

РАДИОЛОКАЦИЯ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ПЛАНЕТ

В. А. Котельников, О. Н. Ржига

Сборник «90 лет Радио». Москва: Радио и связь, 1985. С. 171–181

Радиолокация небесных тел основана на тех же физических принципах, что и обычная наземная радиолокация, разница состоит лишь в дальности действия, достигающей межпланетных расстояний.

В первых опытах по радиолокации Луны, проведенных в 1946 г. в США и Венгрии, использовались военные радиолокационные станции, предназначенные для обнаружения самолетов. Однако, чтобы обнаружить сигнал, отраженный, например, Венерой, энергетический потенциал радиолокационной установки надо было увеличить в 10^7 раз, а для обнаружения сигнала от Марса, который меньше Венеры, находится дальше и вращается быстрее ее, — в 10^9 раз.

Необходимые условия для радиолокации планет появились к началу 60-х гг., когда для управления полетом и приема информации с межпланетных станций были созданы большие зеркальные параболические антенны, мощные передатчики с усилительными кलिстродами и малошумящие приемники с параметрическими и парамагнитными усилителями, высокостабильные стандарты частоты и времени, а также ЭВМ. Требовалось лишь разработать и создать аппаратуру для выделения отраженного сигнала и определения его параметров.

В Советском Союзе первые радиолокационные наблюдения Венеры были проведены в апреле 1961 г. При этом использовались антенна и передатчик непрерывного излучения на волне 39 см Центра дальней космической связи в Крыму под Евпаторией. На входе приемного устройства был установлен параметрический усилитель.

Для обнаружения слабого отраженного сигнала на фоне флуктуационного шума приемной аппаратуры нужно было обеспечить длительное накопление информации (от единиц до десятков часов), а также измерить его энергию и частоту на выходе приемника. Это осуществлялось многоканальным анализатором спектра при излучаемом сигнале в виде простой периодической последовательности, состоящей из импульсов и пауз равной длительности. Доплеровское смещение частоты, вызванное движением планеты относительно антенны радиолокационной установки, оценивалось по изменению средней частоты отраженного сигнала, скорость вращения планеты — по ширине его спектра.

Наличие астрономических таблиц, позволяющих рассчитать предполагаемое расстояние и скорость планеты относительно антенны ра-

диолокационной установки, резко сокращало диапазон измерений за счет того, что измерялись не полные значения доплеровского смещения частоты или времени запаздывания отраженного сигнала, а их отклонения относительно расчетных значений. Специальный генератор изменял несущую частоту передатчика так, чтобы прием отраженного сигнала обеспечивался вблизи номинальной частоты. Другое устройство отсчитывало задержку начала накопления энергии отраженного сигнала относительно первого излученного импульса. Частота повторения импульсов передатчика поддерживалась в кратном соотношении с частотой несущей, что компенсировало доплеровский сдвиг в огибающей импульсов из-за изменения расстояния между планетой и антенной. Эти меры обеспечивали неизменное положение сигнала на частоте и времени запаздывания на входе анализатора, что необходимо для эффективного накопления отраженного сигнала.

В 1962 г. энергетический потенциал Крымской радиолокационной установки был повышен в 6 раз за счет применения на входе приемного устройства квантового парамагнитного усилителя и увеличения мощности передатчика. Точность измерения расстояния возросла благодаря использованию периодической линейной частотной модуляции. Отклонение запаздывания отраженного сигнала от расчетного значения преобразовывалось в пропорциональное смещение частоты сигнала на выходе приемника, которое измерялось многоканальным анализатором спектра. Система регистрации и обработки сигнала при этом получилась более простой, чем для других видов модуляции, вследствие сужения полосы частот при гетеродинировании. Среднеквадратическое значение погрешности измерения расстояния до Венеры в 1962 г. удалось снизить до 15 км, в то время как в 1961 г. оно составляло 2700–4000 км.

В 1964 г. было произведено несколько записей отраженного Венерой сигнала на магнитную ленту в цифровой форме, которые затем обрабатывались с помощью ЭВМ, вычислявшей спектры отраженного сигнала. На полученных спектрограммах были обнаружены детали, соответствующие локальным областям поверхности Венеры с более высокой отражательной способностью, чем окружающая местность. По существу это было одним из первых применений в радиолокации метода синтеза апертуры, позволяющего получить высокое пространственное разрешение.

В радиолокационной астрономии разработан метод получения изображений поверхности планет, основанный на возможности разделять отраженные сигналы по запаздыванию момента прихода и доплеровскому смещению частоты, которые определяются расстоянием и радиальной составляющей скорости данной точки поверхности относительно антенны радиолокатора и закономерно изменяются от точки к точке. Точки, лежащие на некоторой окружности l , плоскость которой перпендикулярна лучу (рис. 1), находятся на одинаковом расстоянии от антенны радиолокационной установки; эта окружность является

линией равных запаздываний. С другой стороны, точки, лежащие на окружности 2, плоскость которой параллельна лучу зрения и оси вращения планеты PP' , имеют по отношению к антенне радиолокационной установки одинаковые радиальные составляющие скорости; эта окружность является линией равных доплеровских смещений. Рассчитав запаздывание и доплеровское смещение для окружностей 1 и 2, из суммарного отраженного сигнала выделяют сигналы, отраженные поверхностью вблизи точек B и B' на пересечении окружностей, и измеряют их интенсивность. Сигналы, отраженные точками B и B' , для которых расстояние и радиальная составляющая скорости одинаковы, разделяют за счет пространственной избирательности антенны или радиоинтерферометра.

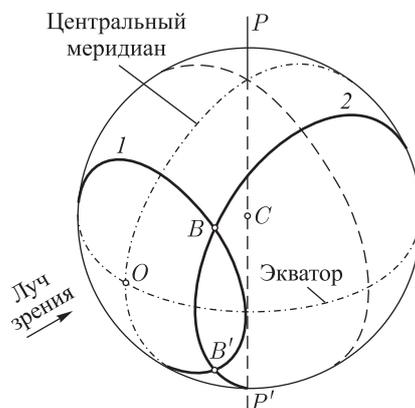


Рис. 1. Схема получения радиолокационного изображения поверхности планет

Возможность разделения отраженных сигналов по запаздыванию и доплеровскому смещению частоты проиллюстрируем на примере сигнала с линейной частотной модуляцией. В этом случае спектр отраженного сигнала на выходе приемника имеет линейчатую структуру, причем в соседние спектральные линии попадают сигналы, отраженные участками поверхности планеты, разнесенными на расстояние, определяемое девиацией частоты. Каждый такой участок имеет форму шарового пояса, осью которого является луч зрения, проведенный в центр планеты (рис. 1).

Вращение планеты вызывает расширение спектральных линий в соответствии с диаметром шарового пояса, отражающего сигнал. Наиболее интенсивная линия соответствует сигналу, отраженному центральной частью диска планеты, находящейся ближе всего к антенне радиолокационной установки, где волны падают почти перпендикулярно поверхности. Расположенные слева от нее линии обусловлены отражением от более удаленных участков. Минимальную ширину имеет линия, соответствующая отражению от центральной части диска.

Более удаленные участки имеют ббльший диаметр и соответственно ббльшую разность радиальных составляющих скорости на краях.

К 1971 г. энергетический потенциал радиолокационной установки Центра дальней космической связи в Крыму возрос в 70 раз. За прошедшее время в США и Советском Союзе были созданы новые крупные антенны, которые значительно расширили возможности радиолокационного исследования планет. В 1980 г. в Центре дальней космической связи вступила в строй полноповоротная антенна диаметром 70 м. Оригинальная схема облучения зеркала антенны обеспечивает высокий коэффициент использования поверхности.

Повышение эффективной площади антенны, снижение шумовой температуры антенно-фидерного тракта и приемника, а также увеличение мощности передатчика позволили увеличить энергетический потенциал радиолокационной установки еще в 50 раз. Для наглядности укажем, что видимой поверхности Венеры при ее сближении с Землей теперь достигает сигнал мощности около 250 Вт. Предельное расстояние радиолокации увеличилось более чем в 2,5 раза. Появилась возможность наблюдать Венеру практически на всей орбите, а также наблюдать регулярно Марс и Меркурий.

Аппаратура радиолокационной установки подвергалась коренному усовершенствованию. Цифровой синтезатор сигнала периодической линейной частотной модуляции обеспечивает девиацию частоты 128 кГц, что позволяет получить разрешение 1,2 км при измерении расстояния. С помощью цифрового доплеровского синтезатора с программным изменением частоты можно интерполировать расчетное изменение доплеровского смещения частоты отраженного сигнала полиномом третьей степени в диапазоне +300 кГц с дискретностью 0,01 Гц на интервале длительностью до 20 мин. Первичной основой излучаемого сигнала является водородный стандарт частоты со стабильностью лучше 10^{-13} .

Программно-временное устройство радиолокационной установки обеспечивает отсчет прогнозируемого значения времени запаздывания в диапазоне до 10 000 с с дискретностью установки расчетного значения 0,1 мкс.

С начала 1982 г. обработка отраженного сигнала и измерение его параметров ведутся с помощью ЭВМ типа СМ-4. Программа ускоренного спектрального анализа обеспечивает обработку отраженного сигнала в текущем времени в полосе $0,25 \text{ div } 4$ кГц с разрешением лучше 0,1 Гц.

Применение радиолокации в астрономии позволило непосредственно измерять расстояние до небесных объектов. Точность этих измерений значительно превышает точность астрономических методов. Поэтому они позволяют уточнять значения фундаментальных астрономических постоянных, параметры движения тел Солнечной системы, их размеры.

Основным результатом первых радиолокационных наблюдений Венеры, имеющих исключительное значение для космонавтики, явилось

уточнение астрономической единицы длины, равной среднему расстоянию Земли от Солнца. В аналитической теории движения планет, созданной Ньютоном в конце прошлого века на основе оптических наблюдений планет, с помощью которой вычисляются расстояния в Солнечной системе, астрономическая единица является масштабным множителем. Поэтому, измерив расстояние до одной из планет в километрах и поделив его на это же расстояние, вычисленное в долях астрономической единицы, можно было найти ее значение в километрах и уточнить расстояния в Солнечной системе. Уточнение астрономической единицы позволило выводить искусственные спутники к планетам и доставлять межпланетные станции в заданный район их поверхности.

В то же время радиолокационные измерения показали, что и после внесения поправки в значение астрономической единицы остаются значительные регулярные расхождения между фактическим и рассчитанным на основе аналитической теории Ньютона расположением планет относительно Земли, достигающие нескольких сотен километров. Хотя эти расхождения невелики по сравнению с полным расстоянием, их наличие затрудняло выведение межпланетных станций на траекторию, обеспечивающую посадку в определенном районе планеты, и не позволяло с необходимой точностью прогнозировать момент входа аппарата в атмосферу планеты. В связи с этим при каждом полете межпланетных станций приходилось наряду с измерениями дальности и радиальной скорости станции вести радиолокационные измерения для уточнения положения планеты.

На базе накопленного к настоящему времени экспериментального материала в Советском Союзе проведена работа по уточнению орбит Земли, Венеры, Марса, Меркурия и построена теория движения этих планет, позволяющая вычислять относительные расстояния примерно в 100 раз точнее, чем аналитическая теория Ньютона.

При радиолокации планет в периоды их прохождения за Солнцем было обнаружено дополнительное по отношению к вычисленному по теории Ньютона запаздывание момента прихода отраженного сигнала, обусловленное уменьшением скорости распространения электромагнитных волн в поле тяготения Солнца в соответствии с теорией Эйнштейна. Обнаружение этого эффекта явилось одной из экспериментальных проверок общей теории относительности.

Измеренное расстояние до ближайшей к антенне радиолокационной установки точки поверхности O в сочетании с расстоянием до центра масс планеты C , положение которого уточняется в процессе измерений, позволяет вычислить удаление точки O от центра планеты и, таким образом, высоту ее над некоторой средней поверхностью. Вращение планеты дает возможность исследовать рельеф в различных областях поверхности, проходящих через точку O . Полученный этим методом профиль высот поверхности Марса изображен на рис. 2. Наиболее высокая точка 17,5 км — склон вершины потухшего вулкана Олимп, крупнейшей горы из известных в Солнечной системе высотой 27 км.

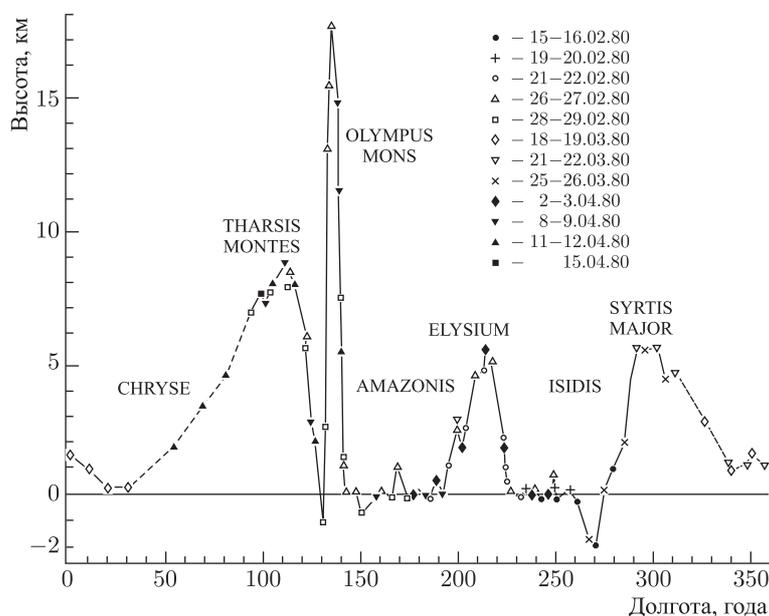


Рис. 2. Профиль высот поверхности Марса, полученный радиолокационным методом в период 15.02.80 г.–15.04.80 г.

Решение многих астрофизических задач с помощью радиолокации основано на исследовании смещения и расширения спектральной линии отраженного сигнала под влиянием эффекта Доплера. Возможность обеспечить в радиодиапазоне высокую когерентность излучения позволяет получить при этом очень высокое спектральное разрешение (10^{-10} от частоты излучения и выше). Этим методом изучается движение метеоров в атмосфере Земли, движение ионизированных образований в солнечной короне, вращение планет. Крупнейшим достижением радиолокации явилось определение периода и направления вращения Венеры и Меркурия.

Высокая проникающая способность радиоволн позволила преодолеть плотный облачный слой Венеры, непрозрачный для оптических лучей, и получить первые сведения о ее поверхности. Измерения мощности отраженного сигнала, которая зависит от коэффициента отражения материала поверхности, показали, что поверхность Венеры по электрическим свойствам близка к скальным породам на силикатной основе, которые широко распространены на Земле. В центре диска Венеры наблюдается яркий блик, а края тонут в тени, как у гладкой сферы. Это явление наблюдается и у других планет, кроме Юпитера и Сатурна, которые имеют мощную газовую оболочку и не дают заметного отражения. В тоже время кольца Сатурна оказались

хорошим отражателем и рассеивают радиоволны так, как облака — видимый свет.

В Массачусетском технологическом институте (США) радиолокационным методом при помощи разделения отраженных сигналов по времени их запаздывания и доплеровскому смещению частоты было получено изображение участка Луны (рис. 3, а). Качество изображения мало уступает фотографическому снимку, сделанному с Земли с помощью оптического телескопа. Отраженный сигнал принимался одновременно двумя антеннами, что позволило измерить по разности фаз принятых сигналов отклонение каждой точки поверхности Луны от некоторой средней поверхности (рис. 3, б, где темный фон имеют низкие места, светлый — возвышенные).

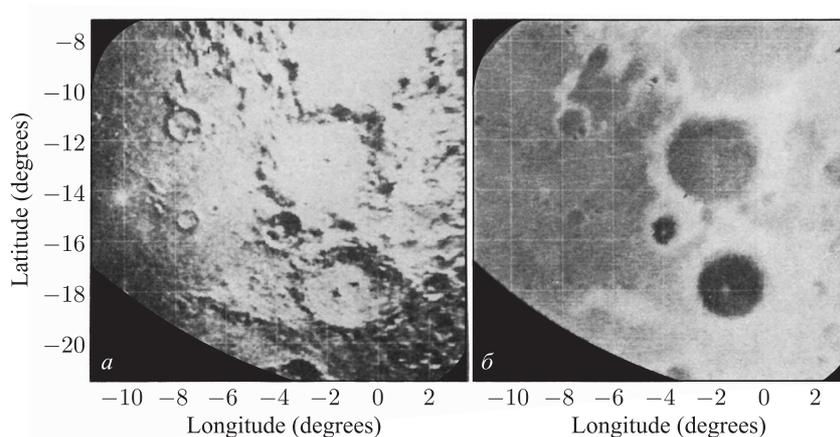


Рис. 3. Изображение участка Луны, полученное радиолокационным методом

Опыт наблюдения планет с помощью радиолокационной установки Центра дальней космической связи был использован для разработки космического эксперимента по картографированию поверхности Венеры. Для этого в начале июня 1983 г. к Венере стартовали космические аппараты «Венера-15» и «Венера-16» с радиолокационной аппаратурой. В середине октября 1983 г. оба космических аппарата были выведены на эллиптическую орбиту спутника Венеры с периодом обращения 24 ч и высотой над поверхностью планеты около 1000 км в перигеуме и 65 000 км в апоцентре.

Метод бокового обзора с синтезированной апертурой антенны, примененный для получения радиолокационного изображения поверхности Венеры с космического аппарата, имеет то общее с описанным ранее методом, разработанным в радиолокационной астрономии, что в обоих случаях используется разделение отраженных сигналов по запаздыванию момента прихода и доплеровскому смещению частоты. Элементы

поверхности, попадающие в пределы диаграммы направленности бортовой антенны 1 (рис. 4), находятся на разном расстоянии и движутся с разными радиальными скоростями при наблюдении их с космического аппарата *C*. Например, точка *A* расположена ближе, чем точка *B*, и отраженный ею сигнал приходит раньше, чем от точки *B*. Точка *G* на набегающем крае диаграммы направленности приближается к космическому аппарату, в то время как точка *D* на противоположном крае удаляется. Сигнал, отраженный точкой *G*, имеет большую частоту из-за эффекта Доплера, чем сигнал, отраженный точкой *D*. На плоской поверхности линии равного запаздывания образуют концентрические окружности с центром в точке *O* под космическим аппаратом; линии равного доплеровского смещения частоты представляют конические сечения.

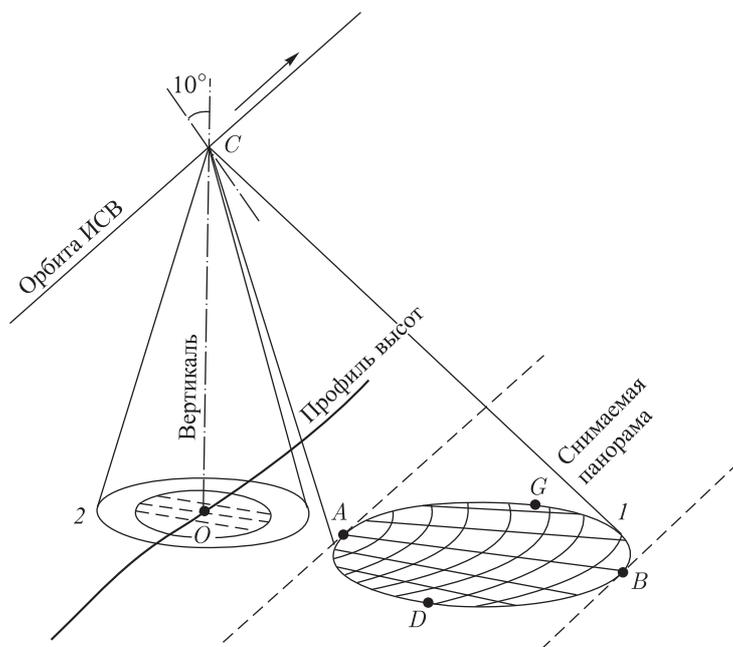


Рис. 4. Схема получения радиолокационного изображения и профиля высот поверхности Венеры: 1 — след диаграммы направленности антенны РЛС бокового обзора; 2 — след диаграммы направленности антенны радиовысотомера-профилографа

Несущая частота передатчика радиолокационной станции (8 см) манипулировалась по фазе 127-элементным кодом так называемой М-последовательности при длительности элементарного импульса 1,5 мкс. Это дало возможность при обработке отраженного сигнала на Земле

путем свертки его с копией зондирующего сигнала получить пространственное разрешение около 1,5 км.

Затем отраженный сигнал когерентно накапливается в течение 4 мс, за которые космический аппарат пролетает по орбите около 35 м. Это обеспечивает пространственное разрешение вдоль трассы $1 \text{ div } 2$ км в диапазоне высот $1000 \text{ div } 2000$ км.

Метод бокового обзора для исследования поверхности Венеры с космических аппаратов «Венера-15» и «Венера-16» был применен впервые. Планируя эксперимент, надо было знать характеристики отражения поверхности Венеры, а также коэффициенты рефракции и поглощения радиоволн в ее атмосфере, которые на волне 8 см имеют заметные значения. Эти данные были получены на основе радиолокационных наблюдений Венеры с Земли.

В основном канале отраженный сигнал в цифровой форме запоминался на борту и затем передавался на Землю по телеметрической линии. Для обработки отраженного сигнала и построения радиолокационного изображения был создан комплекс аппаратуры, оборудованный ЭВМ. Для разделения отраженных сигналов по запаздыванию и доплеровскому смещению частоты разработано специализированное цифровое вычислительное устройство — процессор для выполнения преобразования Фурье.

При построении радиолокационного изображения производилось усреднение результатов измерений мощности отраженного сигнала, полученных под разным ракурсом для уменьшения флуктуационной погрешности, вызываемой интерференцией радиоволн, отраженных отдельными участками исследуемой поверхности в пределах разрешаемого элемента. Устранялась неравномерность освещенности по полю изображения, вызванная неравномерностью формы диаграммы направленности антенны РЛС и диаграммы обратного рассеяния поверхности планеты, а также изменением высоты космического аппарата. Данные приводились к одному масштабу по вертикали и горизонтали. При этом учитывалась нелинейность координат «запаздывание отраженного сигнала — доплеровское смещение частоты», в которых проводились измерения, а также разномасштабность и перемещение изображения вследствие изменения высоты космического аппарата, движущегося по эллиптической орбите, и возможная неточность ориентации электрической оси антенны РЛС.

В течение одного прохождения искусственного спутника Венеры (ИСВ) в районе перицентра его орбиты снималась полоса поверхности шириной около 100 км и длиной 7000 км. Один из районов Венеры протяженностью 1100 км, снятый космическим аппаратом «Венера-16», изображен на рис. 5. Космический аппарат двигался слева направо, его трасса проходила выше снятой полосы. Электрическая ось антенны РЛС бокового обзора составляла с плоскостью орбиты угол 10° , ширина диаграммы направленности в вертикальном сечении $5,5^\circ$

(рис. 4). Полная ширина изображенной полосы 156 км, полезная часть несколько уже и ширина ее зависит от высоты ИСВ.

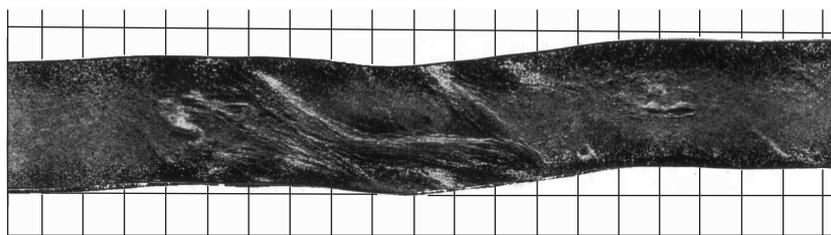


Рис. 5. Изображение поверхности Венеры, полученное 20 октября 1983 г. ИСВ «Венера-16»

Снимок на рис. 5 начинается равниной без заметных деталей, резко переходящей в горную область. Множество параллельных хребтов простирается под углом 45° к трассе, а затем меняет направление и тянется параллельно ей. В конце под углом 45° примыкает другая горная область. Внутри острого угла, образованного двумя группами складок, просматривается большой кратер эллиптической формы размером $80 \times 60 \text{ км}^2$ с центральной горкой. Затем рельеф становится более спокойным. Наиболее примечательной деталью в этой области являются два горных образования, вытянутые вдоль трассы на 80 км при ширине основания $15 \text{ div } 20 \text{ км}$. Их склоны, обращенные к космическому аппарату, выглядят светлыми, что является следствием резкой диаграммы обратного рассеяния поверхности (зависимости мощности отраженных к РЛС сигналов от угла наблюдения). Внизу слева от этих гор виден полуразрушенный кратер диаметром $15 \text{ div } 20 \text{ км}$. Заканчивается отснятый участок двумя параллельными грядами, расположенными под углом 45° к трассе, которые переходят в группу округлых холмов с диаметром основания $6 \text{ div } 8 \text{ км}$.

Во время радиолокационной съемки к приемопередающей аппаратуре РЛС периодически подключались антенны то бокового обзора, то радиовысотомера-профилографа, электрическая ось которой направлена вдоль местной вертикали (рис. 4). В режиме радиовысотомера-профилографа M -последовательность зондирующего сигнала имела либо 127, либо 31 элемент при длительности элементарного импульса 1,5 мкс. После свертки с копией зондирующего сигнала при обработке на Земле реализуется разрешение 230 м по вертикали. Распределение мощности отраженного сигнала по запаздыванию момента прихода затем свертывается с моделью этого распределения для ряда значений коэффициента шероховатости и дисперсии высот. Положение наблюдаемого максимума сверток дает высоту ИСВ над средней поверхностью в пятне диаметром $40 \text{ div } 50 \text{ км}$ со среднеквадратической погрешностью около 30 м. При 31-элементной M -последовательности это пятно

можно разделить вдоль трассы на 3 ÷ 5 полос за счет различия в доплеровском смещении частоты отраженных ими сигналов (рис. 4).

Профиль высот поверхности Венеры, измеренный по трассе полета ИСВ «Венера-16», показан на рис. 6. По горизонтальной оси отложено угловое расстояние космического аппарата относительно перицентра, измеренное в градусах из центра планеты (один градус на поверхности Венеры занимает 105,6 км). По вертикальной оси — радиус планеты в данной точке трассы в километрах, вычисленный как разность планетоцентрического расстояния ИСВ и измеренной высоты. Как видно из рисунка, крайние значения высоты по данной трассе лежат в пределах от $-1,0$ до $+1,7$ км относительно значения 6051 км, принятого Международным астрономическим союзом за среднее значение радиуса Венеры.

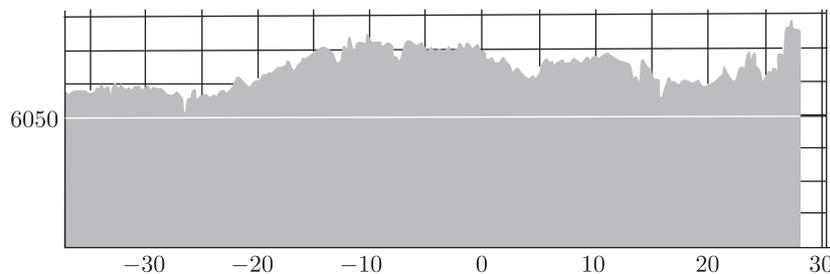


Рис. 6. Профиль высот поверхности Венеры по трассе полета ИСВ «Венера-16» 12 ноября 1983 г.

За восемь месяцев с ноября 1983 г. космические аппараты «Венера-15» и «Венера-16» произвели радиолокационное картографирование всего северного полушария Венеры выше 30° общей площадью 115 млн. кв. км. Получены уникальные изображения поверхности Венеры, на которых видны кратеры, горные хребты, равнины, складки и разломы венерианской коры. Обнаружены признаки тектонической активности Венеры. На основе этого материала создаются первые карты Венеры. Они позволят изучить процессы, происходящие на поверхности планеты, и судить об истории ее развития.

Сравнивая приведенные описания первых радиолокационных установок и установок 80-х гг., сопоставляя полученные с их помощью результаты, нетрудно видеть, какой огромный скачок в своем развитии совершила радиолокация планет за последнее десятилетие. Значение полученных при этом результатов трудно переоценить, поскольку они дают практический материал, необходимый для дальнейшего изучения Вселенной.