

УДК 523.164.8

## «ВЕНЕРА-15», «ВЕНЕРА-16»: РАДИОЛОКАТОР С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ НА ОРБИТЕ ИСВ\*

*А. Ф. Богомолов, Н. В. Жерихин, Г. А. Соколов*

Описан принцип радиолокационной съемки поверхности Венеры с помощью автоматических межпланетных станций (АМС) «Венера-15», «Венера-16». Приведена структура и технические данные радиолокатора бокового обзора с синтезированной апертурой, установленного на борту АМС. Указаны средства и порядок обработки информации в наземных пунктах приема. Приведены примеры радиолокационных изображений участков поверхности Венеры и профилей высот вдоль трассы полета.

Радиотехнические методы исследования Венеры открыли новый этап в изучении строения и характеристик ее поверхности, скрытой от наблюдения в оптическом и инфракрасном диапазонах плотным облачным покровом.

Если получение изображений и изучение строения локальных участков поверхности Венеры возможно с помощью автоматических спускаемых аппаратов, то для дистанционного исследования значительных по площади ее районов в настоящее время может быть использован только радиодиапазон, позволяющий проникнуть сквозь толщу атмосферы планеты.

Среди этих методов основная роль принадлежит радиолокационной технике. Эксперименты по наземному радиолокационному зондированию поверхности Венеры для изучения характеристик отдельных ее участков начались в 70-х годах и имели целью, прежде всего, выявление контрастов радиояркости на видимом с Земли диске планеты (наземному радионаблюдению практически доступно лишь одно полушарие Венеры, обращенное к Земле в периоды наибольшего сближения).

Радиоастрономическими центрами США в Хайстеке, Голдстоуне и Аресибо были получены данные о средней отражающей способности некоторых участков поверхности Венеры и составлены соответствующие карты радиояркости [1-3]. Возможность анализа радиосигналов, отраженных отдельными участками поверхности, в условиях, когда ширина диаграммы направленности наземных антенн существенно превышает угловые размеры видимого диска планеты, в этих радиолокационных наблюдениях достигалась использованием того факта, что каждый из таких участков имеет свой закон движения относительно наземного пункта наблюдения (вызванный взаимным перемещением планет и их собственным вращением) и создает отраженные сигналы с индивидуальными пространственно-временными характеристиками.

Значительная удаленность объектов радиолокационного зондирования и сложный характер относительного движения затрудняют анализ этих характеристик. В упомянутых выше публикациях разре-

\* Статья написана по результатам исследований, получивших в 1984 году 1-ю премию на конкурсе лучших научных работ, выполненных в высших учебных заведениях страны.

(Прим. редакции).

шающая способность измерений на поверхности Венеры оценивается значениями от нескольких десятков до нескольких сотен километров. Наблюдение экваториальной зоны при этом усложняется неоднозначностью разрешения участков поверхности по задержке (в северной и южной части полушария), в связи с этим требуется привлечение дополнительных пунктов наблюдения, что, тем не менее, не позволяет полностью исключить зону неоднозначности.

В то же время были начаты эксперименты по радиолокационному измерению профиля высот поверхности Венеры в экваториальной зоне как наиболее доступной такого рода исследованиям, так как основным методом определения дистанции в случае наземного наблюдения является оценка задержки сигнала, отраженного ближайшей точкой планеты.

В СССР такие измерения проводились ИРЭ АН СССР с помощью аппаратуры, установленной в Центре дальней космической связи в Евпатории.

Исследование Венеры и ее околопланетного пространства радиотехническими методами проводится в СССР в течение длительного времени. Начало этим исследованиям положили первые опыты радиолокационного зондирования планеты с целью уточнения характеристик ее движения.

В настоящее время подобные измерения проводятся регулярно. В ходе выполнения экспериментов с космическими аппаратами серии «Венера» были проведены измерения в радиодиапазоне, позволившие получить значительную информацию о планете. Результаты этих исследований содержатся в [4, 5].

Наземные радиолокационные наблюдения поверхности Венеры продолжают и совершенствуются. К настоящему времени имеются публикации [6, 7], в которых приводятся данные о различии деталей рельефа отдельных участков, позволяющие говорить о новом этапе в этих наблюдениях—получении радиолокационных изображений участков поверхности планеты.

Успехи наземного радионаблюдения не снимают задачи исследования поверхности планеты в непосредственной от нее близости.

В любом случае ясно, что радиолокационное зондирование Венеры с орбиты ее искусственного спутника предлагает значительно большие возможности, чем наземное радионаблюдение.

Первый результат такого зондирования был получен космическим аппаратом США «Пионер-Венера» [8]. Перед экспериментом не ставилась задача детальной радиолокационной съемки поверхности планеты. Соответственно были выбраны параметры радиосигнала и условия проведения измерений. Главным достижением эксперимента явилось построение карты высот (гипсометрической карты) значительной части поверхности Венеры. Это позволило представить в материковом масштабе морфологическую структуру поверхности планеты и тем самым ориентировать обработку результатов ее детального исследования.

Общей задачей детального изучения поверхности Венеры, предусмотренного многолетними программами космических исследований в СССР и США с использованием орбитальных радиолокационных средств, является построение ее топографической карты и получение данных в интересах комплексного исследования планеты (таких, как локальная отражающая способность в радиодиапазоне, характер местных неровностей и т. п.).

В Советском Союзе планирование этих программ проводит Академия наук СССР. Начало их выполнению положил запуск автоматических межпланетных станций (АМС) «Венера-15» и «Венера-16», несущих радиолокационную аппаратуру, предназначенную прежде все-

го для получения изображения части северного полушария Венеры.

Параметры аппаратуры выбраны таким образом, чтобы обеспечить детальность наблюдения, сравнимую, например, с возможностями наблюдения Луны наземными оптическими телескопами.

### ПРИНЦИПЫ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКИ

Радиолокационное картографирование предполагает получение изображения поверхности, аналогичного оптической фотографии. Принципиальная возможность получения таких радиоизображений основана на общем с оптикой принципе определения интенсивности излучения от отдельных элементов поверхности, из которых это изображение складывается.

Подобно тому, как система линз в оптике позволяет разделить общий световой поток от освещенного или излучающего объекта на компоненты, соответствующие отдельным деталям его конфигурации, в радиодиапазоне из общего потока отраженной электромагнитной энергии могут быть выделены сигналы, соответствующие деталям рельефа облученной поверхности.

Теоретически при таком разделении могут быть использованы общие принципы физической оптики, сохраняющиеся и в радиодиапазоне. Однако техническая реализация этих принципов при моностатическом наблюдении практически не осуществима в условиях орбитального полета космического аппарата.

Достаточно сказать, что для достижения на станциях «Венера-15», «Венера-16» той же детальности изображения потребовалось бы в этом случае размещение на них антенных конструкций, соизмеримых с крупнейшими наземными радиотелескопами.

Поэтому основным принципом радиолокационной съемки является непрерывное наблюдение отраженного поверхностью когерентного сигнала при изменении взаимного положения радиолокатора и элементов поверхности за счет их относительного перемещения. Это позволяет выявить пространственно-временную структуру отраженного сигнала и в конечном итоге разделить его на компоненты, соответствующие деталям рельефа.

В условиях орбитального полета АМС «Венера-15», «Венера-16» используется метод пространственно-временного наблюдения, получивший в радиолокационной технике название бокового обзора с синтезированной апертурой или искусственным формированием раскрыва антенны.

В радиолокаторах АМС «Венера-15», «Венера-16» при выделении компонент отраженного сигнала использован метод так называемого нефокусированного синтеза апертуры, при котором фронт отраженной волны предполагается плоским (элементы поверхности находятся на значительном удалении).

Принцип действия радиолокатора бокового обзора с синтезированной апертурой (РСА) заключается в разделении отраженных сигналов по двум параметрам — задержке относительно момента излучения и сдвигу частоты, вызванному эффектом Доплера. По существу это означает разделение элементов рельефа по углу  $\gamma$  относительно вектора скорости носителя РСА (эффект Доплера) и радиальной дальности  $R$  до облученного элемента (рис. 1). Линии одинаковой дальности на плоской поверхности представляют собой дуги концентрических окружностей. Линии равных доплеровских сдвигов частоты — дуги гипербол. При облучении участка сбоку от траектории полета эти линии образуют координатную сетку, приближающуюся к прямоугольной (рис. 1).

Вынесение значений интенсивности отраженных сигналов в виде яркостных отметок на двухкоординатный план при соответствующем выборе параметров системы позволяет получить характерное радиолокационное изображение, мало отличающееся от оптической фотографии. Различие в интенсивности отраженных сигналов определяется, главным образом, наклоном участков поверхности и структурой их неровностей, что и обеспечивает сходство оптических и радиолокационных изображений.

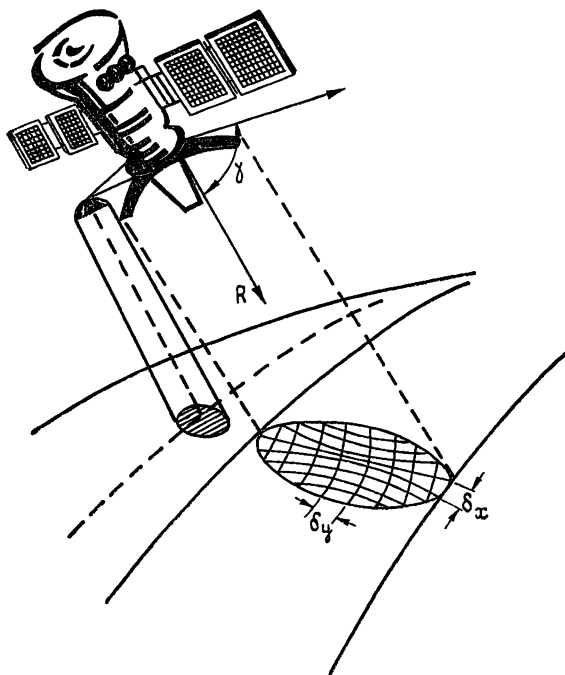


Рис. 1.

Поскольку ширина зоны бокового обзора ограничена, в каждом пролете АМС вблизи Венеры снимается некоторая полоса поверхности сбоку от трассы полета. Непрерывное наращивание панорамы в условиях полета станций «Венера-15», «Венера-16» обеспечивается за счет естественного вращения Венеры вокруг своей оси.

Детальность радиолокационного изображения, полученного с помощью РСА (разрешающая способность), определяется параметрами модуляции зондирующего сигнала, условиями полета (в частности, высотой) и протяженностью участка траектории, на котором производится прием сигнала от каждого элемента (размером синтезированной апертуры, или временем синтеза).

Построение карты Венеры по радиолокационным изображениям участков ее поверхности предполагает достаточно точную привязку результатов измерений к венерографической системе координат. Такая привязка помимо сведений о баллистических данных движения АМС относительно центра масс планеты требует знания локального радиуса Венеры в районе снимаемого участка.

В условиях работы АМС «Венера-15», «Венера-16» ошибка в привязке результатов наблюдения на поверхности в несколько раз превышает ошибку в знании локального радиуса планеты. Поэтому в аппаратуре станций предусмотрено измерение профиля высот вдоль

трассы полета. Эти измерения представляют и самостоятельный интерес при дешифрировании радиоизображений и оценке морфологической структуры поверхности.

### РАДИОЛОКАТОР «ПОЛЮС-ВЕНЕРА»

Общая идеология построения и параметры РСА «Полюс-Венера» (сокращенно «Полюс-В»), установленного на борту каждой из станций «Венера-15», «Венера-16», определены задачей и особенностями условий проведения эксперимента по радиокартографированию.

Для проведения эксперимента выбрана эллиптическая орбита с периодом обращения 24 часа. Высота орбиты в перигеетре составляет около 1000 км, расстояние от поверхности в апоцентре — около 60000 км. Перигеетр расположен в районе 60° с. ш. Наклонение орбиты к экватору обеспечивает прохождение станций вблизи северного полюса планеты.

Суточный цикл функционирования на орбите искусственного спутника Венеры (ИСВ) определяет временной режим работы РСА. При максимальном приближении станций к планете в районе перигеетра проводится сеанс радиолокационной съемки очередной «полосы» поверхности. Протяженность полосы вдоль трассы полета составляет около 8000 км и выбрана с учетом изменения высоты орбиты над поверхностью и необходимостью сохранения на участке съемки соответствующих условий радионаблюдения. Трасса съемки начинается в районе 70° с. ш., проходит рядом с северным полюсом Венеры и опускается затем примерно до 30° с. ш.

Полученная в сеансе радиолокационной съемки информация запоминается бортовым накопителем и в последующем суточном сеансе связи передается по радиолинии в наземные пункты приема и обработки.

За счет собственного вращения Венеры (период ее обращения вокруг оси соответствует примерно 243 земным суткам) на каждом витке трасса съемки проходит через последовательно смещающиеся участки поверхности. Ширина зоны съемки в каждом сеансе должна обеспечить необходимое перекрытие этих зон от витка к витку для предельного увеличения площади непрерывно снимаемой панорамы.

Достижимая ширина этой зоны ограничена объективными закономерностями, существующими в радиолокационной технике искусственного формирования раскрыва антенны. Это ограничение связано с тем, что площадь освещенного радиолучем участка поверхности в координатах задержка сигнала ( $\tau$ ) — доплеровский сдвиг частоты ( $\Omega$ ) не может превышать определенного значения, что обусловлено свойствами частотно-временных характеристик когерентных радиосигналов.

В упрощенной трактовке это условие сводится к тому, что частота повторения зондирующего радиосигнала (определяющая ширину зоны съемки) не может быть выбрана меньше ширины спектра доплеровских частот в отраженном сигнале.

Нарушение этого условия может привести к искажению радиолокационного изображения в виде взаимного наложения изображений участков вдоль трассы полета или в перпендикулярной плоскости (плоскости визирования).

Указанное ограничение является специфическим для орбитальных условий использования РСА, когда значительная скорость носителя приводит к появлению широкого спектра доплеровских частот в отраженном сигнале. Преодоление этого ограничения может быть достигнуто только увеличением размера реальной антенны в направлении движения, что приводит к сужению диаграммы направленности, а следовательно, и ширины спектра частот отраженного сигнала.

Компромисс между качеством изображения и шириной зоны съемки достигается также соответствующим выбором угла отклонения антенны бокового обзора от вертикали в плоскости визирования.

В РСА «Полюс-В» используется антенна с размером вдоль направления движения 6 м и углом отклонения электрической оси от вертикали 10°. Это позволяет получить ширину зоны съемки в каждом витке 120—150 км (в зависимости от высоты) и обеспечить в условиях полета АМС «Венера-15», Венера-16» получение сплошной панорамы большей части северного полушария планеты.

Одновременно с проведением радиолокационной съемки на каждом витке производится измерение профиля высот вдоль трассы полета. Для этой цели используется другая антенна с параболическим зеркалом 1 м, ориентированная в сеансе съемки в подспутниковую точку. Циклический режим работы РСА предусматривает подключение к аппаратуре в ходе сеанса съемки поочередно той или другой антенны. При этом совместная обработка результатов радиолокационной съемки при боковом обзоре и результатов измерений профиля высот требует использования данных, полученных на различных витках, так как подспутниковый след проходит в стороне от зоны съемки.

Непосредственные результаты радиолокационной съемки, передаваемые после каждого сеанса по радиолинии связи на Землю, представлены в РСА «Полюс-В» в двух видах: последовательность цифровых отсчетов отраженного сигнала, предназначенная для обработки в наземных пунктах, и поэлементные значения радиояркости в зоне съемки, полученные в бортовом устройстве обработки сигнала. Эта последняя информация позволяет непосредственно в ходе приема данных наземным пунктом отображать полученную в сеансе съемки панораму на видеомониторе.

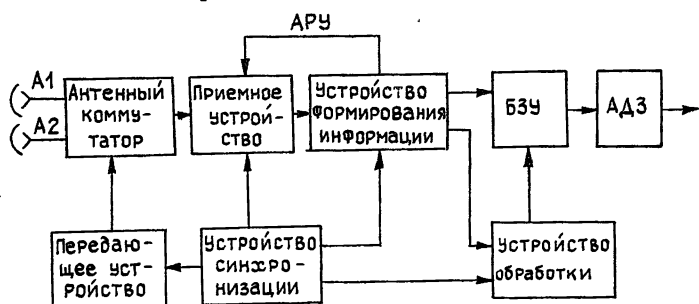


Рис. 2.

Упрощенная структурная схема радиолокатора показана на рис. 2. Антенны бокового обзора  $A1$  и радиовысотомера  $A2$  поочередно в определенной последовательности подключаются антенным коммутатором к приемно-передающему тракту. Передающее устройство, работающее в диапазоне длин волн  $\lambda=8$  см, формирует последовательность зондирующих посылок длительностью около 15 мс, разделенных интервалами 5 мс. Параметры посылок выбраны таким образом, чтобы в диапазоне высот от 700 до 2000 км в паузе всегда принимался отраженный сигнал. Этот интервал приема и определяет время синтеза апертуры. Угловую разрешающую способность  $\delta\varphi$  синтезированной апертуры принято определять соотношением

$$\delta\varphi \approx \lambda/2vT,$$

где  $\lambda$  — длина волны радиоизлучения,  $v$  — линейная скорость носителя РСА,  $T$  — время синтеза апертуры.

При времени синтеза (когерентной обработки сигнала)  $T=4$  мс и орбитальной скорости  $v \approx 9000$  м/с это соответствует формированию искусственного раскрыва антенны протяженностью около 70 м.

При средней высоте полета  $H=1200$  км разрешающая способность  $\delta x$  на поверхности вдоль трассы полета соответствует при этом

$$\delta x \approx \delta \varphi H / \cos 10^\circ \approx 1400 \text{ м.}$$

Периодический цикл излучения включает 15 зондирующих посылок, каждая из которых предназначена для реализации определенного режима работы РСА. Первые восемь посылок цикла излучения имеют фазовую  $\pi$ -манипуляцию 63-элементным  $M$ -кодом (кодом нулевой последовательности максимальной длительности).

Длительность элемента кода  $\tau_{\alpha 1} \approx 3$  мкс. Отраженные сигналы, соответствующие этим посылкам, используются бортовым устройством обработки для формирования отсчетов радиояркости элементов освещенной зоны. Некогерентное суммирование результатов обработки восьми посылок позволяет существенно уменьшить эффект радиомерцания элементов поверхности, характерного для когерентного облучения.

Разрешающая способность  $\delta y$  на поверхности в плоскости визирования, перпендикулярной плоскости орбиты, практически не зависит от высоты полета и может быть в данном случае оценена по длительности элемента кода  $\tau_{\alpha 1}$ :

$$\delta y \approx (c/2)\tau_{\alpha 1} / \sin \alpha,$$

где  $c$  — скорость распространения радиоволн,  $\alpha$  — угол падения радиоволн относительно местной вертикали к поверхности.

При среднем значении  $\alpha=10^\circ$  разрешающая способность равна  $\delta y \approx 2700$  м. Поскольку интервал между группами посылок этого режима составляет около 300 мс, смена участков вдоль трассы полета также дает возможность раздельного наблюдения элементов, разнесенных на расстояние около 2700 м. Таким образом, разрешающая способность бортовой обработки вдвое ниже предельно достижимой при выбранном времени синтеза апертуры.

Последующие пять посылок цикла излучения не имеют модуляции и предназначены для работы системы автоматической подстройки частоты приемного устройства по энергетическому центру спектра отраженного сигнала.

Следующая посылка имеет фазовую манипуляцию 127-элементным  $M$ -кодом с длительностью элемента

$$\tau_{\alpha 2} = \tau_{\alpha 1} / 2 \approx 1,5 \text{ мкс.}$$

Информация этой посылки занимает наибольшую часть передаваемого на Землю кадра.

Отсчеты отраженного сигнала, соответствующего этой посылке, сделанные с интервалом 1,5 мкс, после цифрового преобразования в 4-х разрядном двоичном коде регистрируются бортовым накопителем. Каждый отсчет представлен двумя значениями, полученными на выходе квадратурно настроенных когерентных детекторов. При этом в ходе наземной обработки отсчетов реализуется предельная разрешающая способность около 1300 м, обусловленная выбранным временем синтеза апертуры и шириной частотного спектра зондирующего сигнала.

Последняя посылка цикла излучения предназначена для режима измерения высоты. Перед излучением посылки производится переключение антенн, так что к приемно-передающему тракту подключается антенна  $A_2$ , ориентированная в подспутниковую точку.

Манипуляция фазы в посылке производится 31-элементным *M*-кодом с длительностью элемента  $\tau_{\text{э2}} \approx 1,5 \text{ мкс}$ . Выбор периода *M*-последовательности обусловлен расширением спектра частот отраженного сигнала для антенны *A2*.

Результаты зондирования также регистрируются в виде цифровых отсчетов квадратурных когерентных детекторов.

Наземная когерентная обработка результатов зондирования в этом режиме позволяет отдельно наблюдать отражения от участков вдоль трассы полета протяженностью около 8 км. Протяженность разрешаемых участков в плоскости визирования составляет около 50 км.

Формирование цикла излучения и управление рабочими режимами радиолокатора обеспечивает устройство синхронизации.

Отраженный радиосигнал поступает в приемное устройство с двойным преобразованием частоты и затем — в устройство формирования информации. В этом устройстве происходит когерентное детектирование принятых сигналов, преобразование отсчетов в цифровую форму, автоматическая подстройка по средней частоте спектра сигнала (АПЧ), выработка данных для системы автоматической регулировки усиления приемного устройства (АРУ).

### ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ РАДИОЛОКАТОРА «ПОЛЮС-В»

Длина волны	8 см
Эффективная мощность излучения (с учетом затухания в СВЧ тракте)	8 Вт
Вид зондирующего сигнала	ФКМ-посылки
Время синтеза апертуры	3,8 мс
Размеры зеркала антенны бокового обзора	6×1,4 м
Угол отклонения антенны от вертикали	10°
Диаметр зеркала антенны радиовысотомера	1 м
Частота повторения фазового кода в режиме бокового обзора	5 кГц
Разрешение по задержке	1,54 мкс
Среднее разрешение по поверхности	
— в режиме бортовой обработки	2,7×2,7 км
— в режиме наземной обработки	1,3×1,3 км
Ширина снимаемой зоны	130 км
Протяженность снимаемой зоны в одном сеансе	8000 км
Размеры осредняемой поверхности при измерении профиля высот	8×50 км
Среднеквадратическая погрешность измерения профиля высот	50 м

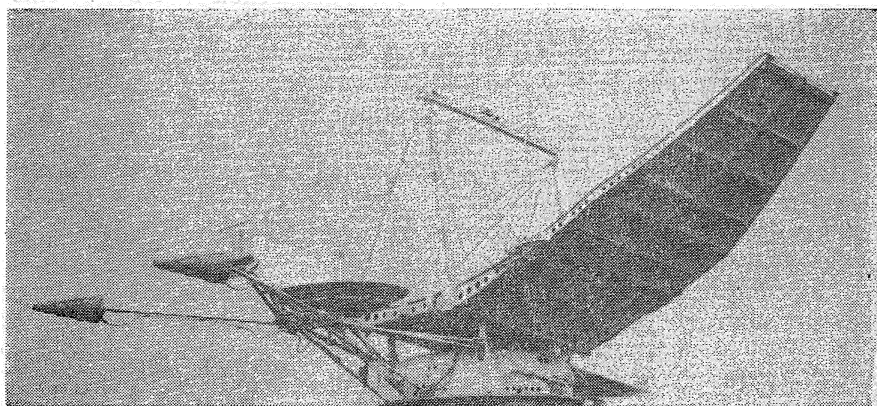


Рис. 3.

Для согласования по времени неравномерного потока информации с режимом непрерывной записи на магнитном носителе аппаратуры долговременного запоминания (АДЗ) используется буферное запоминающее устройство (БЗУ).



Устройство обработки производит корреляционный анализ отсчетов сигнала, принятого в первых восьми посылках цикла излучения, и формирует значения радиояркости элементов рельефа, облученных в плоскости визирования (перпендикулярной плоскости орбиты). Последующее вынесение этих значений на экран видеомонитора или фоторегистрирующее устройство создает растровое изображение поверхности.

Записанная на носителе АДЗ информация содержит последовательность цифровых отсчетов принятого сигнала в режимах бокового обзора и радиовысотомера, значения радиояркости элементов поверхности, полученные устройством обработки, данные об уровне отраженного сигнала (цифровые отсчеты АРУ) и средней частоте его спектра (отсчеты АПЧ).

Основные технические данные радиолокатора «Полюс-В» приведены в таблице. Фотография приборного контейнера с установленной на нем антенной системой показана на рис. 3.

### ПОСТРОЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ПРОФИЛЕЙ ВЫСОТ

По окончании сеанса съемки на каждом витке информация ежесуточно передается по радиолинии связи на Землю. С учетом транспортной маркировки, сопровождающей информацию, общий объем передаваемых в сеансе связи данных составляет в среднем  $7,5 \cdot 10^7$  двоичных единиц. Передача данных проводится со скоростью около  $10^5$  двоичных единиц в секунду.

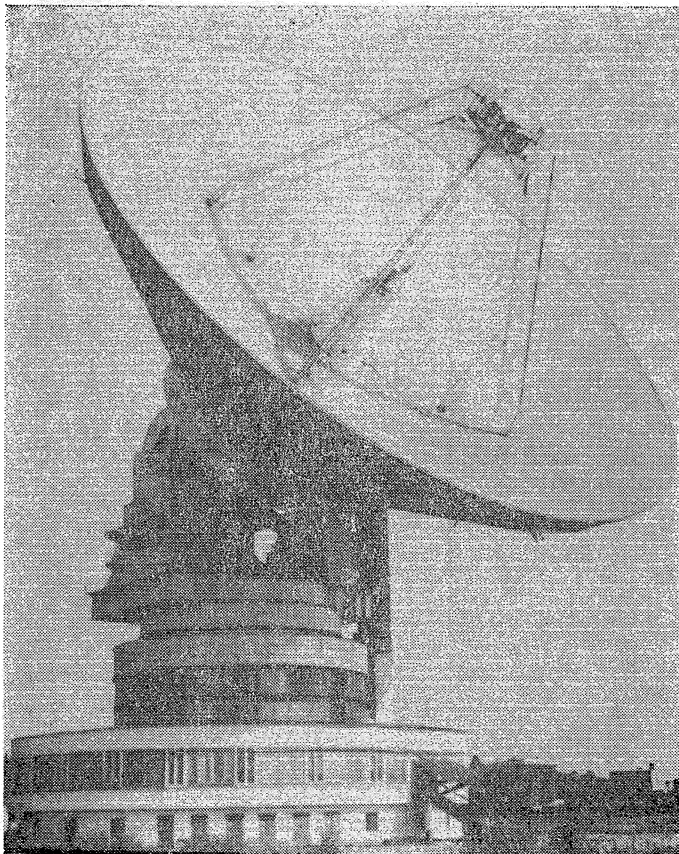


Рис. 4.

Прием информации радиолокатора «Полюс-В» производится Центром дальней космической связи в Евпатории и подмосковной экспериментальной радиоастрономической базой ОКБ МЭИ Минвуза СССР «Медвежьи озера». Обработка полученной информации проводится вычислительными центрами ОКБ МЭИ и ИРЭ АН СССР.

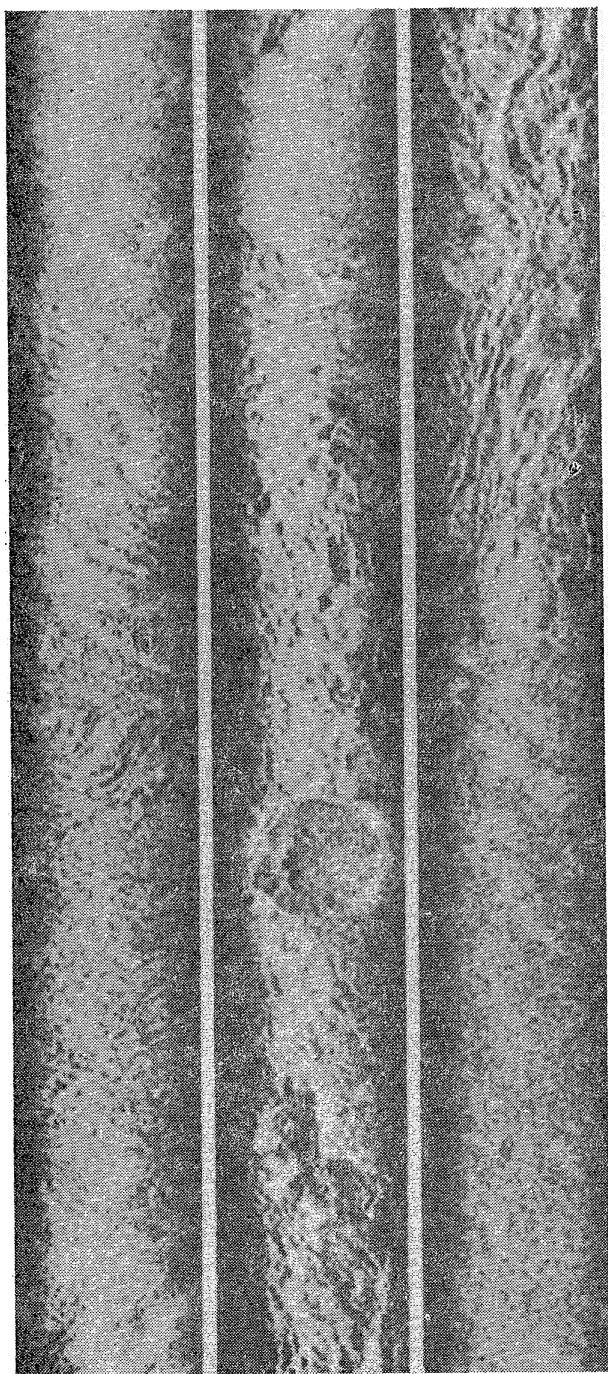


Рис. 5.

Фотография 64-метрового радиотелескопа, установленного на пункте приема «Медвежьи озера», показана на рис. 4. Первым этапом обработки информации на этом пункте является отображение на экра-

не видеомонитора значений радиояркости деталей рельефа, полученных на борту АМС, непосредственно в ходе сеансов приема.

При этом производится коррекция радиояркости с учетом диаграммы направленности антенны радиолокатора и диаграммы обратного рассеивания радиоволн поверхностью Венеры. Для удобства зрительного восприятия панорамы проводится также учет закона изменения высоты АМС в ходе сеанса съемки, так что изображение представляет собой «выпрямленную» полосу обзора. На экране видеомонитора наблюдается участок полосы протяженностью около 800 км. По мере приема информации изображение равномерно перемещается.

По окончании сеанса связи вся принятая информация оперативно отображается фоторегистрирующим устройством.

Пример изображения, перенесенного на фоторегистрирующее устройство, приведен на рис. 5. Изображение соответствует трассе полета, включающей район гор Максвелла (Maxwell Montes). Началу сеанса съемки (вблизи 70° с. ш. до прохождения околополярной точки) соответствует правая часть снимка.

На изображении виден крупный кратер, имеющий в диаметре около 100 км и отмеченный ранее при наземном наблюдении радиоастрономической обсерваторией в Аресибо [6]. Это морфологическое образование уже получило название Patera Cleopatra. В отношении природы его происхождения у специалистов не существует единого мнения.

Отчетливо просматриваются извилистые горные хребты и относительно гладкие области с менее значительными деталями рельефа на начальном и конечном участках зоны съемки.

Следующим этапом обработки информации этого массива данных является привязка значений радиояркости к соответствующим участкам поверхности в венерографической системе координат по данным наземных траекторных измерений параметров движения станций, а также по результатам автономных бортовых измерений высоты.

Последующее совмещение в ЭВМ изображений, полученных в отдельных сеансах съемки, позволяет построить сплошную панораму крупных участков поверхности. Пример такой панорамы приведен на рис. 6. На фотографии показан район Земли Иштар (Ishtar Terra), в котором находятся горы Максвелла с упомянутым уже образованием в виде кратера.

Панорама позволяет убедительно представить морфологическое строение обширного района поверхности Венеры с крупными горными массивами, отдельными кратерами и разломами.

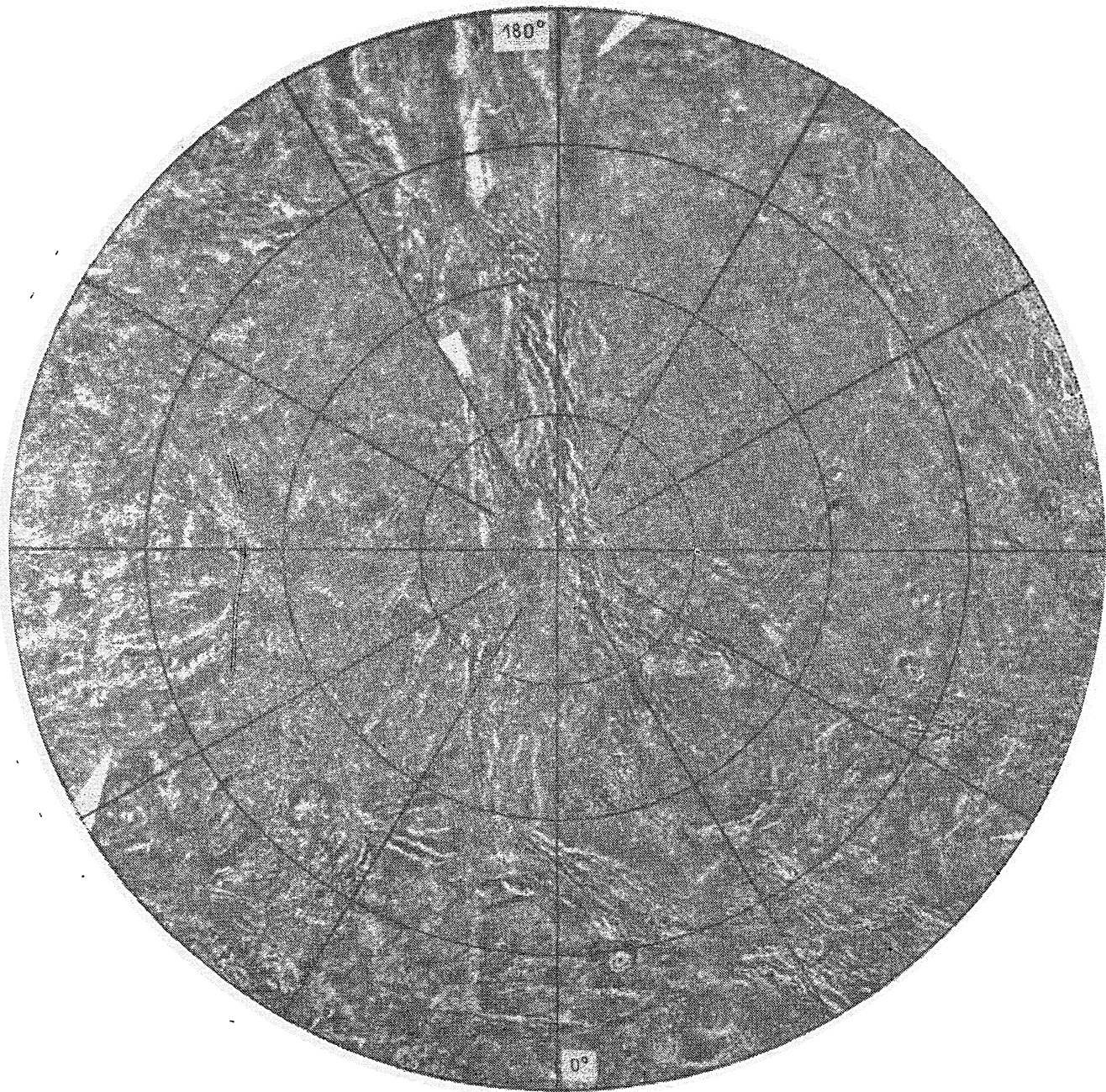
Аналогично полученная панорама района северного полюса Венеры показана на рис. 7\*.

Из фотографии видно, что область северного полюса содержит многочисленные морфологические образования в виде горных цепей, кратеров и разломов. Однако по данным высотомера-профилографа перепады высот в этом районе не превышают 2 км.

Наземная обработка переданных отсчетов отраженного сигнала, полученных в одной из посылок цикла излучения сеанса съемки, позволяет найти радиоизображение поверхности с улучшенными качественными характеристиками. Первым этапом анализа этого массива данных является разложение сигнала на элементы, соответствующие различным значениям задержки и частоты, совместным использованием корреляционной обработки и дискретного преобразования Фурье.

В результате формируется двухкоординатный кадр ( $\tau$ ,  $\Omega$ ) значений радиояркости элементов облученного участка. Дальнейшая обработка аналогично описанной выше включает коррекцию радиояркости

\* Панорамы рис. 6, 7 получены ОКБ МЭИ совместно с ИППИ АН СССР.



100 км

Рис. 7.



Рис. 6.

100 мкм

---

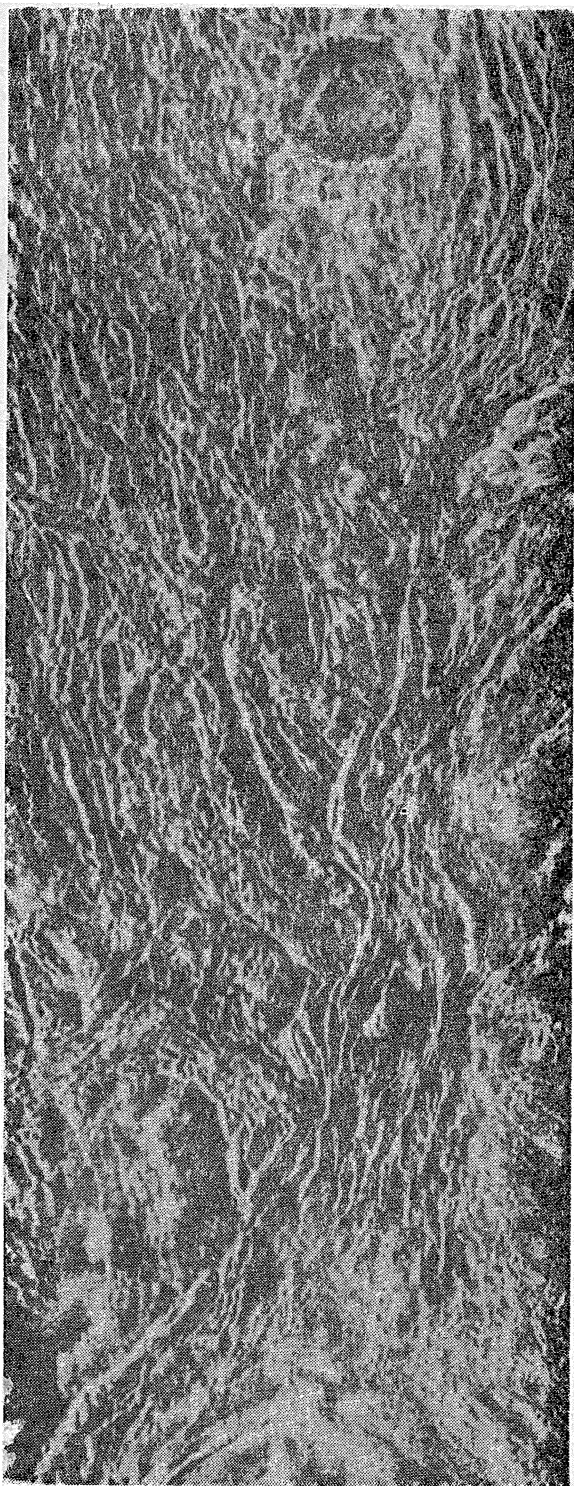


Рис. 8.

в пределах кадра и привязку ее значений к координатам поверхности Венеры по баллистическим данным.

Последовательное наложение кадров дает возможность получить непрерывную зону съемки одного сеанса. При этом каждый элемент поверхности повторяется в пяти последовательных кадрах, что позволяет провести достаточно эффективное осреднение изображений. Пример полученного по этим данным изображения показан на рис. 8\*. Участок соответствует району Maxwell Montes.

При обработке отсчетов отраженного радиосигнала, полученного в режиме радиовысотмера, проводится выделение элементов сигнала с различными значениями задержки и частоты.

Освещенная радиолучом зона в районе подспутниковой точки имеет размер в поперечнике несколько сотен километров, однако когерентная обработка сигналов позволяет отдельно наблюдать отражения от участков, имеющих протяженность вдоль трассы полета около 8 км (за счет частотного анализа на интервале приема) и примерно 50 км в перпендикулярной плоскости (за счет длительности элемента фазокодовой манипуляции).

По результатам обработки данных каждого сеанса съемки для этого массива информации проводится построение профиля высот вдоль трассы полета. Пример такого профиля, пересекающего горы Максвелла и Patera Cleopatra (показано стрелкой), приведен на рис. 9. Морфологическое образование имеет углубление около двух километров и содержит внутреннюю структуру, отмеченную «выступом» на профиле высот и хорошо заметную на радиоизображениях рис. 5, 6, 8.



Рис. 9.

Детальность профилей, полученных на станциях «Венера-15», «Венера-16», существенно превышает достигнутую в космическом аппарате «Пионер-Венера», где отсчеты высот проводились с интервалом около 100 км по поверхности.

Отсчет высоты на рис. 9 проводится от условного уровня. Расстояние вдоль трассы полета отсчитывается относительно перицентра орбиты ИСВ (точка 0).

На рис. 10 совмещены профили высот в районе гор Максвелла, позволяющие дать представление об этом районе в виде аксонометрического изображения. Программа построения этого изображения предусматривает исключение низких профилей, скрытых от «наблюдателя» более высоким. В частности, скрыт профиль рис. 9. Расстояние вдоль трассы полета на рис. 10 отсчитывается от условной точки.

\* Изображение получено при обработке информации в ИРЭ АН СССР

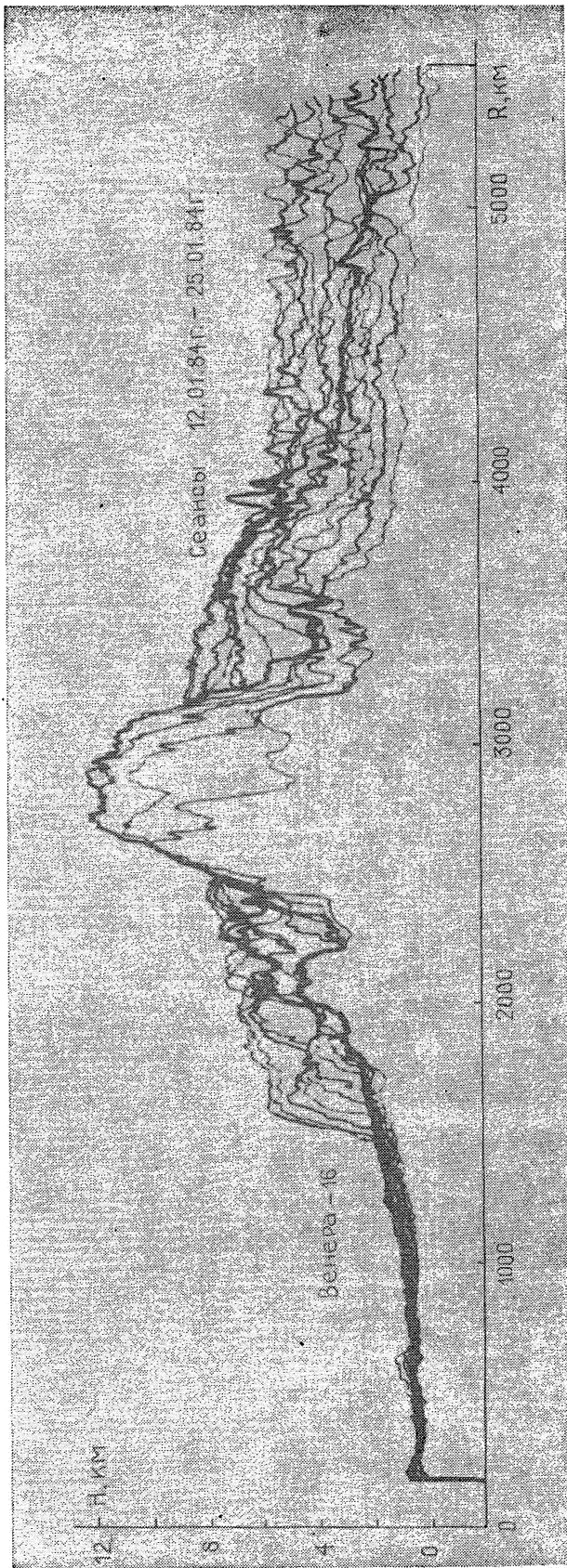


Рис. 10.



Выбранные параметры радиолокатора в эксперименте с АМС «Венера-15», «Венера-16», судя по результатам уже заканчивающейся работы, позволят специалистам по планетным исследованиям получить совершенно новую информацию о нашей ближайшей соседке по Солнечной системе. Для изучения этой информации потребуется не один год.

Радиолокатор «Полюс-В» передал информацию о строении части северного полушария Венеры площадью около 115 млн. км<sup>2</sup>. При этом впервые получено изображение поверхности, близкое по качеству к оптической фотографии, позволяющее квалифицированно приступить к построению карты Венеры.

Полученные профили высот вдоль трассы полета в каждом сеансе съемки значительно уточняют информацию космического аппарата «Пионер-Венера», так как построение этих профилей проводилось с меньшей дискретностью по времени и, соответственно, с большей детальностью.

Вместе с тем эксперимент указывает на необходимость совершенствования методов радиолокационного исследования Венеры. Одним из направлений этого совершенствования является повышение разрешающей способности при съемке отдельных участков.

В целом можно сказать, что использование в дальнем космосе техники искусственного синтеза апертуры является одним из перспективных направлений в решении задач изучения космического пространства. Об этом свидетельствуют результаты, уже полученные станциями «Венера-15», «Венера-16».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Rogers A. E. E., Ingalls R. P. — Radio Science, 1970, 5, № 2, p. 425.
2. Rumsey H. C., Morris G. A., Green R. R. — Ikarus, 1974, 23, № 1, p. 1.
3. Goldstein R. M., Green R. R., Rumsey H. C. — J. Geoph. Res., 1976, 81, № 26, p. 4807.
4. Котельников В. А., Ржига О. Н., Александров Ю. Н., Дубровин В. М., Морозов В. А., Петров Г. М., Шаховской А. М., Францессон А. В. В кн.: Проблемы современной радиотехники и электроники — М.: Наука, 1980
5. Котельников В. А., Петров Г. М. — В ежегоднике: Наука и человечество — М.: Знание, 1980, с. 202.
6. Campbell D. B., Head J. W., Harmon J. K., Hine A. A. — Science, 1983, 221, № 4611, p. 644.
7. Beatty J. K. — Sky and Telescope, 1984, 67, № 2, p. 110.
8. Pettengil G. H., Eliason E., Ford P. G., Lorient G. B., Masursky H., McGill G. E. — J. Geoph. Res., 1980, 85, № A13, p. 8261.

Особое конструкторское бюро  
Московского энергетического института

Поступила в редакцию  
7 августа 1984 г

#### «VENERA-15», «VENERA-16»: SYNTHETIC APERTURE RADAR ON VENUS SATELLITE ORBIT

*A. F. Bogomolov, N. V. Zherikhin, G. A. Sokolov*

The principle of the radar survey of the Venus surface made by «Venera-15» and «Venera-16» missions is described. Main structure and technical parameters of the synthetic aperture radar on board of Veneras are given. The means and order of data processing by the ground-based stations are discussed. Several examples of the radar pictures of Venus surface and altitude profiles along the satellite tracks are shown.