

II Всероссийская научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - «Муром 2018»

Методика обработки измерений планетного радиолокатора РТ-70 в сеансах радиолокации планеты Венера в 2012 году

А.И. Захаров, Л.Н. Захарова, А.С. Набатов, В.П. Синило, М.В. Сорочинский

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, 141190, пл. Введенского, 1, Фрязино, Московская область, aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru

После 20-летнего перерыва в Евпатории были возобновлены радиолокационные наблюдения планет с помощью модернизированного радиолокатора на базе антенны РТ-70. Одной из особенностей работ по радиолокации в 2012 году была новая схема коррекции доплеровского искажения сигнала, заключающаяся в том, этот вид искажения устранялся после регистрации эхо-сигнала. Выполнены измерения дальности до Венеры в районе нижнего соединения с Землёй. Результаты радиолокационных наблюдений подтверждают работоспособность аппаратуры радиолокатора и наземного математического обеспечения обработки сигналов.

Radar observations of planets were resumed in Evpatoria with upgraded radar having 70meters antenna after 20 pause. One of the main peculiarities of the radar experiments was new scheme of the Doppler effects, which was applied after the echo-signal registration at the receiving end. The distance till Venus in lower conjunction was measured. Radar experiments confirm the operability of radar equipment and ground-based software for signal processing.

Радиолокационные исследования планет в ИРЭ РАН были начаты в 1960 году по инициативе директора института, академика В.А. Котельникова [1]. Применение радиолокационных методов в космических исследованиях, составляющих суть радиолокационной астрономии, дает новые возможности для изучения небесных тел Солнечной системы, новую информацию об их положении, движении, параметрах вращения, размерах, физических свойствах слагающих поверхность пород и многое другое. Повышенный практический интерес к развитию радиолокационных методов в интересах исследования планет в начале 1960-х годов, кроме всего прочего, был вызван необходимостью обеспечения навигации космических аппаратов в ходе планировавшихся межпланетных полетов.

Совершенствование аппаратуры и методов планетной радиолокации в Советском Союзе привело к созданию в начале 80-х годов планетного радиолокатора Центра дальней космической связи (ЦДКС). В основу метода измерений была положена отработанная идея использования линейной частотной модуляции зондирующего сигнала. Особенностью комплекса цифрового формирования излучаемого сигнала было то, что для компенсации доплеровского искажения частоты и длительности ЛЧМ-импульса, отражающегося движущимся небесным телом, частота излучаемого сигнала и частота следования его отсчетов подстраивались так, чтобы при приеме сигнал находился на номинальной частоте, а длительность ЛЧМ импульса была номинальной и постоянной в течение сеанса радиолокации. ЛЧМ-гетеродинирование эхо-сигнала и дальнейшая узкополосная фильтрация позволяли регистрировать сигнал в узкой полосе и успешно вести дальнейшую цифровую обработку тогдашними скромными вычислительными средствами. Так, эхо-сигнал Венеры оцифровывался в полосе 4 КГц. Сигнал Марса регистрировался в полосе 32 КГц. ЛЧМ-гетеродинирование принятого сигнала на приеме позволяло упростить дальнейшую обработку, сведя её к вычислению и накоплению спектров сигнала,

что не требовало построения многоканального приемного устройства для обработки сигналов с разным запаздыванием и частотой.

Использование сложных сигналов при радиолокации планет

Использование сигналов со сложной модуляцией позволяет за счет разделения отраженных поверхностью планеты сигналов по запаздыванию и Доплеровскому сдвигу частоты осуществить более детальное исследование её поверхности. Основа метода заключается в том, что селекция по частоте позволяет выделить сигнал, отраженный от полосы поверхности, расположенной на определенном расстоянии от оси вращения планеты, а селекция по запаздыванию позволяет выделить сигнал, отраженный от кольцевой полосы на видимом диске планеты, центр которой совпадает с подлокаторной точкой. Пересечение полос равного Доплеровского сдвига частоты и равного запаздывания позволяет выделить на поверхности планеты небольшие участки и достичь высокого разрешения по поверхности, недостижимое только за счет наземной антенны в случае локации Венеры с Земли. Как правило, зондирующий сигнал – это длинная посылка последовательно повторяющихся зондирующих импульсов с внутримпульсной модуляцией (в нашем случае – ЛЧМ), длительность сигнала на излучении равна времени прохождения сигнала до планеты и обратно.

При зондировании планеты длинным радиоимпульсом его форма и несущая частота искажаются вследствие перемещения отражающей поверхности за время прихода импульса. В классических работах по радиолокации планет времен 1960-х -1980-х специально созданная аппаратура вносила предискажения в излучаемый сигнал так, чтобы на приеме он был свободен от Доплеровского искажения частоты и длительности [2].

Если в момент излучения радар находится в точке А, планета в момент прихода сигнала находится в точке В, а прием происходит в точке С (см. рис. 1 [3]), то общее время запаздывания τ будет равно:

$$\tau = 0.5|r_{12} + r_{23}|, \quad (1)$$

где r_{12} и r_{23} расстояния от излучателя до планеты и обратно, равные в свою очередь:

$$r_{12} = |\vec{r}_2(t_2) - \vec{r}_1(t_1)|, \quad (2)$$

$$r_{23} = |\vec{r}_3(t_3) - \vec{r}_2(t_2)|. \quad (3)$$

При использовании монохроматического сигнала перемещение отражающей поверхности приводит к изменению частоты радиосигнала. Приняв релятивистские эффекты незначительными (скорость планеты существенно меньше скорости света), получим, что частота сигнала, пришедшего к поверхности планеты, равна

$$f_2 = f_1 \left(1 - \frac{V_{12}}{c} \right), \quad (4)$$

где f_1 - частота излученного сигнала,

V_{12} - взаимная скорость радиолокатора и отражающей поверхности при прохождении сигнала к планете,

c - скорость света.

Отраженный сигнал приходит к радиолокатору с частотой f_3 , равной:

$$f_3 = \frac{f_2}{\left(1 + \frac{V_{23}}{c}\right)}, \quad (5)$$

где V_{23} - взаимная скорость планеты и радара при приеме сигнала.

Частоты излученного и принятого сигналов связаны следующим соотношением:

$$f_1 = f_3 \frac{1 + \frac{V_{23}}{c}}{1 - \frac{V_{12}}{c}} = \eta f_3. \quad (6)$$

Доплеровский сдвиг частоты на приеме равен

$$f_d = f_3 - f_1 = f_1 \left(1 - \frac{1}{\eta}\right), \quad (7)$$

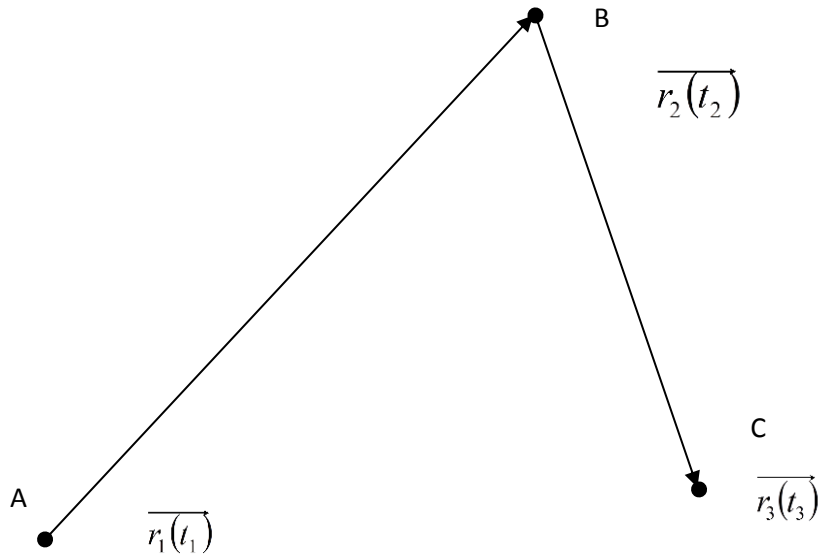


Рис. 1. Схема прохождения сигнала в сеансе радиолокации планеты.

Рассмотрим искажение узкополосного зондирующего импульса, у которого можно выделить несущую частоту f и огибающую $a(t)$. Если излученный импульс на временной шкале излучателя t_{tr} можно описать выражением

$$s_{tr}(t_{tr}) = a(t_{tr}) \cos(2\pi f_1 t_{tr}), \quad (8)$$

то на приемной стороне выражение для сигнала будет иметь вид

$$s_r(t_r) = a(t_r) \cos(2\pi f_3 t_r). \quad (9)$$

Пример искажения импульса с ЛЧМ заполнением отражателем, приближающимся к радару, приведен на рис. 2. Здесь по оси абсцисс отложены номера отсчетов сигнала.

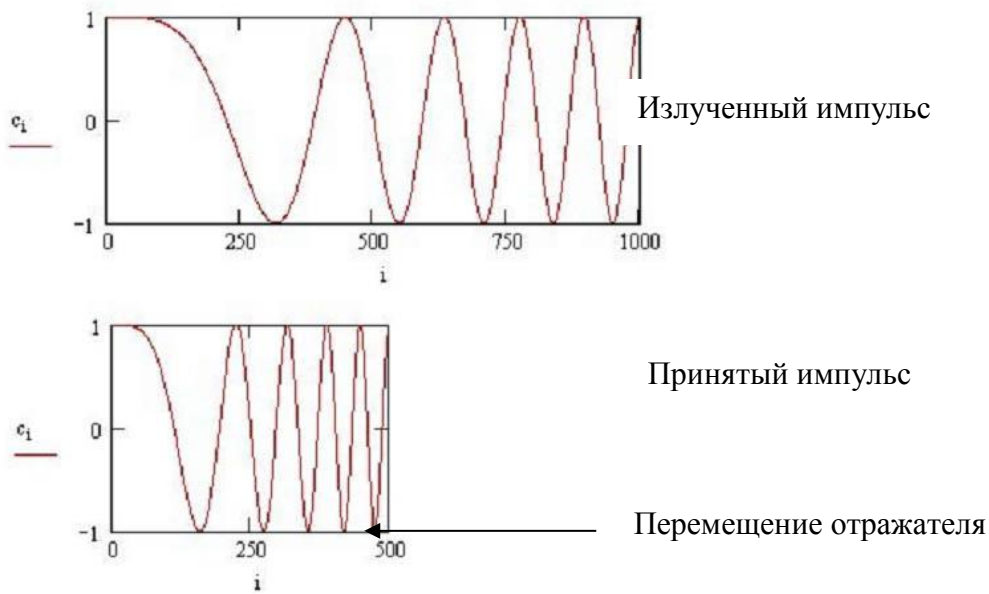


Рис. 2. Деформация зондирующего импульса, отраженного движущимся объектом.

Коэффициент η из (6) фактически является масштабным коэффициентом деформации временной структуры зондирующего сигнала:

$$f_1 t_r = \eta f_3 t_r = f_3 t_r. \quad (10)$$

Следовательно, введя искажение временной шкалы t_r , можно скомпенсировать Доплеровское искажение формы/длительности импульса. Введя в рассмотрение новую шкалу времени на приеме $t_{\text{int}} = t_r \eta$, получим

$$s_r(t_{\text{int}}) = a(t, \eta) \cos(2\pi f_1 t, \eta). \quad (11)$$

Алгоритм устранения Доплеровского эффекта заключается в деформации масштаба времени в принятом сигнале. Это обеспечивается тем, что элементарный шаг по времени при выборке последовательных отсчетов деформированного сигнала берется равным не интервалу между отсчетами dt_r , а $dt_r \eta$. Номер k -го отсчета деформированного сигнала есть целая часть от $[k \eta dt_r]$. Фактически, деформация временной шкалы может выполняться путем пропуска или дублирования некоторых отсчетов принятого сигнала. Заметим, что величина η не есть константа. Она меняется в ходе сеанса вследствие изменения взаимных скоростей планеты и радара (см. (6)).

Поскольку пропуск или дублирование отсчетов приводят к фазовым искажениям, необходимо этот эффект минимизировать. Для этого частота квантования сигнала в приемном тракте должна быть существенно выше полосы частот. Оценки показывают, что при восьмикратном превышении фазовые ошибки при таком способе деформации шкалы времени приводят к снижению отношения сигнал/шум (SNR) менее чем на 1 дБ.

Следующим существенным моментом при устранении доплеровского эффекта на приеме является то, что перед регистрацией сигнал в приемном тракте переносится с несущей на некую промежуточную частоту в области низких частот, а потому вместо (11) запишем

$$s_r(t_r) = a(t_r) \cos(2\pi(f_3 - f_g)t_r) = a(t_r) \cos(2\pi f_i t_r), \quad (12)$$

где f_g - частота гетеродинного колебания, а f_i - промежуточная частота, в простейшем случае содержащая доплеровскую поправку к несущей.

Правильная последовательность действий включает в качестве первого этапа перенос сигнала с частоты f_i на нулевую частоту (устранение Доплера на несущую), а вторым – устранение Доплера на огибающую $a(t_r)$.

Математическая модель сигнала, отраженного поверхностью планеты

Планета является протяженной целью с сильно пересеченным рельефом в подлокаторной точке, а потому отраженный сигнал имеет достаточно сложную форму, что делает непростой задачу измерения дальности до планеты. Как отмечено выше, вращение планеты вокруг своей оси приводит к доплеровскому размытию спектра отраженного сигнала. На рис. 3 показано положение компонент отраженного сигнала по дальности и частоте. Здесь доплеровские подспектры разных дальностных зон следуют одна за другой по оси запаздывания. При применении схемы обработки с ЛЧМ-гетеродинированием и вычислением спектра сигналов подспектры разных зон дальности размещаются на одной оси частот со смещением на частоту повторения импульсов $1/T$ (см. рис. 4). Римскими цифрами на рисунке отмечены зоны дальности 1-6 с рис. 3.

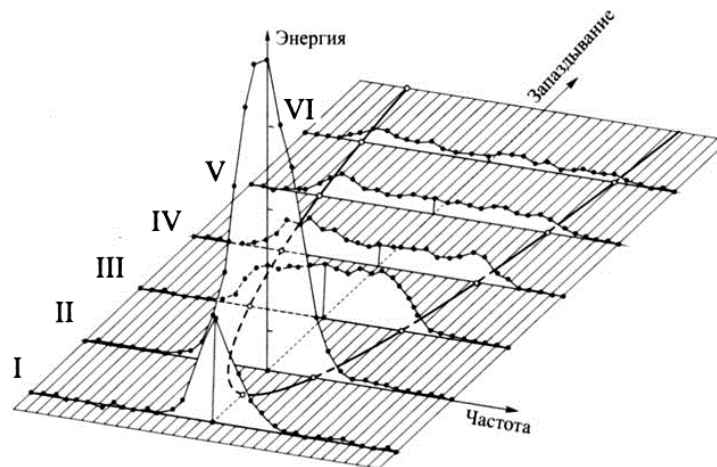


Рис. 3. Распределение отраженного сигнала по запаздыванию и частоте.

Поскольку схема обработки с ЛЧМ-гетеродинированием наиболее проста в вычислительном плане, примем её основной и приведем выражение для спектра модели отраженного поверхностью планеты при зондировании периодически повторяющимися импульсами с ЛЧМ заполнением.

Форма спектра сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ сигнала), отраженного поверхностью планеты, и его положение на оси частот являются основой для измерения дальности, скорости планеты и физических характеристик ее поверхности.

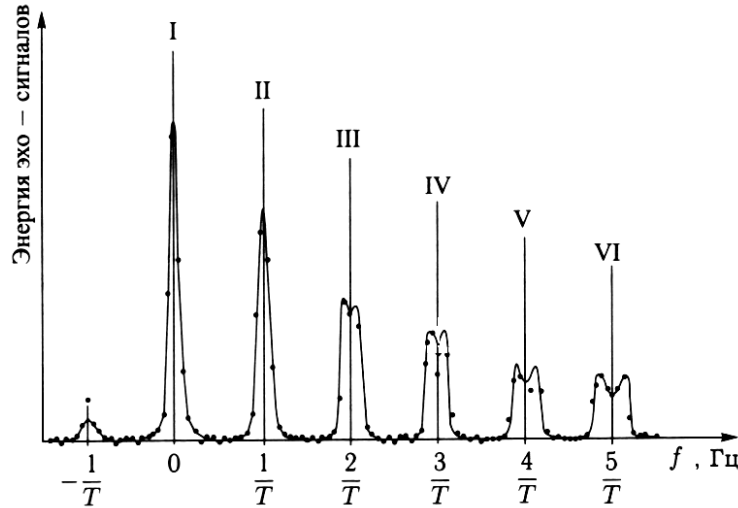


Рис. 4. Распределение отраженного сигнала после ЛЧМ-гетеродирования на приеме.

Для получения математической модели энергетического спектра воспользуемся формулой для интеграла элементарных эхо-сигналов по поверхности планеты, предложенной А.Ф. Хасяновым [4]:

$$T(m) = B \iint_S \sigma_0(\vec{r}, C) A_m(x, y) ds \quad (13)$$

Здесь m – номер спектрального отсчета, B – коэффициент пропорциональности, учитывающий площадь антенны радиолокатора, мощность и длину волны излучаемого сигнала, и расстояние до планеты. Удельная эффективная площадь рассеяния $\sigma_0(\vec{r})$ описывается формулой:

$$\sigma_0(\theta(\vec{r})) = \frac{\rho_0 C}{2} (\cos^4 \theta + C \sin^2 \theta)^{-1.5}, \quad (14)$$

где ρ_0 – коэффициент зеркального отражения,

C – параметр шероховатости в формуле Хэгфорса, описывающей диаграмму обратного рассеяния поверхности планеты,

θ – угол падения радиоволны на поверхность планеты,

$A_k(x, y)$ – аппаратная функция зондирующего периодически повторяющегося ЛЧМ сигнала. Громоздкое выражение для аппаратной функции можно найти в [4].

Последовательность первичной обработки сигналов планетного радиолокатора

Первичная обработка охватывает этапы преобразования отраженного сигнала радиолокатора от массива отсчетов сырого сигнала до измерений поправок к запаздыванию и скорости зондируемой планеты, а также радиофизических параметров отражающей поверхности.

Для варианта съемки с излучением импульса с фиксированными параметрами первым этапом обработки является устранение искажения сигнала вследствие Доплеровского эффекта (Доплер на несущую и огибающую). Следующим этапом является ЛЧМ-гетеродирование и фильтрация в узкую полосу частот. Далее происходило вычисление и некогерентное накопление спектров мощности, которые являются входным материалом для модельной обработки. Крайне малые значения отношения сигнал/шум характерны для

экспериментов по планетной радиолокации, а потому обязательным этапом обработки является некогерентное накопление смеси мощности сигнала и шума и последующее вычитание шумового пьедестала. В нашей схеме обработки форма спектра аддитивного шума аппроксимировалась полиномом 12-й степени, гладкая аппроксимация вычиталась из смеси сигнала с шумом. Модели спектров отраженного сигнала, насчитанные с учетом параметров съемки для набора значений параметра шероховатости Хэгфорса и ошибки по запаздыванию, использованы в корреляционной процедуре для определения поправок к эфемеридам, предоставленным ИПМ РАН.

Результаты радиолокационных измерений 2012 года

Основная серия работ по калибровке аппаратуры планетного радиолокатора и отработке методик радиолокационных измерений проводилась в период с 11 по 18 июня 2012 года, в районе нижнего соединения Венеры с Землёй. Применялись тональные сигналы и с ЛЧМ модуляцией. Отношение сигнал-шум, оцененное по сеансам с несущей, составляет ~ 30 дБ, что близко к теоретическим оценкам для этой планеты на расстоянии 44 млн км с параметром шероховатости Хэгфорса $S=400$, отражательной способностью поверхности $\rho=0.05$ при мощности передатчика ПРЛ 100 кВт и шумовой температуре приемной системы 30^0 .

Измерения дальности до Венеры проводились в сеансах с ЛЧМ-сигналом с девиацией 100, 200, 400, 500 кГц и периодом повторения 20 и 30 мс. Результаты первичной обработки, спектры отраженного сигнала Венеры после коррекции доплеровского эффекта и ЛЧМ фильтрации приведены ниже для различных параметров зондирующего сигнала. При принятых параметрах обработки формировались спектры сигнала в полосе 12 КГц с разрешением ~ 0.4 Гц. Из-за высокого отношения сигнал-шум можно наблюдать сигнал нескольких сотен зон по дальности. Для большей наглядности приведем только часть спектра вблизи номинальной частоты, содержащую первые 10-15 зон по дальности. Видно заметное уширение спектра сигнала дальних зон. На графике ниже по вертикальной оси отложена мощность сигнала в безразмерных единицах, по горизонтальной – частота в Герцах. Пример совмещения реального и модельного спектров для сеанса №7 от 11.06.12 приведен на рис. 6. По горизонтальной оси здесь – номера фильтров спектра.

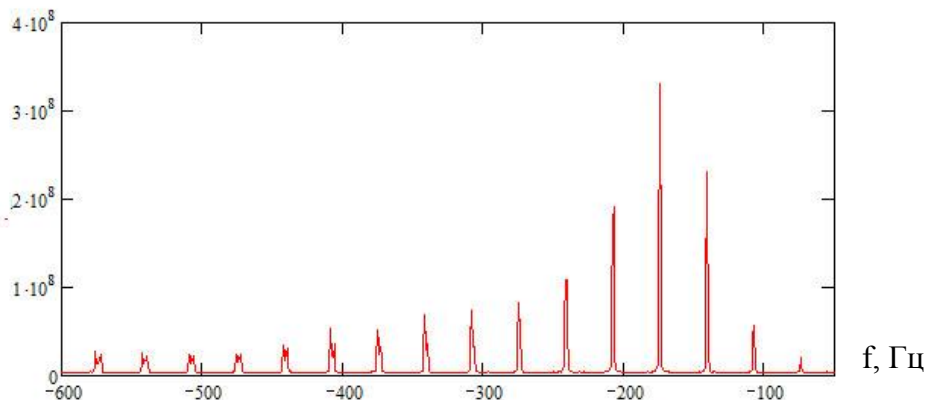


Рис. 5. Спектр отраженного Венерой ЛЧМ сигнала 11.06.12 в сеансе №3 вблизи номинала. Девиация частоты 195 КГц, период 30 мс.

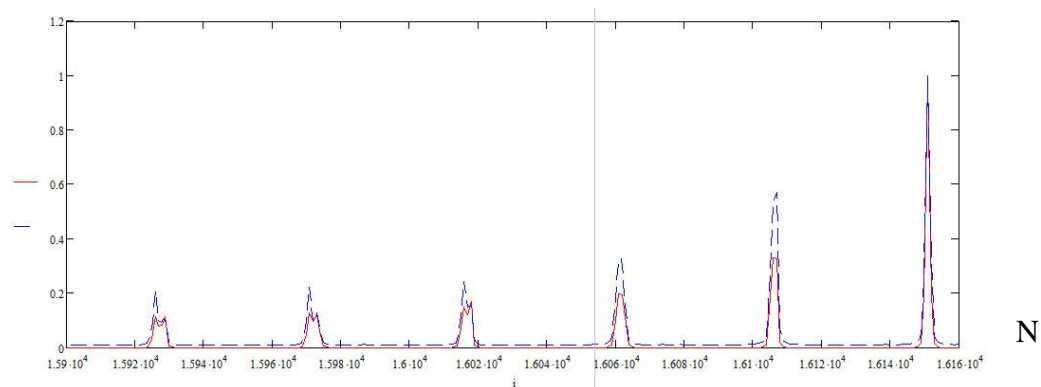


Рис. 6. Совмещение реального и модельного спектров сигнала для сеанса №7 от 11.06.12.

Красная сплошная линия на рисунке – модельный спектр, синяя прерывистая – спектр реального сигнала. Отличие спектров обусловлено неточностями параметров рассеяния в модели, а также особенностями рельефа поверхности планеты. В частности, несимметричность спектров зон в левой части графика обусловлена наличием более сильно отражающих объектов на одном из краев кольцевой дальностной зоны. Модельные спектры использовались для оценки поправки к дальности до планеты. Для повышения точности измерений задержки спектр сигнала сравнивался с набором модельных спектров сигнала, отраженного планетой, рассчитанных заранее для нескольких значений параметра Хэгфорса. Для большинства измерений дальности получено, что поверхность планеты находится на 3.8 км дальше прогнозного значения.

На рис. 7 приведен профиль высот поверхности Венеры относительно среднего значения местного радиуса 6051 км по данным спутника Магеллан в экваториальной области в диапазоне долгот 336-354°. Звездочками отмечено положение подлокаторной точки 11 июня (слева) и 13 июня (справа).

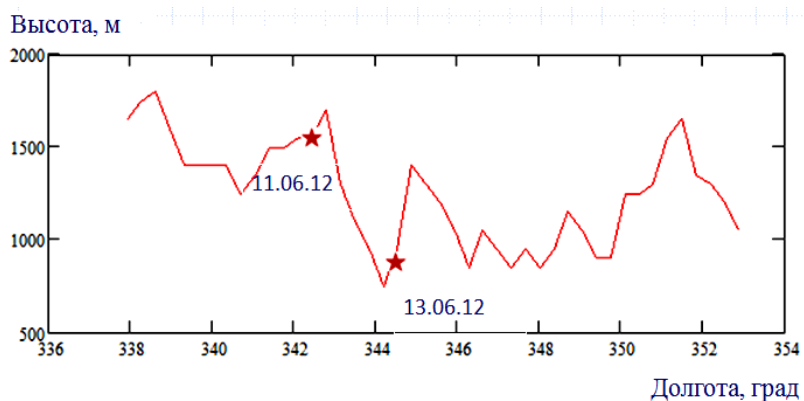


Рис. 7. Профиль высот поверхности Венеры по данным радара-профилографа космического аппарата Магеллан с положением подлокаторной точки в сеансах 11.06.2012 и 13.06.2012 г.

Видно, что 13 июня 2012 г. подлокаторная точка попала в область пониженного рельефа с высотой на 0.6 км меньше по сравнению с измерениями 11 июня 2012, отчего измеренная дальность оказалась больше и вместо 3.8 км, измеренных ранее, составила 4.2 км. Измеренные поправки к дальности до Венеры, прогнозированной Институтом

прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН (ИПМ), показывают, что эта планета в июне находилась на 3.8 км дальше прогноза.

Выводы

Работы по радиолокации Венеры в 2012 году проводились с использованием модернизированного планетного радиолокатора на базе антенны РТ-70 в Евпатории. В этих работах была впервые использована новая схема коррекции доплеровского искажения сигнала, заключающаяся в том, этот вид искажения устранялся после регистрации эхосигнала в широкой полосе на Земле. Получены измерения дальности до Венеры в районе нижнего соединения с Землёй в июне 2012 года, показавшие, что планета находилась в то время на 3.8 км дальше прогнозного значения. Результаты работ подтвердили готовность аппаратуры планетного радиолокатора и математического обеспечения для обработки сигналов к регулярным работам по планетной радиолокации.

Литература

1. В.А.Котельников, Собрание трудов. т.2. Космическая радиофизика и астрономия, М:Физматлит, 2009.
2. Р.В.Бакитько и др., Радиосистемы межпланетных космических аппаратов//М:Радио и Связь, 1993, 326 с.
3. Александров Ю.Н., Кузнецов Б.И., Петров Г.М., Ржига О.Н., Методика радиолокационных астрометрических наблюдений// Астрономический журнал, 1972, т. 49, № 1, с. 175-185.
4. Хасянов А.Ф. Радиолокационные исследования профилей высот и отражательных характеристик поверхностей Венеры и Марса. - Дис. канд. физ-мат. наук. - М., 1981.