

## РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ПЛАНЕТ С ПОМОЩЬЮ ЕВПАТОРИЙСКОГО ПЛАНЕТНОГО РАДИОЛОКАТОРА РТ-70

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

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

Поступила в редакцию 10.09.2018

Представлена действительным членом РАЕН В.В. Колесовым

В 2012 году, 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 зондирующего сигнала, заключающаяся в том, что этот вид искажения устранялся после регистрации эхо-сигнала в широкой полосе. Данная коррекция выполнялась путем монотонного изменения частоты дискретизации сигнала в соответствии с нелинейным законом изменения двустороннего запаздывания, оцененного исходя из модели движения планеты. Последовательность дальнейшей обработки сигналов включала ЛЧМ гетеродинирование, фильтрацию в узкую полосу частот с понижением частоты следования отсчетов сигнала, вычисление и некогерентное накопление спектров мощности. Методика обработки спектра эхо-сигнала при измерении дальности основана на использовании радиофизических эталонных спектров отраженного планетой сигнала. Выполнены измерения дальности до Венеры в районе нижнего соединения с Землей, обнаружено расхождение в 3.8 км по сравнению с прогнозом. Из-за слишком большого расстояния до Марса (более 180 млн км) отраженный этой планетой сигнал был зарегистрирован только в одном сеансе с сигналом без внутриимпульсной модуляции. Результаты радиолокационных наблюдений подтверждают работоспособность аппаратуры радиолокатора и наземного математического обеспечения обработки сигналов.

*Ключевые слова:* радиолокационная астрономия, сигнал с линейно-частотной модуляцией, спектр сигнала, орбита планеты

УДК 621.396.967; 621.396.962

### СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (167)
2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ ПРИ РАДИОЛОКАЦИИ ПЛАНЕТ (168)
3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИГНАЛА, ОТРАЖЕННОГО ПОВЕРХНОСТЬЮ ПЛАНЕТЫ (170)
4. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ПЛАНЕТНОГО РАДИОЛОКАТОРА (171)
5. РЕЗУЛЬТАТЫ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ 2012 ГОДА (171)
6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (173)

### ЛИТЕРАТУРА (173)

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Радиолокационные исследования планет были начаты в ИРЭ АН СССР 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.

Самым выдающимся результатом радиолокационной астрономии начала 1960-х годов было получение и анализ эхо-сигналов от

Венеры, Марса, Меркурия и Сатурна. Пионерские работы по радиолокационным наблюдениям планет этого периода наблюдений были высоко оценены – группа сотрудников ИРЭ АН СССР во главе с академиком В.А. Котельниковым (В.М. Дубровин, В.А. Морозов, Г.М. Петров, О.Н. Ржига, А.М. Шаховской) получила в 1964 году Ленинскую премию.

Накопление фактического измерительного материала на интервале времени с 1961 по 1980 год позволило существенно уточнить параметры движения планет земной группы и приступить к созданию новой теории движения планет. Единая релятивистская теория движения планет Земля, Венера, Марс и Меркурий, созданная ИРЭ АН СССР в сотрудничестве с рядом других организаций на основе отечественного и зарубежного радиолокационного и оптического измерительного материала, дала возможность прогнозировать их взаимное положение в 50-100 раз точнее прогноза по классической теории движения планет. Отклонения измеренных расстояний до планет от рассчитанных по единой теории их движения не превышают значений: для Венеры – 0.9 км за 1970-1980 гг.; для Марса – 2.5 км за 1967-1980 гг.; Меркурия – 2.0 км в 1980 г. За цикл работ по созданию единой релятивистской теории движения планет группа советских ученых в 1982 году удостоена Государственной премии СССР. В числе награжденных – сотрудники ИРЭ АН СССР: академик В.А. Котельников и заведующий лабораторией радиолокационных исследований планет ФИРЭ АН СССР Г.М. Петров.

## 2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ ПРИ РАДИОЛОКАЦИИ ПЛАНЕТ

В основу метода измерений планетного радиолокатора Центра дальней космической связи (ЦДКС) в Евпатории в классических работах по радиолокации планет 1960-1980 гг. была положена отработанная идея использования линейной частотной модуляции зондирующего сигнала. Использование сигналов со сложной модуляцией позволяет за счет разделения отраженных поверхностью планеты сигналов по запаздыванию и доплеровскому сдвигу частоты

осуществить более детальное исследование ее 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 внутриимпульсной 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. Специально созданная аппаратура вносила предыскажения в излучаемый сигнал так, чтобы на приеме он был свободен от доплеровского искажения частоты и длительности [2]. Для этого частота излучаемого сигнала и период следования его отсчетов на выходе формирователя ЛЧМ сигнала непрерывно корректировались 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 на приеме 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 ее к вычислению и накоплению спектров сигнала, что не требовало построения

многоканального приемного устройства для обработки сигналов с разным запаздыванием и частотой.

К началу работ по планетной радиолокации 2012 года, после почти 20-летнего перерыва, была проведена глубокая модернизация аппаратуры планетного радиолокатора, в результате чего существенно поменялась технология проведения и обработки измерений, в частности, принята иная методика коррекции Доплеровских искажений сигнала. Для пояснения особенностей радиолокации нового этапа рассмотрим схему проведения измерений на **рис. 1** [3]. 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.), то общее время запаздывания  $\tau$  будет равно:

$$\tau = 0.5 |r_{12} + r_{23}|, \tag{1}$$

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

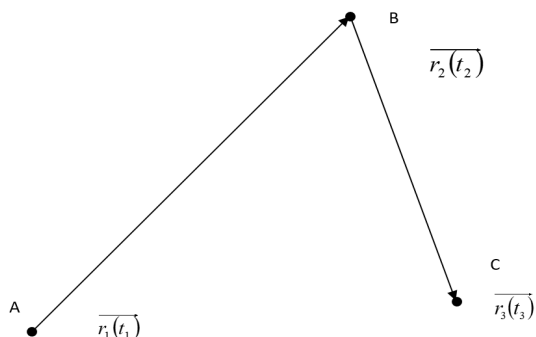
$$r_{12} = |\dot{r}_2(t_2) - \dot{r}_1(t_1)|, \tag{2}$$

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

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

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

где  $f_1$  — частота излученного сигнала,  $V_{12}$  — взаимная скорость радиолокатора и отражающей



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

поверхности при прохождении сигнала к планете,  $c$  – скорость света. Отраженный сигнал приходит к радиолокатору с частотой  $f_3$ , равной

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

где  $V_{23}$  — взаимная скорость планеты и радара при приеме сигнала. Частоты излученного и принятого сигналов связаны следующим соотношением:

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

Доплеровский сдвиг частоты на приеме равен

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

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

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

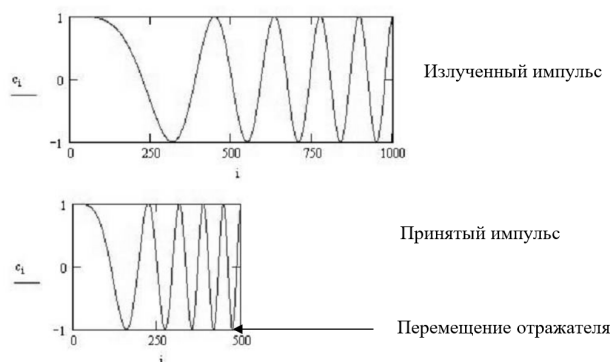
то на приемной стороне выражение для сигнала будет иметь вид

$$s_r(t_r) = a(t_r) \cos(2\pi f_3 t_r). \tag{9}$$

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

Коэффициент  $\eta$  из (6) фактически является масштабным коэффициентом деформации временной структуры зондирующего сигнала:

$$f_1 t_{tr} = \eta f_3 t_r = f_3 t_r. \tag{10}$$



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

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

$$s_r(t_{int}) = a(t_r \eta) \cos(2\pi f_i t_r \eta). \quad (11)$$

Новый алгоритм устранения доплеровского эффекта заключался в излучении сигнала с фиксированными параметрами и деформации масштаба времени в принятом сигнале. Деформация шкалы времени заключалась в том, что элементарный шаг по времени при выборке последовательных отсчетов деформированного сигнала брался равным не интервалу между отсчетами  $dt_r$ , а  $dt_r \eta$ . Номер  $k$ -го отсчета деформированного сигнала есть целая часть от  $k\eta dt_r$ . Деформация временной шкалы может выполняться путем пропуска или дублирования некоторых отсчетов принятого сигнала. Заметим, что величина  $\eta$  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 был тот факт, что перед регистрацией сигнал в приемном тракте переносится с несущей на некую промежуточную частоту в области низких частот, а потому вместо (11) запишем

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

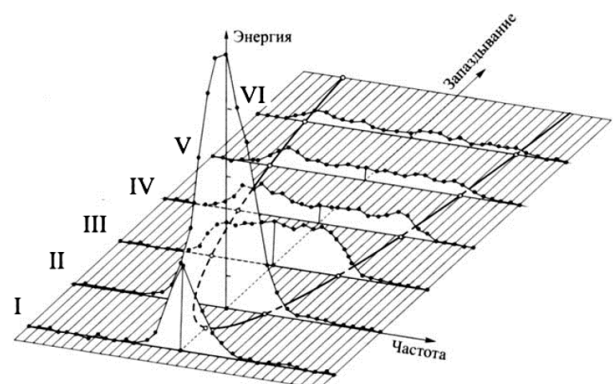
где  $f_g$  – частота гетеродинного колебания, а  $f_i$  – промежуточная частота, в простейшем случае содержащая доплеровскую поправку к несущей. Правильная последовательность действий включает в качестве первого этапа перенос сигнала с частоты  $f_i$  на нулевую частоту (устранение Доплера на несущую), а вторым – устранение Доплера на огибающую  $a(t_r)$ .

### 3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИГНАЛА, ОТРАЖЕННОГО ПОВЕРХНОСТЬЮ ПЛАНЕТЫ

Планета является протяженной целью с сильно пересеченным рельефом, 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**.

Поскольку схема обработки с ЛЧМ-гетеродинированием наиболее проста в вычислительном плане, примем ее 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. 3.** Распределение отраженного сигнала по запаздыванию и частоте.



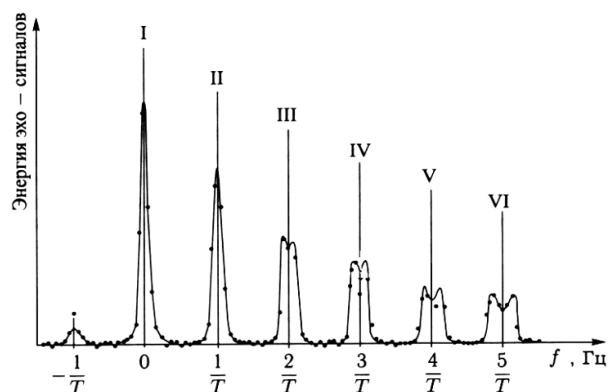


Рис. 4. Распределение отраженного сигнала после ЛЧМ-гетеродинамирования на приеме.

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

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

Здесь  $m$  – номер спектрального отсчета,  $B$  – коэффициент пропорциональности, учитывающий площадь антенны радиолокатора, мощность и длину волны излучаемого сигнала и расстояние до планеты. Интегрирование идет по площади элемента разрешения  $s$  на поверхности планеты. Удельная эффективная площадь рассеяния  $\sigma_0(\vec{r})$  где  $r$  – радиус-вектор от точки наблюдения к точке поверхности планеты, описывается формулой:

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

где  $\rho_0$  – коэффициент зеркального отражения,  $C$  – параметр шероховатости в формуле Хэгфорса, описывающей диаграмму обратного рассеяния поверхности планеты,  $\theta$  – угол падения радиоволны на поверхность планеты,  $A_k(x, y)$  аппаратная функция зондирующего периодически повторяющегося ЛЧМ сигнала в прямоугольных координатах  $\{x, y\}$  на поверхности планеты. Громоздкое выражение для аппаратной функции можно найти в [4].

#### 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 после регистрации эхо-сигнала было устранение искажения сигнала вследствие Доплеровского эффекта (Доплер на несущую и огибающую). Следующий этап – ЛЧМ-гетеродинамирование 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.

#### 5. РЕЗУЛЬТАТЫ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ 2012 ГОДА

Основная серия работ по калибровке аппаратуры модернизированного планетного радиолокатора на базе антенны РТ-70 и обработке методик радиолокационных измерений проводилась в период с 11 по 18 июня 2012 года, в районе нижнего соединения Венеры с Землей. Месяцем ранее, 27 апреля, в рамках работ по тестированию математического обеспечения была проведена

однодневная серия радиолокационных наблюдений Венеры и Марса. В каждый из дней наблюдений выполнялись работы по Венере и Марсу.

Типовой сеанс измерений состоял из цикла излучения, цикла приема и паузы, необходимой для подготовки к следующему сеансу. Сеансы отличались друг от друга длительностью цикла излучения, объектом измерений (Венера, Марс) и типом излучаемого сигнала (несущая, ЛЧМ-сигнал с различными параметрами – девиацией и периодом повторения). Всего было проведено около 50 сеансов. Отношение сигнал-шум, оцененное по сеансам радиолокации Венеры с несущей, составило ~30 дБ, что близко к теоретическим оценкам для этой планеты на расстоянии 44 млн км с параметром шероховатости Хэгфорса  $C = 400$ , отражательной способностью поверхности  $\rho = 0.05$  при мощности передатчика ПРА 100 кВт и шумовой температуре приемной системы 30°.

Измерения дальности до Венеры проводились в сеансах с ЛЧМ-сигналом с девиацией 100, 200, 400, 500 кГц и периодом повторения 20 и 30 мс. Поскольку неизвестная аппаратная задержка приемо-передающего тракта может быть источником ошибок при измерении параметров движения планеты, в начале каждого сеанса производилась запись зондирующего сигнала в режиме "кольца". Аппаратная задержка вычислялась по взаимному положению во времени момента начала формирования ЛЧМ-сигнала на излучение и положению ЛЧМ-импульса при приеме.

Результаты первичной обработки, спектры отраженного сигнала Венеры (рис. 5) после коррекции доплеровского эффекта и ЛЧМ фильтрации приведены ниже для

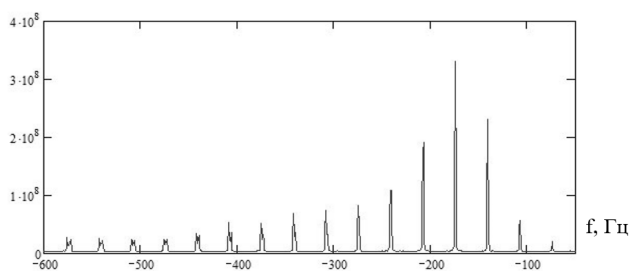


Рис. 5. Спектр отраженного Венерой ЛЧМ сигнала 11.06.12 в сеансе №3 вблизи номинала. Девиация частоты 195 КГц, период 30 мс.

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 располагаются номера фильтров спектра.

Сплошная линия на рис. 6 — модельный спектр, 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

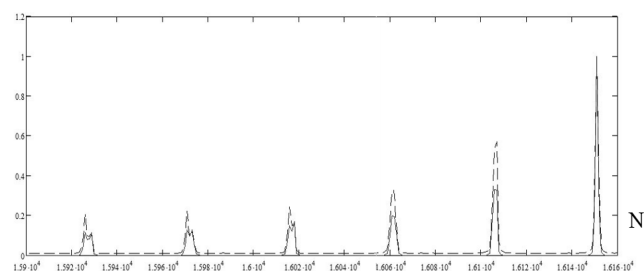
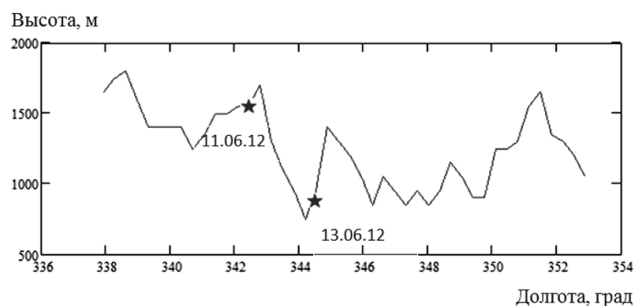


Рис. 6. Совмещение реального и модельного спектров сигнала для сеанса №7 от 11.06.12.

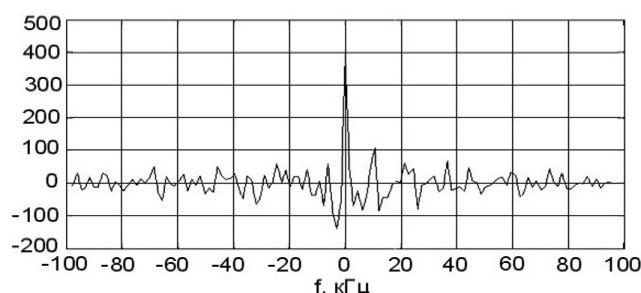


**Рис. 7.** Профиль высот поверхности Венеры по данным радаро-профилографа космического аппарата Магеллан с положением подлокаторной точки в сеансах 11.06.2012 и 13.06.2012 г.

спутника Магеллан в экваториальной области в диапазоне долгот  $336^{\circ}$ - $354^{\circ}$ . Звездочками отмечено положение подлокаторной точки 11 июня (слева) и 13 июня (справа).

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.

В сеансах радиолокации Марса также применялись несущая и ЛЧМ-сигнал с девиацией 32 кГц и периодом повторения 1 кГц. Из-за большой дальности до Марса в июне 2012 г (больше 180 млн км) сигнал с отношением сигнал/флуктуации шума  $\sim 10$ , близким к теоретическому, был обнаружен только в одном сеансе с излучением сигнала несущей. На **рис. 8** приведен спектр эхо-сигнала от Марса с разрешением по частоте 800 Гц, полученный после вычитания шумового пьедестала в виде гладкой аппроксимации



**Рис. 8.** Спектр несущей сигнала после вычитания шума для Марса в сеансе от 13.06.12.

смеси сигнала и шума полиномом 12-й степени.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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, что этот вид искажения устранялся после регистрации эхо-сигнала в широкой полосе на Земле. Получены измерения дальности до Венеры в районе нижнего соединения с Землей 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. Котельников ВА. *Собрание трудов. Т.2. Космическая радиофизика и астрономия.* М., Физматлит, 2009, 396 с.
2. Бакитько РВ, Васильев МБ, Виницкий АС, Зайцев АЛ, Гришмановский ВА. *Радиосистемы межпланетных космических аппаратов.* М., Радио и Связь, 1993, 326 с.
3. Александров ЮН, Кузнецов БИ, Петров ГМ, Ржига ОН. Методика радиолокационных астрометрических наблюдений. *Астрономич. журн.*, 1972, 49(1):175-185.
4. Хасянов АФ. Радиолокационные исследования профилей высот и отражательных характеристик поверхностей Венеры и Марса. *Дис. канд. физ-мат. наук.* М., 1981.

**Захаров Александр Иванович**

*д.ф.-м.н., с.н.с.*

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

**Захарова Людмила Николаевна**

*к.ф.-м.н., с.н.с.*

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

**Набатов Александр Сергеевич**

*к.ф.-м.н., с.н.с.*

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

**Синило Виктор Павлович**

*к.ф.-м.н., с.н.с.*

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

**Сорочинский Марк Вацлавович**

*к.ф.-м.н., с.н.с.*

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

## **RADAR OBSERVATIONS OF PLANETS WITH RT-70 PLANETARY RADAR IN EVPATORIA**

**Alexander I. Zakharov, Lyudmila N. Zakharova, Alexander S. Nabatov, Viktor P. Sinilo, Mark V. Sorochinskii**

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

aizakhar@ire.rssi.ru, zakharova@ire.rssi.ru, nabatov@ire.rssi.ru, sinilo@ire.rssi.ru, sorochinskii@ire.rssi.ru

---

*Abstract.* In 2012, after a 20-year break, radar observations of the planets in Evpatoria were resumed with a use of upgraded planetary radar with RT-70 antenna. One of the features of radar operations in 2012 was a new scheme of correction the Doppler distortion of sounding signal. The correction was implemented in digital form after wide band registration of the echo signal. This correction was performed in a form of monotonous adjustment of signal sampling frequency in accordance with nonlinear law of two-way delay variations estimated from the model of the planet motion with respect to radar. The sequence of further signal processing stages included chirp heterodyning, filtering into a narrow frequency band with reduction of the signal sampling frequency, calculation and incoherent accumulation of power spectra. The technique of the spectra analysis in the range measurements procedure utilized precalculated reference radiophysical spectra of the signal scattered by the planet. Measurements of the distance to Venus near the interior conjunction were made, and 3.8 km discrepancy with a forecast was found. Because of too large distance to Mars (more than 180 million km), signal scattered by this planet was discovered only in one session with carrier signal. The results of radar observations confirm the operability of the RT-70 radar instrument in Evpatoria and ground-based signal processing software.

*Keywords:* radar astronomy, chirp signal, signal spectrum, planet orbit

UDC 621.396.967; 621.396.962

*Bibliography* - 4 references

RENSIT, 2018, 10(2):167-174

Received 10.09.2018

DOI: 10.17725/rensit.2018.10.167