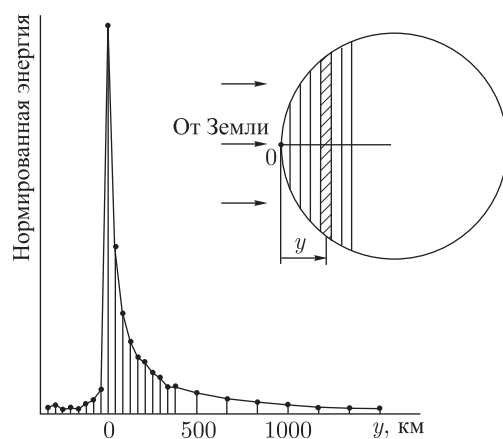


Рис. 1. Распределение энергии отраженных Венерой радиоволн по дальности (запаздыванию) (СССР, 1962 г.). Резкий максимум в точке 0 (ближайшая к Земле точка планеты) говорит о зеркальном отражении в центре диска планеты



Рис. 2. Приемно-передающая полноповоротная антенна диаметром 70 м Центра дальней космической связи в Крыму, используемая для планетного радиолокатора СССР с 1980 г.

В результате наблюдений Венеры, Марса и Меркурия, регулярно проводившихся в СССР и США в течение двух десятилетий, накоплена обширная астрометрическая информация, на основе которой существенно уточнены орбиты этих планет и построены более совершенные численные теории для прогнозирования их движения.

Чувствительность современных радиолокаторов повышена по сравнению с 1961 г. в несколько тысяч раз, что позволяет проводить радиолокацию внутренних планет на всех участках их орбит. Она также оказалась достаточной для того, чтобы провести наблюдения колец Сатурна, четырех Галилеевых спутников Юпитера и пяти малых планет (астероидов).

Определение астрономической единицы и радиуса Венеры

Основной результат радиолокационных наблюдений Венеры, имеющий первостепенное значение для космонавтики, — кардинальное уточнение астрономической единицы. Через астрономическую единицу выражаются все расстояния в Солнечной системе, поэтому задача определения ее абсолютной величины в километрах всегда представляла большой познавательный интерес и находилась в центре внимания астрономов.

Ее значения, полученные разными оптическими методами в период 1940–1960 гг., лежали в пределах от 149,4 до 149,7 млн км, т.е. разброс составлял около 300 тыс. км. До начала радиолокационных измерений наиболее достоверным считалось значение $149\,527\,000 \pm \pm 10\,000$ км, полученное в 1950 г. из наблюдений за движением малой планеты Эрос в период 1926–1945 гг. С ним согласовывалось значение $149\,545\,000 \pm 20\,000$ км, полученное в 1960 г. по измерениям радиальной скорости автоматической станции «Пионер-5». Однако как показали радиолокационные измерения, эти значения оказались на 50–70 тыс. км меньше истинной величины.

Такая ошибка привела бы к неизбежным промахам при полетах космических кораблей к планетам. Так, при полете к Марсу корабль прошел бы в стороне от планеты примерно на расстоянии 15 ее радиусов, а при полете к Венере — на расстоянии трех ее радиусов.

Классическая теория движения планет позволяла вычислять межпланетные расстояния через астрономическую единицу с точностью 10^{-5} – 10^{-6} . Измерив межпланетное расстояние в километрах с помощью радиолокатора, очевидно, можно было с такой же точностью определить и астрономическую единицу.

Уже первые радиолокационные наблюдения Венеры в 1961 г. позволили уточнить величину астрономической единицы примерно в 50 раз. Ее значения, полученные в разных странах и на разных длинах волн, хорошо согласовались между собой, что свидетельствовало о высокой достоверности измерений.

Значительное уменьшение ошибок измерений расстояния до Венеры, достигнутое в СССР в 1962 и 1964 гг., давало возможность повысить и точность определения астрономической единицы. Однако для этого требовалось соответственно уточнить параметры орбит Венеры и Земли, а также радиус Венеры, но это можно было сделать только на

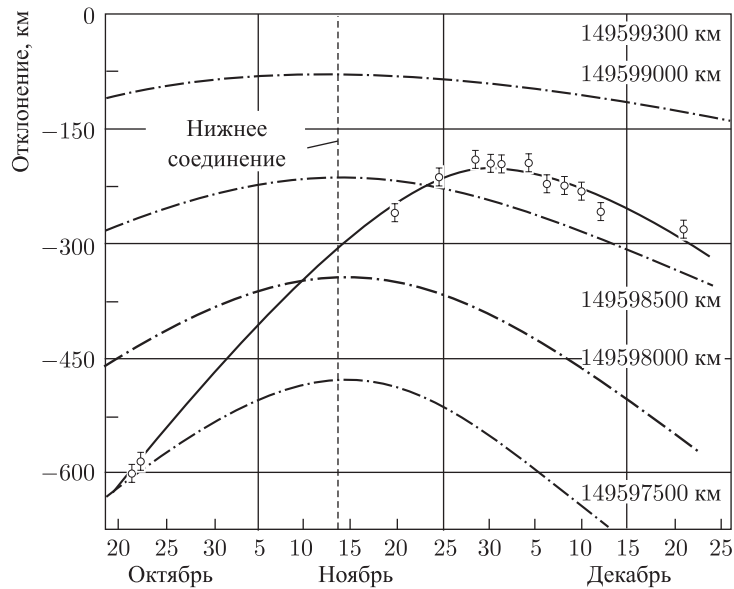


Рис. 3. Отклонения (точки) измеренных значений расстояния от расчетных по наблюдениям Венеры в 1962 г. (в расчетах принималось: астрономическая единица — 149 599 300 км, радиус Венеры — 6 100 км). Кривая (сплошная линия), проходящая через эти экспериментальные точки, рассчитана при значениях астрономической единицы 149 597 900 км, поправки к разности долгот Венеры и Земли $+0''{,}5$ и радиуса Венеры 6020 км. Пунктирные линии — кривые, рассчитанные при других значениях астрономической единицы (указаны справа), но без учета поправки к долготе и радиусу Венеры

основе радиолокационных измерений на более длительном интервале времени, охватывающем несколько синодических периодов обращения Венеры (синодический период — промежуток времени между двумя нижними соединениями, в которых расстояние между Землей и Венерой минимально).

Возможности уточнения элементов орбит были продемонстрированы уже при обработке результатов 1962 г. (рис. 3). Тогда наряду с поправкой к астрономической единице были найдены также поправки к положению на орбите и радиусу Венеры (см. табл.).

Радиус Венеры по оптическим наблюдениям был определен на уровне верхней кромки облачного слоя и по оценкам астрономов составлял 6120 ± 8 км, высота же облачного слоя над поверхностью была неизвестна. Для точного определения астрономической единицы очень важно знать радиус отражающей радиоволны поверхности Венеры, поскольку радиолокационным способом измеряется расстояние до передних участков этой поверхности, а теория движения планет дает

положение их центра масс, который находится дальше на величину радиуса.

Обработка двух циклов измерений, выполненных в СССР в 1962 и 1964 гг., позволила найти поправки к элементам орбит Венеры и Земли, что привело к дальнейшему уточнению астрономической единицы и радиуса Венеры.

Работа по одновременному уточнению астрономической единицы, параметров орбит Венеры и Земли и радиуса Венеры была проведена Линкольновской лабораторией США в 1966 г. В результате совместной обработки радиолокационных измерений США и СССР за период 1962–1966 гг. и оптических измерений США за период 1950–1966 гг. для астрономической единицы при скорости света 299 792,5 км/с было получено значение $149\,597\,892,3 \pm 1,5$ км; для радиуса Венеры — $6055,8 \pm 1,2$ км.

Последующие измерения и анализ радиолокационных данных, полученных до 1969 г., в Линкольновской лаборатории дал значение $6050 \pm 0,3$ км.

Наиболее точные значения астрономической единицы и радиуса Венеры в СССР были получены в 1976 и 1980 гг. благодаря построению более совершенной теории движения Венеры и Земли (см. табл.).

Значения астрономической единицы и среднего радиуса Венеры, полученные в СССР в разные годы

Интервал наблюдений (гг.)	Астрономическая единица (км)	Радиус Венеры (км)
1961	149599300 ± 1000	—
1962	149597900 ± 250	6020 ± 50
1964	149598000 ± 130	—
1962–1964	149597886 ± 80	6046 ± 15
1962–1975	$149597888,9 \pm 0,7$	$6052,3 \pm 0,3$
1962–1980	$149597889,0 \pm 0,3$	$6050,1 \pm 0,1$

Примечание. Значения астрономической единицы в таблице приведены при скорости света 299792,5 км/с. Если использовать уточненное значение скорости света $299792458 \pm 1,2$ м/с, то величина астрономической единицы в последнем определении будет равна $149597868 \pm 0,7$ км.

Теория движения внутренних планет

Радиолокационные наблюдения планет показали, что и после уточнения астрономической единицы остаются заметные расхождения между измеренными расстояниями и их значениями, вычисленными по классическим теориям. Расхождения достигали нескольких сотен ки-

лометров (рис. 4). Такие ошибки в прогнозировании движения планет по классическим теориям затрудняли решение навигационных задач космонавтики, особенно таких сложных, как посадка спускаемого аппарата в заранее выбранный район поверхности или выведение искусственного спутника планеты с заданными параметрами его орбиты.

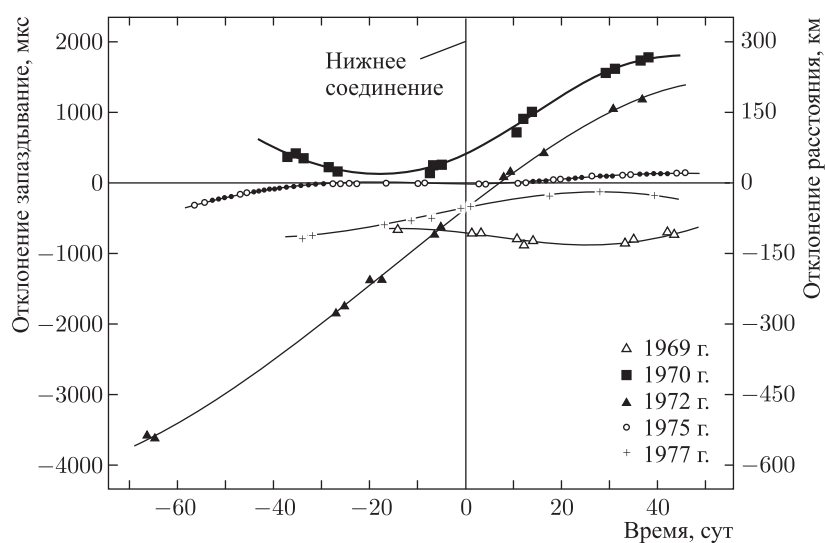


Рис. 4. Отклонения измеренных в разные годы в СССР запаздываний эхо-сигнала от Венеры и соответствующих им расстояний от расчетных значений, вычисленных по классической теории (в расчете принималось: астрономическая единица — 149 597 890 км, радиус Венеры — 6050 км)

В связи с этим во время полетов автоматических межпланетных станций приходилось наряду с траекторными измерениями положения станции проводить также и радиолокационные наблюдения для уточнения положения планеты.

Необходимо было создать новые, более точные теории движения планет на основе радиолокационной информации.

Численная теория движения Венеры и Земли на основе радиолокационных наблюдений Венеры на интервале 1962–1975 гг. была построена Институтом радиотехники и электроники АН СССР и Институтом прикладной математики АН СССР совместно с рядом организаций в 1976–1978 гг.

При этом были использованы также данные оптических наблюдений Венеры и Солнца, выполненных Николаевской обсерваторией АН СССР и Морской обсерваторией США, и параметры движения искусственных спутников Венеры «Венера-9» и «Венера-10» в 1975 г.

Задача решалась численным интегрированием на ЭВМ системы дифференциальных уравнений, описывающих движение восьми тел

в их гравитационном поле. В качестве тел были взяты Солнце, Меркурий, Венера, система Земля–Луна, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран. Оценки показали, что влиянием Нептуна и Плутона при решении данной задачи можно пренебречь. В число определяемых параметров были включены 12 элементов орбит Венеры и центра масс системы Земля–Луна, а также астрономическая единица и радиус Венеры.

Экспериментальная проверка построенной численной теории, выполненная при очередных радиолокациях Венеры в 1977, 1978 и 1980 гг., показала, что отклонения измеренных расстояний до Венеры от их значений, прогнозируемых по численной теории, не превышают 3–6 км (рис. 5). В то же время отклонения измеренных расстояний от прогноза по классической теории, даже при уточненной астрономической единице в этот период, доходили до 500 км.

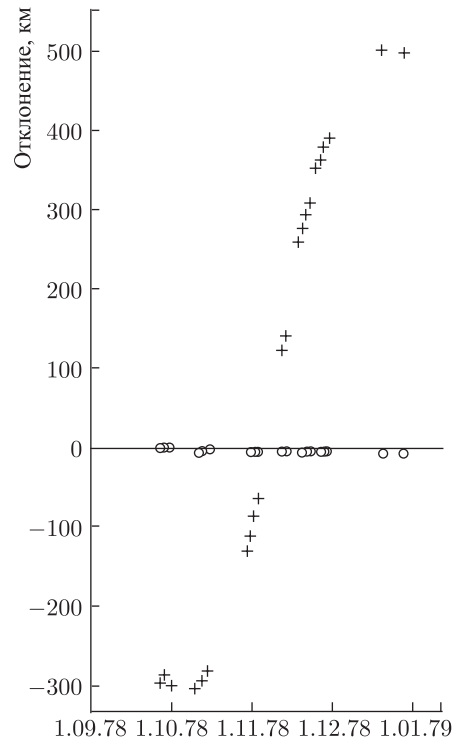


Рис. 5. Отклонения измеренных в 1978 г. в СССР расстояний до Венеры от расчетных значений, вычисленных на основе новой численной теории (кружочки) и классической теории (крестики); в расчете принималось: астрономическая единица — 149597888,9 км, радиус Венеры — 6052,3 км

При запусках станций «Венера-11» и «Венера-12» в 1978 г. все навигационные расчеты проводились на основе новой численной теории.

Измерения параметров движения станций, в свою очередь, подтвердили высокую точность этой теории: измеренные расстояния до них отличались от прогнозирувавшихся не больше, чем на 3 км.

В 1979 г. Институтом радиотехники и электроники АН СССР совместно с другими организациями была осуществлена обработка радиолокационных наблюдений Марса за 1964–1971 гг. и оптических наблюдений Марса и Солнца за 1960–1975 гг.

Определение орбит Марса и Земли проводилось по той же методике, которая использовалась при обработке наблюдений Венеры. Определяемыми параметрами были 12 элементов орбит Марса и центра масс системы Земля–Луна. Точность прогнозирования движения Марса на основе полученного решения была проверена при его радиолокационных наблюдениях в СССР в 1980 г. Ошибка прогноза расстояния относительно среднего уровня поверхности планеты на двухмесячном интервале наблюдений монотонно изменялась от 13,6 до 21 км.

В результате радиолокационных наблюдений Венеры, Марса и Меркурия на значительных участках орбит в 1980 г. в Советском Союзе была получена новая высокоточная астрометрическая информация. Она существенно дополнила результаты прежних радиолокационных наблюдений планет, в особенности Меркурия и Марса. Тем самым была создана реальная основа для построения единой теории движения внутренних планет, т.е. для одновременного определения орбит Меркурия, Венеры, Земли и Марса по всей совокупности имеющихся радиолокационных и оптических наблюдений.

В 1980 г. Институтом радиотехники и электроники АН СССР совместно с рядом организаций были разработаны и программно реализованы на ЭВМ методика и алгоритмы для построения такой теории на основе общей теории относительности. При этом для описания движения внутренних планет использовались релятивистские дифференциальные уравнения. В число планет, движение которых описывает система дифференциальных уравнений, дополнительно введен Нептун. При обработке наблюдений в расчетные значения времени запаздывания отраженного сигнала вводились релятивистские поправки.

На базе разработанной методики была создана единая релятивистская теория движения внутренних планет.

Это задача независимо решалась также в Институте прикладной математики АН СССР и Институте теоретической астрономии АН СССР.

Построение этой теории осуществлялась на основе радиолокационных и оптических наблюдений Венеры и Марса, использовавшихся ранее при построении частных теорий их движения; радиолокационных наблюдений Венеры, выполненных в СССР в 1977 и 1978 гг.; упомянутых выше радиолокационных наблюдений Венеры, Марса и Меркурия в 1980 г.; радиолокационных наблюдений Меркурия в Аресибо в 1964–1965 гг.; оптических наблюдений Меркурия, выполненных Николаевской обсерваторией АН СССР, Морской обсерваторией США

и Гринвичской астрономической обсерваторией в 1960–1976 гг. Всего было обработано 3768 радиолокационных измерения времени запаздывания отраженного от планет сигнала и 7193 оптических (угловых) измерения.

При обработке определялось 28 параметров: элементы орбит Меркурия, Венеры, центра масс системы Земля–Луна, Марса, астрономическая единица, радиусы Меркурия, Венеры, Марса. Для радиусов Меркурия и Марса получены значения соответственно $2434,9 \pm 1,1$ км и $3394,6 \pm 0,3$ км.

Среднеквадратичные отклонения измеренных расстояний от их значений, вычисленных по этой теории, составляют: для Венеры (в период 1970–1980 гг.) — 0,9 км; для Марса (в период 1967–1980 гг.) — 2,5 км; для Меркурия (в 1980 г.) — 2 км. Эти отклонения в значительной степени обусловлены влиянием рельефа поверхности планет. Отклонения оптических измерений от прогноза по этой теории колеблются в пределах $0'',6-1'',2$.

Чтобы оценить пределы применимости ньютоновской механики при построении таких теорий, вся информация была обработана также и без учета релятивистских поправок. Как и следовало ожидать, согласование измеренных и расчетных дальностей заметно ухудшилось, на отдельных участках орбит появились систематические отклонения, достигающие 390 км для Меркурия, 12 км для Марса и 8 км для Венеры.

Достигнутое при построении единой релятивистской теории движения внутренних планет хорошее согласование измеренных и расчетных данных может рассматриваться как дополнительная экспериментальная проверка общей теории относительности.

Следует отметить, что радиолокационные наблюдения планет за 20-летний период (совместно с оптическими наблюдениями планет и Солнца) дали возможность уменьшить неопределенность знания астрономической единицы почти в 50 тыс. раз и повысить точность теории движения внутренних планет на полтора–два порядка, что позволяет сейчас прогнозировать их взаимное положение с ошибкой меньше 15 км. Эти фундаментальные результаты — крупный вклад в изучение динамики Солнечной системы.

Вращение Венеры и Меркурия

К числу фундаментальных открытий радиолокационной астрономии следует отнести результаты исследования вращения Венеры и Меркурия. Обнаружено три неожиданных явления природы.

Первое — Венера в отличие от всех других больших планет вращается в обратном направлении, противоположном ее обращению по орбите. Второе — обратное вращение Венеры регулируется не Солнцем, а Землей, причем так, что при каждом сближении с Землей Венера почти точно обращена к Земле одной и той же стороной. Третье —

Меркурий за каждого два обращения по орбите делает почти точно три оборота вокруг своей оси. Раньше ошибочно считалось, что Меркурий делает один оборот вокруг своей оси за время одного обращения по орбите, т. е. он все время обращен к Солнцу одной и той же стороной.

До проведения радиолокационных наблюдений период вращения Венеры оценивался величинами от 15 ч до 225 сут. (определение затруднялось облачным покровом Венеры). Ширина спектра частот эхо-сигнала при первой радиолокации Венеры в 1961 г. показала, что планета вращается очень медленно — с периодом больше 100 сут.

Более определенные сведения были получены при следующей радиолокации в 1962 г., когда благодаря существенному повышению чувствительности радиолокатора продолжительность наблюдений удалось увеличить до двух месяцев. Тогда Институтом радиотехники и электроники АН СССР и Лабораторией реактивного движения США независимо было установлено, что Венера вращается в обратном направлении (по сравнению с направлением обращения по орбите вокруг Солнца), причем период ее вращения вокруг оси лежит в пределах 200–300 земных суток. В этих наблюдениях вращение исследовалось по измерениям ширины спектра частот отраженных от планеты радиоволн при облучении ее монохроматическим сигналом.

Ширина спектра частот пропорциональна величине угловой скорости полного относительного вращения, которое можно было бы увидеть с Земли. Это «видимое» вращение складывается из двух составляющих: собственного (сидерического) вращения и кажущегося, являющегося следствием изменения взаимного положения Венеры и Земли. Величина и знак (направление) второй составляющей изменяются во времени; ее значения в зависимости от дат наблюдений вычисляются на основе известного движения планет. В нижних соединениях она максимальна (примерно 0,6 градуса в сутки) и имеет положительный знак; за 21 сутки до нижнего соединения и через 21 сутки после него знак меняется на обратный.

Характер изменения полной угловой скорости видимого вращения будет различным в зависимости от того, какой знак имеет угловая скорость собственного вращения планеты. Если бы она была положительной, соответствующей прямому вращению, то угловая скорость полного видимого вращения Венеры в нижних соединениях была бы наибольшей и уменьшалась бы при отходе от них. Фактически же во всех измерениях вблизи нижних соединений наблюдается противоположная картина; следовательно, направление собственного вращения Венеры — обратное (рис. 6).

В последующих наблюдениях вращение Венеры исследовалось и другими, более точными методами, основанными на слежении за движением обнаруженных на ее поверхности аномально отражающих радиоволны областей. Они проявляются на спектре частот в виде характерных деталей с повышенной спектральной плотностью (рис. 7). Их положение в спектре определяется лучевыми скоростями об-

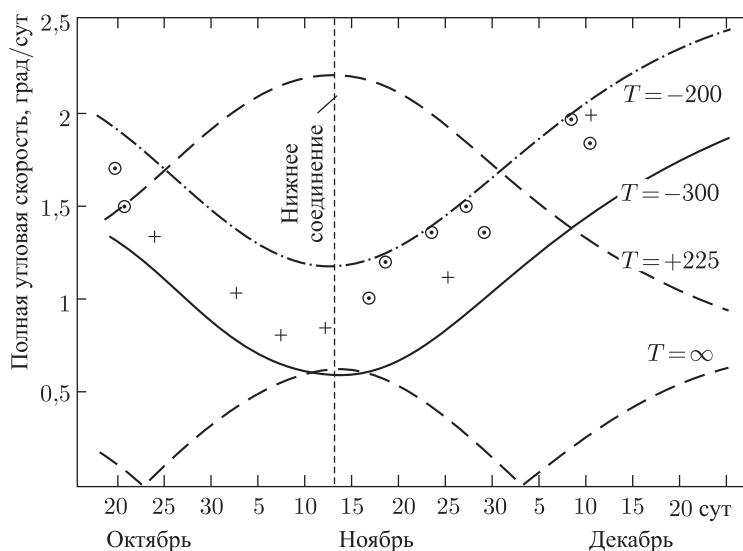


Рис. 6. Определение периода и направления вращения Венеры по наблюдениям в СССР (кружочки) и в США (крестики) в 1962 г. Кривые показывают, как должна была бы изменяться полная угловая скорость видимого вращения Венеры относительно радиолокатора при разных значениях периода T . Измерения указывают на обратное вращение с периодом 200–300 сут.

ластей в момент наблюдения. Слежение за изменением положения деталей в спектре на протяжении длительного времени позволяет определить не только период, но и направление оси собственного вращения планеты и уточнить координаты областей. В совместных советско-английских наблюдениях Венеры в 1966 г. таким методом для периода было получено значение $243,9 \pm 0,4$ сут.

Более точные значения периода вращения Венеры удалось получить при отождествлении деталей спектра от аномально отражающих областей в нижних соединениях разных лет.

В 1972, 1975 и 1977 гг. в СССР измерялись моменты прохождения через центр видимого диска Венеры двух аномально отражающих областей, координаты которых на поверхности планеты были определены еще по наблюдениям 1964 г. Обработка этих измерений дала значение периода $243,04 \pm 0,03$ сут. Аналогичные результаты были получены в США (Арсибо, 1964, 1967 и 1969 гг. — $243,9 \pm 0,1$ сут.; Голдстоун, 1962, 1964, 1966, 1967 гг. — $242,98 \pm 0,04$ сут.).

Эти измерения показывают, что период вращения Венеры в обратном направлении очень близок к синхронному (243,16 сут.), при котором она в каждом нижнем соединении была бы обращена к Земле точно одной и той же стороной (рис. 8). Продолжительность солнечных суток на Венере равна 117 земным суткам. Как показал анализ

радиолокационных наблюдений, ось вращения Венеры почти перпендикулярна к плоскости ее орбиты: отклонение от перпендикуляра не превышает 2° .

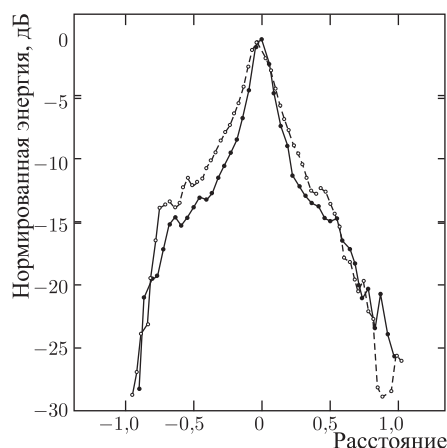


Рис. 7. Распределение энергии эхо-сигналов от Венеры вдоль экватора при монохроматическом облучении на волне 39 см (Крым — Джодрелл Бэнк, 28.01.1966, сплошная линия) и 3,8 см (Хайстек, 01.02.1966, штриховая линия). По горизонтали отложено расстояние от центра видимого диска планеты в долях ее радиуса

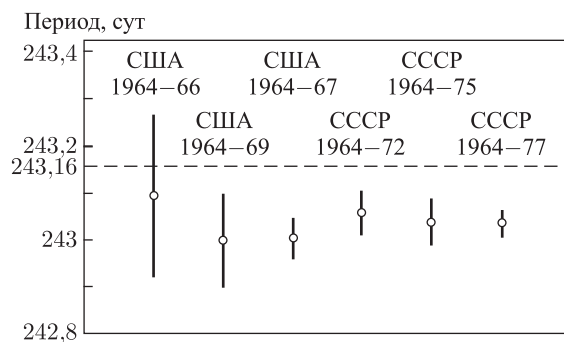


Рис. 8. Интервалы возможных значений периода вращения Венеры по радиолокационным наблюдениям в СССР и США в разные годы

До проведения радиолокационных исследований Меркурия, как уже сказано, астрономы считали, что период его вращения вокруг оси равен периоду обращения вокруг Солнца (88 суток) и что он всегда обращен к Солнцу одной и той же стороной, как Луна к Земле. Однако радиолокационные наблюдения Меркурия, выполненные в Аресибо в 1965 г.

при разных положениях его на орбите, показали ошибочность такого утверждения.

Было обнаружено, что период вращения Меркурия равен 59 ± 3 сут. Последующий детальный анализ старых зарисовок и фотографий поверхности Меркурия привел астрономов к более точному значению периода — $58,65 \pm 0,01$ сут., которое соответствует орбитально-вращательной синхронизации — за 2 обращения по орбите Меркурий делает 3 оборота вокруг оси.

Необходимо пояснить, что прежняя ошибка астрономов была вызвана объективными трудностями наблюдений Меркурия оптическими средствами, а именно близостью к Солнцу и малыми угловыми размерами. Из-за близости к Солнцу астрономы были вынуждены наблюдать Меркурий один раз в году, в период его наибольшего углового удаления от Солнца, когда условия для наблюдений наиболее благоприятны.

За год Меркурий совершает около четырех обращений по орбите и, как сейчас установлено, около шести оборотов вокруг оси, а не около четырех, как ошибочно принимали раньше астрономы. При этом прежние зарисовки и фотографии поверхности Меркурия в пределах их довольно грубого разрешения согласуются как с новым, так и со старым, ошибочным, значением периода.

Поверхность Венеры

Венера окружена плотным облачным покровом, непрозрачным в видимых, ультрафиолетовых и инфракрасных лучах, поэтому ее поверхность недоступна для наблюдений даже самыми совершенными телескопами. Радиоволны же всего дециметрового и примыкающей к нему части сантиметрового диапазонов, используемые в радиолокации, свободно проходят через всю толщу атмосферы планеты. Благодаря этому ее поверхность оказалась доступной («видимой») для наблюдений радиолокационными средствами.

Два десятилетия назад о ней ничего не было известно. Довольно правдоподобной казалась гипотеза о сплошном океане воды, покрывающем всю планету. Не отвергались также гипотезы о сплошном океане нефти и сплошной песчаной пустыне.

Первые достоверные сведения о поверхности Венеры были получены только по результатам радиолокационных наблюдений 1961 и 1962 гг.

Тогда впервые было выяснено, что она сложена из твердых пород, диэлектрическая проницаемость и плотность которых примерно такие же, как у земных скальных пород на силикатной основе. Этот вывод следовал из измерений коэффициента обратного отражения радиоволн и зависимости диаграммы их рассеяния от угла падения на поверхность планеты (коэффициент обратного отражения определяется как отношение энергии принятого эхо-сигнала от планеты к той энергии, которая

принималась бы, если бы планета была гладким идеально проводящим шаром такого же размера).

Средние значения коэффициента отражения на длинах волн 12,5, 39 и 68 см лежали в пределах 11–16%, причем его величина при усреднении на больших площадях очень мало менялась ото дня ко дню (например, на двухмесячном интервале наблюдений 1962 г. в СССР изменение не выходило за пределы 11–18%), что свидетельствовало об изотропной структуре поверхности в глобальном масштабе. Измеренным значениям коэффициента отражения соответствовали значения диэлектрической проницаемости 4–6, которые характерны для плотности грунта 2–3 г/см³. Уместно отметить, что средние коэффициенты отражения поверхностей Марса, Меркурия и Луны примерно в 2 раза меньше, чем у Венеры.

Если первые наблюдения Венеры имели своей целью получение интегральных характеристик отражения и выяснение глобальных свойств поверхности, то позже основное внимание сосредоточилось уже на выявлении отличительных особенностей разных областей. Аномальные области повышенного отражения были обнаружены еще в 1962 г., а затем повторно исследовались в 1964 г. Тогда же была введена венероцентрическая система координат, нулевой меридиан которой проходит через самую яркую область, названную α -областью (широта α -области равна -30°). В этой системе удалось определить координаты и других обнаруженных аномальных областей — тем самым был создан каркас для построения радиолокационных карт.

Первая, еще довольно грубая карта отражательных свойств ограниченной области с разрешением в сотни километров была составлена по наблюдениям в Хайстеке (США) в 1969 г. Карта более обширной области с разрешением 50×50 км² получена по наблюдениям в Голдстоуне в 1969 и 1970 гг. На этих картах нанесены некоторые крупномасштабные материковые образования ограниченных областей. Исследования с разрешением 10×10 км² отдельных областей, имеющих размеры около 1500 км, в экваториальном поясе Венеры начались в Голдстоуне в 1972 г. В одной из таких областей обнаружены более 10 кольцевых кратеров диаметром от 35 до 150 км. Работы по картографированию отдельных участков Венеры с разрешением около 20 км были выполнены в 1976 г. также и в Аресибо.

Большое внимание при радиолокационных наблюдениях Венеры уделялось исследованиям ее рельефа. Для таких исследований доступен экваториальный пояс Венеры в интервале широт $\pm 10^\circ$. Измерения профилей высот поверхности в этом поясе, выполненные на станциях Хайстек и Аресибо в 1967–1970 гг., охватывали восемь полных оборотов Венеры относительно Земли.

Профили высот были получены по измерениям времени запаздывания сигналов, отражавшихся по мере вращения планеты от ближайших к Земле участков ее поверхности. Разрешение вдоль трасс составляло 200–400 км, точность измерений вариаций высот была 0,2–1 км.

Обнаружены две горные местности протяженностью 4 и 2,5 тыс. км, перепады высот которых соответственно составляют около 4 и 3 км. На остальных долготах перепады высот не превышают 2 км.

В СССР измерения профилей высот проводились в 1972, 1975 и 1977 гг. Протяженности трасс составляли около 10 тыс. км, разрешение поверхности вдоль трасс было 40–200 км, точность измерений вариаций высот — 150–300 м (рис. 9, 10).

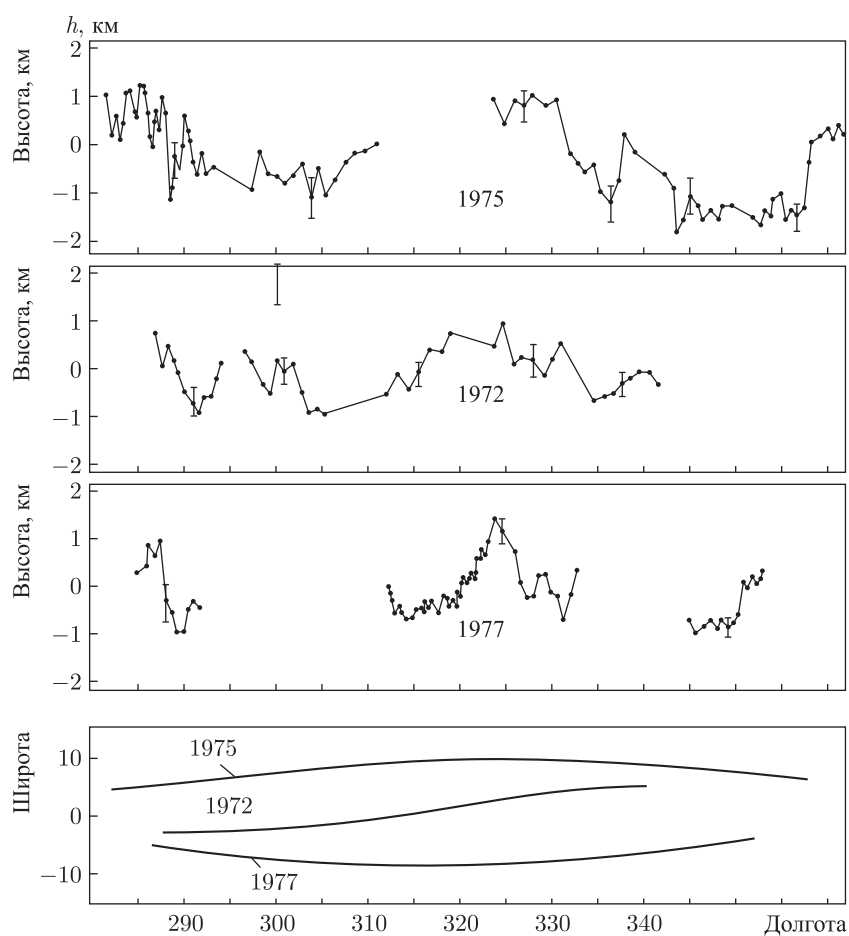


Рис. 9. Профили высот поверхности Венеры, полученные в СССР в 1972, 1975 и 1977 гг. Внизу: трассы, вдоль которых проводились измерения

Одновременно с профилями высот вдоль трасс определялись также наклоны поверхности (по характеру рассеяния радиоволн) и диэлектрическая проницаемость грунта (по измерениям коэффициента отра-

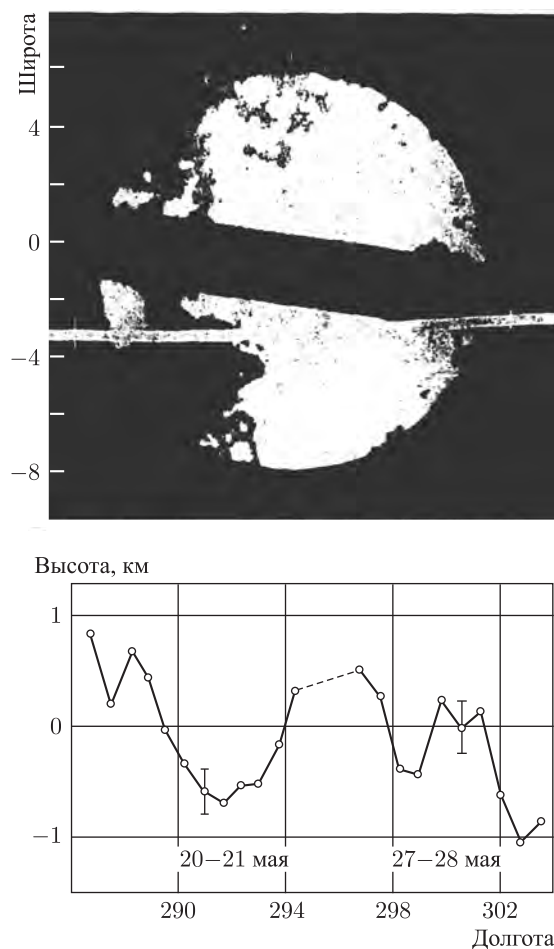


Рис. 10. Сравнение профиля высот поверхности Венеры (СССР, 1972 г.) (внизу) с результатами исследования рельефа кругового участка, по которому проходила трасса измерений профиля (Голдстоун, США, 1973 г.) (вверху). Трасса отмечена белой полосой. На верхнем рисунке большим высотам соответствует большая яркость; всего градаций яркости — четыре (через 500 м)

жения) отдельных областей — анализ этих параметров совместно с вариациями высот дает более полное представление об исследованных районах.

Измеренные перепады высот на всех трассах не превышают 2 км. Обнаружены области с сильно изрезанным профилем (например, в интервале долгот 280° – 290°), где перепады высот 1–2 км наблюдаются на базе 100–200 км, и обширные равнинные области протяженностью

более 1000 км (например, в окрестностях долгот 305° и 350° на широте $+10^\circ$). Горный хребет на долготе 325° так же имеет протяженность больше 1000 км и ширину несколько сотен километров. Равнина на долготе 350° напоминает гигантскую котловину, сложенную из менее плотного материала, чем ее склон на долготе 355° . Характеристики поверхности разных областей меняются в широких пределах: диэлектрическая проницаемость — от 2,7 (что на Земле соответствует сухим, песчаным пустыням) до 6,6 (твердые скальные породы), средние наклоны поверхности — от $2,5^\circ$ до 5° .

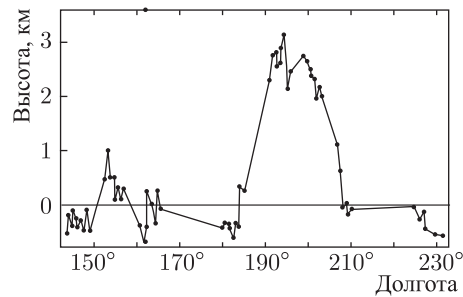


Рис. 11. Профиль высот участка поверхности Венеры (СССР, 1980 г.). Трасса измерений проходит от $2,4^\circ$ ю.ш. (слева) до $3,7^\circ$ ю.ш. (справа)

В наблюдениях Венеры в СССР, выполнявшихся в 1980 г. на расстоянии до 161 млн км, трасса исследований лежала в другом интервале долгот и имела протяженность около 14 тыс. км. Она проходила по упомянутым выше двум горным районам. Наибольшая высота первого из них на широте трассы оказалась около 4 км (на долготе 90°), высота второго — около 3 км (на долготе 193°). Для второго района получен подробный профиль высот с разрешением по долготе около 40 км (рис. 11).

Поверхность Марса

Осуществить радиолокацию Марса гораздо труднее, чем радиолокацию Венеры из-за большего его удаления от Земли, меньших размеров и сравнительно быстрого вращения. Скорость вращения Марса примерно в 400 раз больше скорости видимого вращения Венеры в нижнем соединении. В большинстве противостояний (за исключением великих, которые повторяются только через 17 лет) он приближается к Земле всего лишь на 80–100 млн км. Обнаружение эхо-сигнала от Марса на таких расстояниях требует примерно в 500–1000 раз более чувствительных радиолокаторов, чем от Венеры в нижних соединениях.

Вместе с тем если чувствительность радиолокатора уже повышена до требуемой величины, то благодаря быстрому вращению Марса и большему наклону его оси к плоскости эклиптики (около 25°) возмож-

ности для детального исследования его поверхности много лучше, чем для исследования медленно вращающейся Венеры.

Вследствие быстрого вращения за время одного ночного цикла наблюдений (при приближении к Земле Марс виден только в ночное время), скажем за 8 часов, ближайšie к Земле точки марсианской поверхности, проходящие через центр его видимого диска, прочерчивают на ней линию (трассу) протяженностью 120° по долготе.

Марс вращается несколько медленнее Земли, поэтому положения таких (однодневных) трасс на его поверхности смещаются ото дня ко дню примерно на 9° по долготе (полный цикл в 360° занимает около 40 сут.). Из-за наклона оси вращения, который вызывает непрерывное изменение ее ориентации относительно земного наблюдателя по мере движения Марса и Земли по орбитам, трассы медленно смещаются также и по широте.

Так как взаимное расположение планет на орбитах в противостояниях разных лет варьируется, то трассы наблюдений проходят по разным широтам, возможный интервал которых составляет $\pm 25^\circ$ от экватора.

Первая серия радиолокационных наблюдений Марса на разных длинах волн была выполнена в 60-х годах: в Крыму (1963 г., 39 см), Голдстоуне (1963, 1965, 1969 гг., 12,5 см), Милстоуне (1965 г., 23 см), Аресибо (1965 г., 70 см), Хайстеке (1967, 1969 гг., 3,8 см). Трассы ближайших к Земле точек в этих наблюдениях проходили в северном полушарии Марса.

Исследования показали, что коэффициент обратного отражения радиоволн не зависит от длины волны. Его среднее значение равно 0,07. Оно примерно такое же, как у Луны, но несколько больше, чем у Меркурия, и в два раза меньше, чем у Венеры. В то же время локальные участки поверхности Марса дифференцированы по своим свойствам значительно больше, чем у Венеры и Меркурия. Например, коэффициент отражения меняется в зависимости от координат на поверхности в широких пределах — от 0,03 до 0,14.

Наиболее интенсивные эхо-сигналы обусловлены зеркальным отражением от гладких участков поверхности в небольших окрестностях ближайшей точки. Для этих участков значения коэффициента отражения (12–14%) примерно такие же, как и у земных скальных пород, имеющих диэлектрическую постоянную около 4,5, что соответствует плотности около $2,5 \text{ г/см}^3$.

Низкая отражательная способность некоторых областей Марса может быть обусловлена либо большой их шероховатостью (неровности в масштабе длины волны приводят к уменьшению зеркального отражения), либо малой плотностью вещества поверхности (большее поглощение радиоволн и меньший коэффициент отражения), либо совместным действием этих причин — слабый уровень эхо-сигналов не позволил выяснить истинную причину.

Необходимо отметить, что малому коэффициенту отражения (3–4%) соответствуют плотности вещества всего $0,8\text{--}1,0\text{ г/см}^3$. Такую плотность может, например, иметь мелкая пыль, покрывающая эти участки поверхности. Эта пыль даже в условиях разреженной марсианской атмосферы может долгое время находиться во взвешенном состоянии и быть источником марсианских пылевых бурь.

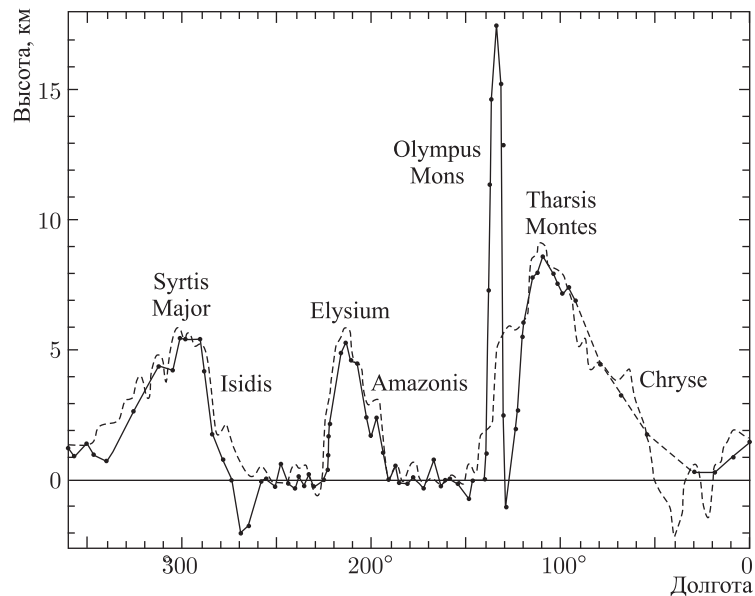


Рис. 12. Профиль высот поверхности Марса вдоль 21-й параллели с.ш. (Крым, 1980 г. — сплошная линия; Хайстек, 1967 г. — штриховая). Разрешение по долготе в основном составляло 4° (240 км); область в интервале долгот $120^\circ\text{--}150^\circ$ анализировалась в Крыму с разрешением около $1,5^\circ$ (90 км)

Марс по сравнению с другими внутренними планетами и Луной имеет наиболее гладкую поверхность.

Среднеквадратичное значение наклонов неровностей в масштабе нескольких десятков длин радиоволн меняется для разных областей в широких пределах — от $0,5^\circ$ до 6° , но средняя его величина примерно в 2 раза меньше, чем у Венеры, и в 3 раза меньше, чем у Меркурия и Луны.

Первые радиолокационные измерения профиля высот поверхности Марса вдоль 21-й параллели с.ш. были выполнены в Хайстеке в 1967 г. Аппаратурная разрешающая способность по расстоянию была равна 9 км, однако относительные изменения высот измерялись с точностью до 1 км.

Благоприятные условия для радиолокационных наблюдений Марса имелись во время великого противостояния 1971 г. Радиолокация

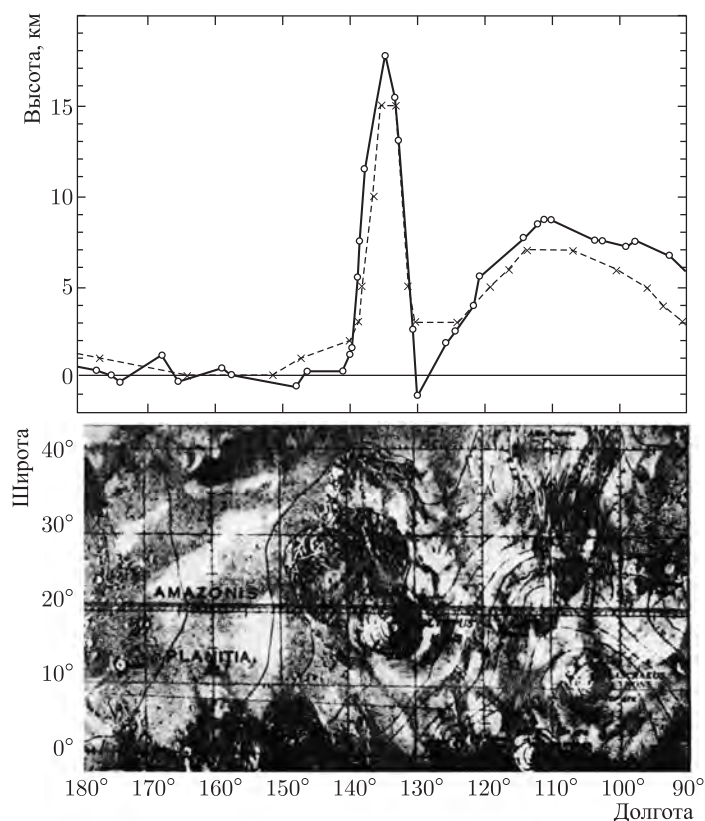


Рис. 13. Вверху: профили высот участка поверхности Марса в интервале долгот 90° – 180° вдоль 21-й параллели с.ш. по измерениям в СССР в 1980 г. (сплошная линия) и по карте, помещенной внизу (штриховая линия). Для совмещения с картой полученный в СССР профиль сдвинут по долготе на $-1,8^{\circ}$. Внизу: топографическая карта участка поверхности Марса, составленная по фотоснимкам космического аппарата «Маринер-9» (США). Прямая линия — трасса, вдоль которой измерялся профиль высот (вверху) при радиолокации Марса в СССР

в этот период проводилась в Крыму, Хайстеке и Голдстоуне. Трассы исследований проходили в южном полушарии планеты и охватывали по широте пояс от -14° до -23° . Вдоль трасс были получены профили высот и характеристики отражения радиоволн локальными участками поверхности. Общий перепад высот от самых высоких гор (около 8 км) до самых низких впадин (около 8 км) в исследовавшемся поясе широт составил около 16 км.

Радиолокационные исследования отражательных и физических характеристик в южном полушарии экваториального пояса Марса, вы-

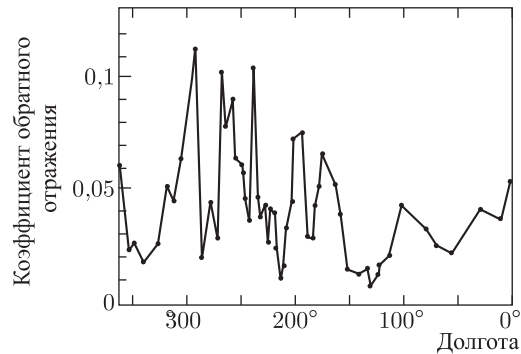


Рис. 14. Вариации коэффициента обратного отражения Марса вдоль 21-й параллели с.ш. (СССР, 1980 г.)

полненные в 70-х годах, показали, что параметры локальных участков поверхности меняются в таких же широких пределах, как и в северном полушарии.

Интересные новые сведения о поверхности Марса удалось получить при его радиолокации в СССР в 1980 г. Вдоль 21-й параллели северной широты, проходящей через горные массивы Tharsis, Olympus Mons, Elysium, Syrtis Major, проведены измерения профиля высот поверхности (рис. 12, 13) и коэффициента обратного отражения радиоволн (рис. 14). Расстояние до Марса (100–135 млн км) измерялось с точностью до 0,6 км.

Трасса измерений проходила по северному склону горы Olympus Mons, где была измерена максимальная на этой широте высота — $17,5 \pm 1,5$ км. Средняя крутизна склонов горы, оцененная из отношения высоты к полуширине подножия на нулевом уровне, составляет $3,6^\circ$. Обнаружено, что западный склон горы отделен от горного массива Tharsis впадиной, глубина которой на 1 км меньше среднего уровня поверхности. Другая впадина глубиной до 2 км находится на долготе 270° в области Isidis. Гора Olympus Mons и эти впадины не были ранее зафиксированы на профиле высот, полученном в Хайстеке на этой же широте (см. рис. 12).

Коэффициент отражения Марса вдоль трассы меняется более чем на порядок — от 0,01 до 0,12 (см. рис. 14). Аномально низкое его значение в горных районах Olympus Mons и Elysium может быть связано с особой структурой их поверхности: в них мала доля участков, ориентированных перпендикулярно падающему лучу радиоволн. Наибольшее его значение приходится на плоскогорье Syrtis Major; там наблюдается сильное зеркальное отражение от крупномасштабных гладких областей.

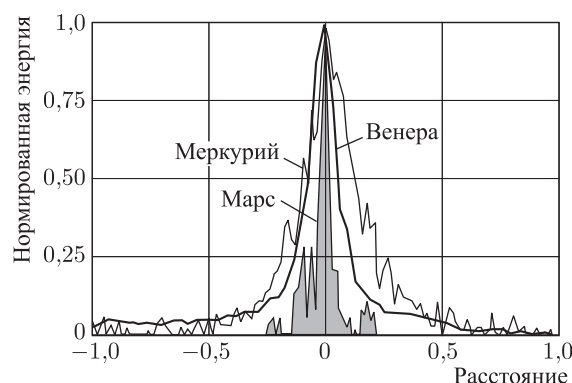


Рис. 15. Распределение энергии эхо-сигналов от Меркурия, Венеры и Марса вдоль экватора на волне 39 см (СССР, 1980 г.). По горизонтали отложено нормированное расстояние от центра видимого диска соответствующей планеты в долях ее радиуса. Время усреднения энергии эхо-сигналов — около 12 мин. Для Венеры и Марса распределения имеют меньшую ширину, чем для Меркурия, что говорит о большей гладкости поверхности этих двух планет

Поверхность Меркурия

Осуществить радиолокацию Меркурия почти так же трудно, как и радиолокацию Марса. Минимальные расстояния до Меркурия в разных нижних соединениях меняются в пределах 80–100 млн км, как и в большинстве противостояний Марса. Геометрическая площадь его поперечного сечения в 2 раза меньше, чем у Марса, поверхность же в несколько раз более шероховата, вследствие чего уменьшается доля зеркального отражения радиоволн от его поверхности. Правда, по сравнению с Марсом он вращается в 60 раз медленнее, благодаря чему выделение его эхо-сигналов из шумов приемника упрощается.

Первые радиолокационные наблюдения Меркурия на разных длинах волн были выполнены в Крыму (1962 г., 39 см), Голдстоуне (1963 г., 12,5 см), Аресибо (1964 г., 70 см), Хайстеке (1966 г., 3,8 см). Основная задача этих и последующих наблюдений в 60-х годах заключалась в получении астрометрической информации о скорости планеты и о расстоянии до нее. Эта информация была необходима для независимого определения астрономической единицы и уточнения орбит не только Меркурия, но и Венеры и Земли, поскольку на их движение Меркурий оказывает заметное гравитационное влияние, зависящее от его положения на орбите.

Одновременно с астрометрическими данными были получены средние (глобальные) характеристики отражения радиоволн поверхностью Меркурия: коэффициент отражения и распределение энергии эхо-сигналов по запаздыванию и частоте.

Аппаратурная разрешающая способность в наблюдениях 60-х годов была недостаточна для измерения профиля высот и детального изучения характеристик локальных участков поверхности Меркурия. Такие исследования с разрешением поверхности по экватору около 40 км и высоты около 1 км удалось выполнить только в начале 70-х годов после повышения чувствительности радиолокаторов. Обнаруженные перепады высот достигают 3 км с точностью измерений ± 500 м.

Основная задача радиолокационных наблюдений Меркурия, выполненных в СССР в 1980 г., состояла в получении высокоточной астрометрической информации о его расстоянии и скорости. Аппаратурная разрешающая способность при измерениях расстояния составляла 1,2 км, при измерениях скорости — 5 см/с.

Среднестатистические характеристики отражения радиоволн поверхностью Меркурия очень близки к значениям, полученным при исследованиях Луны. При этом в отличие от того, что наблюдается на Марсе и Венере, характеристики мало зависят от долготы, хотя изменения коэффициента отражения в 2 раза в зависимости от долготы также наблюдаются. Средние его величины на разных длинах волн хорошо согласуются между собой и лежат в пределах 0,055–0,065 (для Луны в этом же диапазоне радиоволн они меняются в пределах 0,065–0,075).

Поверхности Меркурия и Луны похожи между собой по степени их неровности (шероховатости): как и у Луны, средние наклоны поверхности Меркурия монотонно возрастают с уменьшением длины волны от 6° на волне 70 см до $9,7^\circ$ на волне 3,8 см. Величина наклонов примерно в 1,5 раза больше, чем у Венеры, и в 3 раза больше, чем у Марса. Относительную степень шероховатости этих планет наглядно показывает рис. 15.

Кольца Сатурна

Еще в прошлом веке теоретически и экспериментально было доказано, что кольца Сатурна состоят из огромного количества частиц, независимо обращающихся вокруг планеты по кеплеровским орбитам с разными скоростями. Что же касается размеров и состава частиц, то однозначного ответа на этот вопрос не было. На основе многочисленных наблюдений вблизи инфракрасного диапазона частот в последнее время было сделано заключение, что кольца Сатурна состоят из мельчайших частичек льда диаметром около 70 мкм. Однако имелись доводы и в пользу того, что кольца — это конгломерат обломков льда (либо другого вещества, покрытого льдом) разных размеров (от нескольких метров до сантиметра и менее).

Более определенные выводы о размерах и составе частиц удалось сделать только по результатам радиолокации колец Сатурна.

Первые эхо-сигналы от колец Сатурна удалось получить с помощью радиолокатора в Голдстоуне на волне 12,6 см в 1972–1973 гг. Большим

сюрпризом для исследователей этой планеты явилась непредвиденно большая величина суммарной площади частиц, участвующих в переотражении радиоволн обратно к локатору: она оказалась равной 68% от видимой с Земли геометрической площади колец. Такая величина могла получиться только в том случае, если размеры частиц в кольцах больше 1 см, что находилось в противоречии с прежними выводами.

В конце 1974 – начале 1975 г. радиолокация колец Сатурна в Голдстоуне была выполнена на волнах 3,5 и 12,5 см. В последнем случае зондирующий сигнал излучался из Аресибо, а прием эхо-сигналов осуществлялся в Голдстоуне.

Из анализа всех наблюдений вытекало, что отражение от колец Сатурна полностью деполяризовано и не зависит от длины волны. Совместная обработка этих результатов с данными радиоастрономических и оптических наблюдений показала, что частицы в кольцах Сатурна представляют собой очень шероховатые, многогранные кусочки водяного льда со средним поперечным размером около 4 см. Суммарный эхо-сигнал от колец Сатурна формируется путем многократного переотражения радиоволн (почти без потерь) от поверхностей частиц.

Новые сведения дала радиолокация колец Сатурна в январе 1976 г., проводившаяся в Аресибо на волне 12,5 см. Применение модулированного сигнала дало возможность разделять эхо-сигналы одновременно по запаздыванию и частоте и получить радиальное распределение частиц по кольцевым зонам. Обнаружено заметное количество частиц и в ближнем к планете, оптически темном кольце.

Локализация эхо-сигналов по запаздыванию и частоте показала отсутствие эхо-сигнала от пространства, занимаемого самой планетой (радиоволны поглощаются обширной атмосферой Сатурна).



Рис. 16. Антенна Центра дальней космической связи, использовавшаяся в планетном радиолокаторе СССР до 1980 г.

Планетный радиолокатор

В Советском Союзе радиолокационные исследования планет проводятся Институтом радиотехники и электроники АН СССР совместно с рядом организаций. Планетный радиолокатор на длине волны 39 см был создан в 1961 г. на базе антенны (рис. 16) и передатчика Центра дальней космической связи в Крыму. Впоследствии, как уже отмечалось, радиолокатор непрерывно совершенствовался с целью повышения его чувствительности и точности измерений.

В 1962 г. чувствительность радиолокатора была повышена главным образом благодаря применению на входе приемного устройства маломощного парамагнитного усилителя (мазера) на кристалле рубина, охлаждаемом жидким гелием до 4 К (-269° С). В дальнейшем ее повышение достигалось путем увеличения мощности передатчика, модернизации антенны, применения более совершенных методов обработки эхо-сигналов с помощью вычислительных машин и усовершенствования измерительного комплекса аппаратуры. Кардинально чувствительность радиолокатора была увеличена в 1980 г. благодаря применению новой антенны с диаметром зеркала 70 м (см. рис. 2) и более мощных передатчиков.

По сравнению с обычной планетная радиолокация имеет ряд отличительных особенностей.

Принимаемые эхо-сигналы от планеты очень слабы, для выделения их из флюктуационных шумовых помех приемной аппаратуры требуется длительное накопление и усреднение, которое при очень слабом сигнале может достигать до десятков часов (отношение энергии эхо-сигнала к интенсивности флюктуационных помех на выходе накопителя растет пропорционально квадратному корню из времени накопления).

Прием сигнала, отраженного от планеты, происходит после его излучения через значительный, непривычный для обычной радиолокации промежуток времени, в течение которого радиоволны распространяются до планеты и обратно (так, для Венеры он колеблется в пределах от 4,5 до 29 мин, а для Марса доходит до 45 мин). В связи с этим сеанс радиолокационного наблюдения планеты включает два интервала времени: в первом из них зондирующий сигнал непрерывно излучается к планете, во втором производится прием возвращающегося отраженного от нее сигнала.

Положение и движение планеты относительно радиолокатора может быть рассчитано с большой точностью заранее, еще до начала сеанса наблюдения. Когда проводилась первая радиолокация Венеры, расстояние до нее можно было прогнозировать с точностью ± 20 тыс. км; сейчас же после уточнения астрономической единицы и построения более точной теории движения внутренних планет расстояние до них прогнозируется с точностью до 10–15 км.

Высокая точность предварительного расчета позволяет измерить запаздывание и доплеровское смещение частоты эхо-сигналов на основе аппаратного отсчета (воспроизведения) их прогнозируемых значений и определения отклонений от прогноза, что резко сокращает интервал измерений при обработке эхо-сигналов.

Наконец, необходимо особо отметить, что требуемые и уже достигнутые относительные точности измерений в планетной радиолокации на несколько порядков выше, чем в обычной радиолокации; например, расстояние до планет сейчас измеряется с относительной точностью до $2 \cdot 10^{-9}$, тогда как необходимые для обычной радиолокации точности не превышают 10^{-6} .

Далее для тех, кого это интересует, мы поясним подробнее принцип построения и работы радиолокатора.

Радиолокатор построен по принципу когерентно-синхронной системы: в нем все колебания, необходимые для формирования излучаемого сигнала, гетеродинных сигналов приемника, опорных сигналов в системе обработки принятых эхо-сигналов, а также сигналы для отсчета интервалов времени в программно-временном устройстве синтезируются из одного высокостабильного эталонного сигнала задающего генератора путем умножения, деления и преобразования частот.

Частоты и фазы всех колебаний при такой структуре локатора связаны между собой точно известными соотношениями и имеют высокую стабильность, определяемую стабильностью эталонного сигнала, что позволяет получить высокую точность частотно-временных измерений. В качестве задающего генератора в 60-х годах использовался прецизионный кварцевый генератор со стабильностью частоты около 10^{-9} , а в 70-х — водородный эталон частоты со стабильностью лучше чем 10^{-12} . С такой же точностью известно и истинное значение его частоты, что особенно важно для определения точных промежутков времени при измерениях запаздывания эхо-сигналов.

Программно-временное устройство (хронизатор) позволяет отсчитывать прогнозируемую задержку на запаздывание эхо-сигналов длительностью до 10 000 с с дискретностью 0,1 мкс путем счета числа периодов эталонного сигнала с частотой колебаний 10 МГц.

Цифровой синтезатор с программным изменением частоты дает расчетный ход доплеровского смещения с точностью до 0,01 Гц в диапазоне ± 300 кГц.

Для одновременного измерения запаздывания и частоты эхо-сигналов в радиолокаторе СССР с 1962 г. применяются линейно-частотно-модулированные радиосигналы (ЛЧМ-сигналы), частота колебаний которых периодически изменяется по пилообразному линейному закону (рис. 17). В США для этих целей используются сигналы с фазо-импульсной кодовой модуляцией. Применение линейной частотной модуляции оказалось очень эффективным после того, как в 1962 г. был разработан специальный генератор, обеспечивающий строгую линейность изменения частоты.

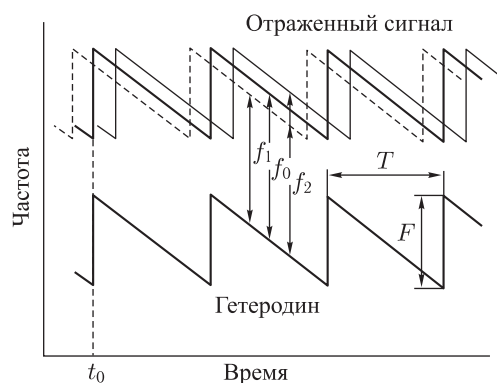


Рис. 17. Изменение частоты при линейной частотной модуляции (ЛЧМ) отраженного сигнала на входе приемника (вверху) и гетеродинного сигнала (внизу). t_0 — расчетное время запаздывания эхо-сигнала; f_0 — номинальная частота; f_1 — частота ниже номинальной, а f_2 — выше номинальной; T — период модуляции; F — девиация частоты

Было предложено синтезировать модулированное колебание из достаточно коротких отрезков синусоид возрастающей или убывающей частоты, сращиваемых в моменты одновременного перехода через нуль. Набор сращиваемых синусоидальных колебаний формируется из эталонного сигнала, благодаря чему достигается высокая стабильность и повторяемость формы синтезированного сигнала. В новом комплексе аппаратуры радиолокатора формирование ЛЧМ-сигнала осуществляется на принципе прямого цифрового синтеза с применением интегральных микросхем.

Движение планеты относительно локатора приводит к изменению запаздывания эхо-сигнала. Был предложен оригинальный способ учета движения планеты, состоящий в том, что в частоту эталонных колебаний, из которых формируется модулированный сигнал, вводится поправка на прогнозируемое значение доплеровского смещения, приведенного к этой частоте. В этом случае каждый период излучаемого сигнала изменяется в соответствии с ожидаемым текущим значением скорости планеты, а период принимаемого отраженного сигнала остается постоянным как от неподвижной цели, что позволяет производить его накопление и усреднение без ухудшения точности измерения запаздывания.

Начало модуляции зондирующего ЛЧМ-сигнала, излучаемого в направлении планеты, «привязывается» к сигналам единого всемирного времени. Во время приема эхо-сигнала ЛЧМ-сигнал формируется повторно и подается в гетеродин приемника, где используется в качестве опорного гетеродинного колебания для демодуляции принимаемых сигналов; при этом начало его модуляции задерживается на прогнозируемое время распространения радиоволн до планеты и обратно.

Поверхность планеты можно рассматривать как совокупность независимых точечных отражателей, которые расположены на разном расстоянии от локатора и имеют относительно него разную скорость движения, обусловленную вращением планеты. Поэтому эхо-сигнал от планеты представляет собой сумму парциальных эхо-сигналов с разными запаздываниями и доплеровскими смещениями частоты.

Изменение частоты каждого из парциальных эхо-сигналов на входе приемника (см. рис. 17) повторяет изменение частоты излучаемого ЛЧМ-сигнала с запаздыванием, определяемым его временем распространения. Частота гетеродинного сигнала изменяется по такому же закону — начало его модуляции соответствует расчетному моменту t_0 прихода эхо-сигнала от ближайших к Земле участков поверхности планеты. Частота сигнала на выходе приемника равна разности частот эхо-сигнала и гетеродина; она зависит как от фактического запаздывания парциального эхо-сигнала, так и от его доплеровского смещения. Если фактические значения запаздывания и доплеровского смещения равны прогнозируемым значениям, то частота на выходе приемника равна номинальному значению f_0 .

Если эхо-сигнал приходит несколько раньше, то выходная частота большую часть времени будет ниже номинальной (f_1); если же позже, то выше номинальной (f_2). В общем случае отклонение частоты на выходе приемника от номинального значения будет пропорционально разности между фактическим запаздыванием парциального эхо-сигнала и прогнозируемой задержкой гетеродинного ЛЧМ-сигнала.

От каждого входного парциального эхо-сигнала на выходе приемника образуется периодический выходной парциальный сигнал. Суммарный выходной сигнал, образующийся в результате преобразования всех парциальных эхо-сигналов от разноудаленных точек поверхности, также периодический (с тем же периодом). Спектр частот суммарного выходного сигнала, образующийся в результате интерференции спектров отдельных парциальных сигналов (рис. 18, *a*), имеет линейчатую структуру (как и у любого периодического сигнала). Линии спектра располагаются на частотах, отстоящих от номинальной частоты через промежутки, кратные частоте повторения пилообразной модуляции.

Может показаться, что спектр (поскольку запаздывание отдельных парциальных эхо-сигналов меняется непрерывно) тоже должен быть непрерывным. Однако, как показывает детальное рассмотрение, это не так. Оказывается, что при разложении в спектр энергия парциальных эхо-сигналов, частота которых должна была бы попасть в промежуток между спектральными линиями, распределяется на ближайшие дискретные спектральные линии.

На рис. 18, *a* приведен в качестве примера спектр отраженных от Венеры сигналов после гетеродинирования. Если бы Венера не вращалась, то этот спектр, как от периодического сигнала, был бы линейчатым (вертикальные линии на рис. 18, *a*).

В случае «невращающейся» Венеры левая спектральная линия обусловливается эхо-сигналами, отраженными от ближайшей к нам зоны Венеры (зона I на рис. 18, б). Следующая, спектральная линия — от кольцевой зоны II, расположенной несколько дальше, и т. д. Строго говоря, зоны, обуславливающие отдельные спектральные линии, не разделяются резкой границей: они отчасти перекрывают друг друга.

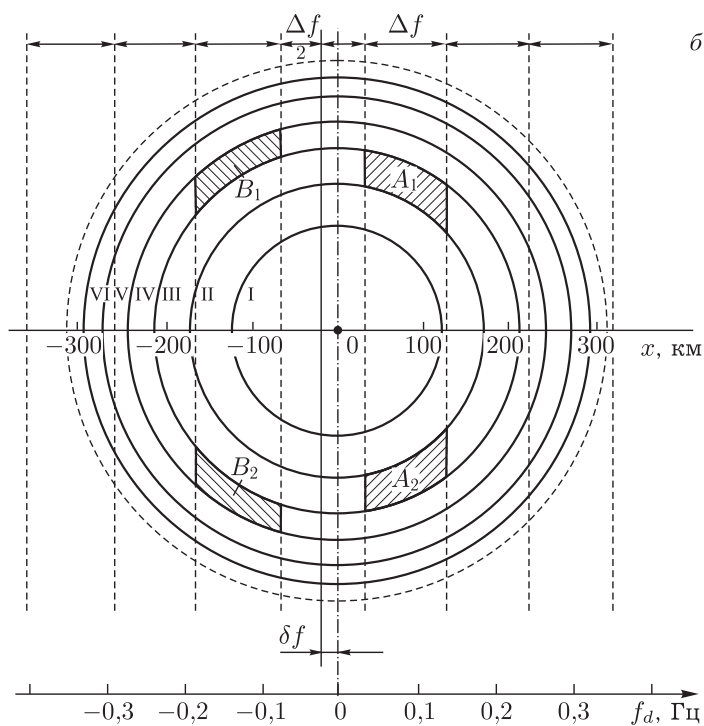
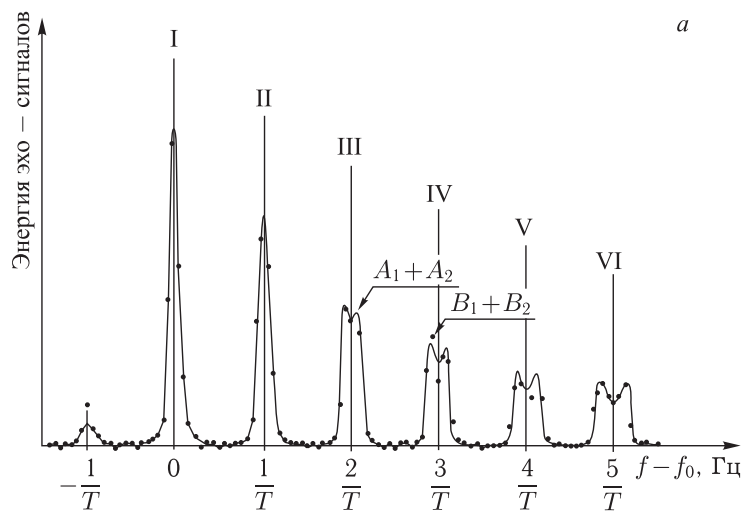
В случае вращения Венеры спектральные линии размываются вследствие того, что частоты парциальных эхо-сигналов от элементов зоны, приближающихся к локатору, будут из-за доплеровского смещения несколько увеличиваться, а удаляющихся — уменьшаться. На рис. 18, б показаны величины этих смещений для случая спектра на рис. 18, а. Ясно, что чем больше номер зоны, тем больше получается расширение линии.

Изучая спектр, можно разделить отражения от разных частей планеты. Так, отражение от заштрихованных элементов на рис. 18, б обуславливает спектральные составляющие, отмеченные на рис. 18, а стрелками.

В случае когда ось вращения планеты точно перпендикулярна направлению на локатор, разделить сигнал от элементов поверхности, симметрично лежащих относительно экватора, описанным методом не удается. Когда же (как это имеет место у Венеры) ось неперпендикулярна, разделение произвести возможно путем локаций планеты на разных участках орбиты.

Средние частоты всех подспектров соответствуют отражениям от точек поверхности, для которых доплеровское смещение, вызываемое

Рис. 18. а — спектрограмма отраженного Венерой ЛЧМ-сигнала после демодуляции (Крым, 1978 г.). Период модуляции $T = 0,512$ с. Девиация частоты $F = 128$ кГц (соответствует разрешению по дальности 1,2 км). Время усреднения — 4,5 мин. $(f - f_0)$ — отклонение частоты f демодулированного сигнала от номинального значения f_0 . Точки — значения энергии эхо-сигналов в полосах Δf (см. рис. б); $(A_1 + A_2)$ и $(B_1 + B_2)$ — энергия парциальных эхо-сигналов от заштрихованных на рис. б участков поверхности. Сплошная линия — теоретическая спектрограмма для изотропно-отражающей поверхности. Римские цифры — номера подспектров эхо-сигнала от отдельных кольцевых зон дальности (см. рис. б). Вертикальные линии — половина суммарной энергии эхо-сигнала в каждом из подспектров. б — центральная часть видимого диска Венеры, ответственная за отражение эхо-сигналов, спектрограмма которых показана на рис. а. Окружности — границы разрешаемых кольцевых зон (римские цифры), отстоящих друг от друга на 1,2 км (по дальности). Вертикальные штриховые линии — границы полос, разделяемых по частоте с разрешением $\Delta f = 0,122$ Гц. x — расстояние в экваториальном направлении; f_d — доплеровское смещение, вызываемое вращением планеты; δf — групповое смещение подспектров по частоте из-за неточной компенсации доплеровского смещения, вызываемого движением планеты по орбите. A_1 и A_2 (B_1 и B_2) — участки поверхности, разрешаемые по запаздыванию и частоте эхо-сигнала совместно (см. рис. а)



вращением планеты, равно нулю. Поэтому по групповому смещению средних частот подспектров от их номинальных положений, известных с высокой точностью (лучше чем $0,01$ Гц), можно определить некомпенсированную часть (отклонение от прогноза) доплеровского смещения, вызываемого движением планеты по орбите. При этом однозначное определение можно получить только в том случае, если отклонение от прогноза не превышает половины частоты повторения модуляции.

При радиолокации планет использовались в основном два значения девиации (полного отклонения частоты): 128 кГц, при которой обеспечивается разрешение по запаздыванию 8 мкс ($1,2$ км по дальности), и 32 кГц, при которой оно составляет 32 мкс ($4,7$ км по дальности).

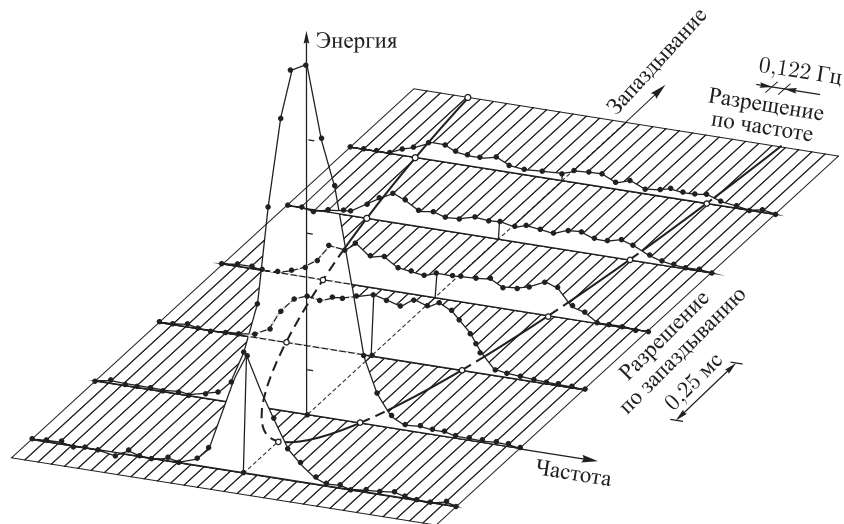


Рис. 19. Двухмерное распределение энергии отраженных Венерой радиоволн по запаздыванию (дальности) и доплеровскому смещению частоты (вдоль экватора) (СССР, 1970 г.)

Период модуляции выбирается таким образом, чтобы обеспечить разделение спектров отдельных зон. При радиолокации Венеры и Меркурия использовались периоды модуляции от $0,06$ до 4 с, при радиолокации Марса — от $0,008$ до $0,064$ с.

Система обработки эхо-сигналов при использовании зондирующих ЛЧМ-сигналов получается проще, чем при применении других видов модуляции (импульсной, фазо-импульсной и др.), так как она сводится к одноканальной системе спектрального анализа. При других видах модуляции требуются многоканальные системы обработки.

Оперативная обработка отраженных от планеты сигналов во время их приема с целью контроля работы радиолокатора и коррекции прогнозируемого запаздывания производится специализированным

цифровым устройством, позволяющим анализировать текущий спектр принимаемого сигнала во всей полосе частот с разрешением от 0,25 до 16 Гц.

Полная обработка принимаемых сигналов осуществляется с помощью универсальной ЭВМ. Для этого в процессе приема они сначала регистрируются на магнитных лентах в аналоговом и цифровом видах. В аналоговом варианте одновременно с сигналом записывается также опорное эталонное колебание, с помощью которого осуществляется временная и частотная калибровка при обработке зарегистрированных эхо-сигналов:

На первом этапе полной обработки в ЭВМ выполняется спектральный анализ сигналов с разрешением по частоте 0,122 Гц при радиолокации Венеры, 0,5 Гц — Меркурия и 16 Гц — Марса. В результате получается 256 (или 512) коэффициентов Фурье-разложения энергетического спектра и синтезируется двухмерное распределение энергии отраженных сигналов по запаздыванию и частоте (рис. 19).

На втором этапе полученное двухмерное распределение анализируется с целью извлечения интересующей нас информации.