

УДК 535.37:523.42

## О ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МЕТОДА РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ

А. Л. Гаврик, Ю. А. Гаврик, Т. Ф. Копнина  
Институт Радиотехники и Электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский  
филиал

Получена 5 мая 2011 г.

**Аннотация.** Показано, что новые радиофизические эксперименты, в которых бортовое оборудование спутника планеты принимает когерентные сигналы, излучаемые наземным комплексом, и осуществляет измерения их мощности и фазы, позволяют увеличить чувствительность метода радиозатмений. В таких экспериментах потенциал радиолинии увеличивается в  $\sim 10$  раз по сравнению с традиционными экспериментами, что увеличивает точность результатов и пространственно-временное разрешение метода радиопросвечивания ионосферы и атмосферы планеты.

**Ключевые слова:** радиопросвечивание, распространение радиоволн, ионосферы и атмосферы планет.

**Abstract.** It is shown that new radio physical experiments in which the on-board equipment of orbital spacecrafts receives coherent radio waves transmitted from the ground-based station and measures the power and phase of these waves are needed to increase the sensitivity of radio occultation observations. These experiments will enable one to increase the capacity of the radio link by a factor of about 10 compared with that of traditional experiments, thus increasing the accuracy of the results and the space-time resolution of radio occultation of the ionosphere and the atmosphere of a planet.

**Keywords:** occultation, radio wave propagation, ionosphere and atmosphere of planets.

### ВВЕДЕНИЕ

В течение длительного времени средства радиосвязи с межпланетными космическими аппаратами использовались в научных целях – для радиозондирования межпланетной и околосолнечной плазмы, ионосфер и

атмосфер планет, бистатической радиолокации поверхностей планет, что позволяло получать физические характеристики космических объектов по результатам радиофизических экспериментов, осуществлявшихся всеми отечественными космическими миссиями [1].

При исследованиях атмосферы и ионосферы планеты методом радиопросвечивания анализируются возмущения когерентных радиосигналов, распространяющихся между орбитальным аппаратом (ОА) и Землей, или между двумя ОА на орбите планеты. Радиопросвечивание околопланетного пространства осуществляется в тех случаях, когда излучающий радиосигналы ОА заходит за диск планеты или выходит из-за него, а приемный комплекс ведёт регистрацию измененных газовой оболочкой планеты сигналов. Теоретической основой метода радиопросвечивания является связь обусловленных средой изменений частоты и амплитуды радиоволн с углом рефракции, который, в свою очередь, связан с высотным профилем показателя преломления среды на пути распространения радиоволн и, следовательно, с концентрацией нейтральных и заряженных частиц. Двухчастотное радиопросвечивание расширяет возможности изучения характеристик атмосферы и ионосферы, т.к. использует различия фазовых скоростей распространения волн в диспергирующей среде для выделения ионосферных эффектов, устраняя мешающие факторы, не связанные с влиянием плазмы. В результате решения обратной задачи двухчастотного радиопросвечивания определяется вертикальный профиль электронной концентрации, который характеризует строение ионосферы во всем диапазоне высот от нижней границы ионосферы до ионопаузы.

Все ранее выполненные эксперименты по исследованию распространения радиоволн вблизи планет проводились в режиме излучения сигналов с борта ОА на Землю. Исключением является эксперимент с аппаратом MARINER-5, где использовался бортовой приемник, регистрировавший мощности и приведенную разность фаз двух когерентных сигналов наземного излучателя [2].

Цель настоящего сообщения состоит в развитии высокоинформативных радиофизических методов, основанных на существенном повышении энергетического потенциала радиолинии, для исследований тонкой структуры околопланетного пространства на примере результатов радиопросвечивания, полученных с помощью ОА ВЕНЕРА-15,-16 (радиоволны диапазонов 32 и 8 см).

### 1. Ограничения метода радиопросвечивания

Метод радиозатмений обеспечивает получение данных, которые невозможно или очень трудно собрать другими методами. К таким данным можно отнести усредненные по пространству вдоль радиолинии характеристики волновых явлений и турбулентности, вертикальные профили концентрации электронов и местоположение слоистых структур в ионосфере планеты. Эта и иная информация может быть получена с высоким разрешением (~100 м) на высотах от нижней границы ионосферы до ионопаузы за время эксперимента ~5 мин [3-6]. Точность интерпретации результатов радиопросвечивания имеет принципиальное значение, т.к. определяет возможность дальнейшего использования полученных характеристик при разработке моделей строения и динамики ионосферы. Достоверность информации зависит от соотношения между радиофизическими эффектами, обусловленными исследуемой средой и мешающими факторами.

К характерным особенностям высокоинформативных экспериментов радиопросвечивания на трассе *ОА→Земля* относятся следующие:

- использование "мощного" бортового передатчика, излучающего два когерентных сигнала с помощью антенны большого диаметра;
- применение высокостабильного, термостатированного, стойкого к радиации бортового эталонного генератора;
- обеспечение высокой стабильности по фазе, групповой задержке и амплитуде в бортовой и наземной радиоаппаратуре;
- обеспечение оптимальной траектории ОА и высокой стабильности ориентации антенны ОА на Землю.

Одной из главных причин ограничения точности радиозатменных данных обычно являются инструментальные погрешности, которые определяются техническими характеристиками используемых радиосистем и в первую очередь, энергетическим потенциалом радиолинии. Максимальная чувствительность метода двухчастотного радиопросвечивания достигается только тогда, когда обеспечивается высокое отношение сигнал/шум на входе приемных устройств.

Уравнение для определения мощности принятого сигнала  $P_r$  в зависимости от параметров систем излучения и приема записывается следующим образом:

$$P_r = \frac{P_T \cdot G_T}{4\pi R^2} A_r. \quad (1)$$

Мощность принятого сигнала прямо пропорциональна плотности потока мощности излучения у приемной антенны и эффективной площади приемной антенны  $A_r$ , расположенной на расстоянии  $R$  от излучающей антенны ( $P_T$  - мощность излучения,  $G_T$  - коэффициент усиления излучающей антенны). Коэффициент усиления и эффективная площадь апертуры антенны  $A_T$  зависят от длины радиоволны  $\lambda$  и связаны соотношением:

$$G_T = 4\pi A_T / \lambda^2. \quad (2)$$

Апертура антенны определяет диаграмму направленности антенны. Ширину диаграммы направленности  $\gamma$  антенны диаметром  $D$  можно оценить из приближенного соотношения:

$$\gamma = \lambda / D. \quad (3)$$

Приемная антенна с эффективной площадью апертуры  $A_r$  улавливает только часть излученной мощности сигнала. При отсутствии активных помех шумовую составляющую принятого сигнала можно считать белым гауссовским шумом и тогда мощность шумов приемника в полосе частот  $\Delta n$ , согласованной с полосой принимаемого сигнала, определяется соотношением:

$$P_n = k T_s \Delta n, \quad (4)$$

где  $T_s$  - температура шумов приемника,  $k$  - постоянная Больцмана. Отношение

сигнал/шум ( $s/n$ ) находится как отношение мощности спектральной линии сигнала в согласованном с принимаемым сигналом фильтре к уровню мощности постоянной подставки, обусловленной шумом:

$$s/n = \frac{P_r}{P_n} = \frac{P_T \cdot G_T \cdot A_r}{4\pi \cdot R^2 \cdot K \cdot T_s \cdot \Delta n}. \quad (5)$$

Отношение сигнал/шум существенно влияет на величину погрешностей, обусловленных инструментальными случайными флуктуациями мощности, фазы и частоты принятых радиосигналов, и, следовательно, определяет чувствительность и разрешающую способность метода радиопросвечивания (чем больше энергия сигнала по сравнению с энергией шума, тем точнее определяются параметры радиосигналов и, следовательно, характеристики просвечиваемой среды). Увеличение потенциала радиолинии достигается согласно (5) увеличением мощности излучения, увеличением площади излучающей и приемной антенн, уменьшением температуры шума приемника.

Достоинством эксперимента радиопросвечивания на трассе **ОА→Земля** является отсутствие необходимости передачи на Землю большого объема информации с борта спутника, недостатком такого эксперимента является необходимость обеспечения высокой мощности излучения с помощью антенны большого диаметра. При реализации эксперимента приходится учитывать, что диаметр антенны ограничивается весогабаритными требованиями, а мощность излучения ограничивается энергообеспечением ОА.

Увеличение энергетического потенциала радиолинии более чем в 10 раз можно получить, только если вместо бортовых передатчиков использовать передатчики наземных станций дальней космической связи, сигналы которых будут обрабатываться бортовыми приемниками [7]. Действительно, в экспериментах радиопросвечивания на трассе **Земля→ОА** мощности излучаемых с наземного пункта когерентных сигналов можно увеличить до десятков киловатт, кроме того, улучшится их стабильность и когерентность благодаря использованию квантового генератора опорного сигнала в наземном комплексе.

В настоящее время максимальная мощность бортового передатчика может составлять ~50 Вт, диаметр бортовой антенны не превышает ~2 м, температура шумов наземного приемника составляет ~60°. Мощность излучения наземного передатчика можно увеличить до 20 кВт и более, диаметр бортовой антенны можно уменьшить до ~1 м, а температура шумов бортового приемника составит ~600°. Из соотношения (5) следует, что потенциал радиолинии при излучении с наземного пункта увеличится в 10 раз, что позволит измерять мощности, фазы и частоты радиосигналов на коротких интервалах времени (~0.01 с).

Бортовые приемники когерентных сигналов в настоящее время активно используются при радиопросвечивании атмосферы Земли по трассе *спутник→спутник* [8]. Компактные бортовые приемники сигналов с малым весом и энергопотреблением, созданные на современной элементной базе, позволяют проводить измерения и обработку материалов радиопросвечивания на борту ОА в реальном масштабе времени, хранить информацию и передавать ее на Землю по штатному телеметрическому каналу.

## 2. Результаты радиопросвечивания

На межпланетных станциях ВЕНЕРА-15,-16 и ВЕГА-1,-2 использовались мощные передатчики (~100 Вт) сигнала диапазона 32 см и излучающие антенны большого диаметра (~2 м), что обеспечило достаточно высокое отношение сигнал/шум при регистрации в центре дальней космической связи данных радиопросвечивания ионосфер Венеры [9-11] и кометы Галлея [12-14].

В качестве примера на рис.1 представлены вариации мощности  $X_{DM}(t)$  и  $X_{CM}(t)$  сигналов диапазонов 32 см (DM) и 8 см (CM) при просвечивании ионосферы и атмосферы Венеры на ночной стороне. Мощность передатчика CM-сигнала (~10 Вт) была существенно меньше мощности передатчика DM-сигнала, поэтому аппаратурные флуктуации  $X_{CM}(t)$  в 3...4 раза превышали флуктуации  $X_{DM}(t)$ . Отметим, что выше 100 км в ночной ионосфере рефракционные эффекты, обусловленные влиянием плазмы, на зависимостях  $X_{CM}(t)$  и  $X_{DM}(t)$  незаметны, т.к. в данном сеансе они оказались сравнимы по величине с шумом. На высотах ниже 90 км наблюдается корреляция вариаций

$X_{DM}(t)$  с  $X_{CM}(t)$ , которая свидетельствует о влиянии атмосферы Венеры.

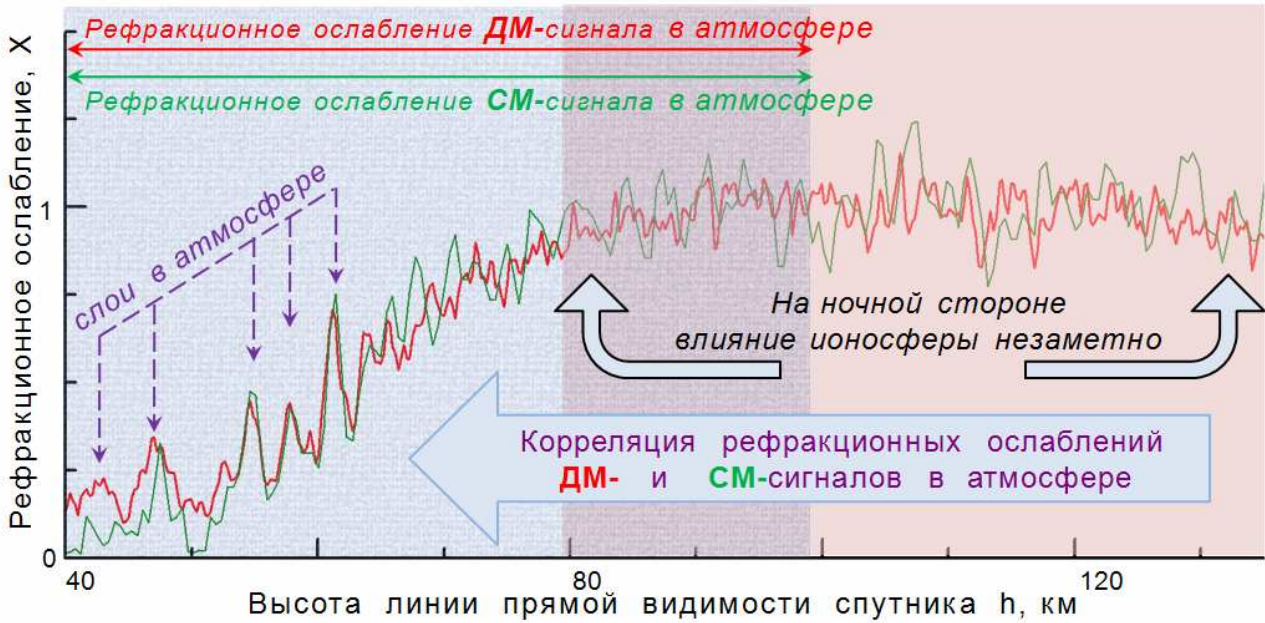


Рис.1. Сравнение рефракционных ослаблений ДМ (красная кривая) и СМ (зеленая кривая) сигналов при радиопросвечивании ионосферы и атмосферы на ночной стороне Венеры.

На рис.2 представлены вариации мощности  $X_{DM}(t)$  и  $X_{CM}(t)$  при просвечивании ионосферы и атмосферы Венеры на дневной стороне. Выше 100 км рефракционные эффекты, обусловленные влиянием плазмы, на зависимости  $X_{CM}(t)$  незаметны, т.к. они не превышают величину флуктуаций, обусловленных шумом. Влияние плазмы на ДМ-сигнал в 16 раз больше и существенно превышает по величине флуктуации шума, но однозначно выделить на зависимости  $X_{DM}(t)$  эффекты влияния плазмы на фоне шумов и влияния нейтральных компонент достаточно трудно. На рис.2 видно, что ниже 90 км появляется нарастающее рефракционное ослабление  $X_{DM}(t)$  и  $X_{CM}(t)$ , обусловленное атмосферой, вариации зависимостей  $X_{DM}(t)$  и  $X_{CM}(t)$  одинаковые для ДМ- и СМ-сигналов (разница в пределах погрешностей измерений). Трудность интерпретации зависимости  $X_{DM}(t)$  заключается в том, что на высотах 70...110 км невозможно отличить вариации  $X_{DM}(t)$ , обусловленные атмосферой, от вариаций  $X_{DM}(t)$ , обусловленных ионосферой.

Методика выделения влияния плазмы на фоне влияния атмосферы и шума базируется на выявленной теоретической связи вариаций независимых

параметров зондирующих радиосигналов [15], именно она позволяет исследовать тонкую структуру ионосферы. Для анализа необходимо определить из экспериментальных данных приведенную разность частот  $\delta f(t)$ , обусловленную влиянием только плазмы, и затем по функции  $\delta f(t)$  восстановить вариации частоты ДМ-сигнала  $\Delta f(t)$  [16,17]. Из выводов работ [16,17] следует, что по зависимости  $\Delta f(t)$  можно вычислить прогнозируемое рефракционное ослабление ДМ-сигнала  $X_{\Delta f}(t)$ :

$$X_{\Delta}(t) = 1 + \frac{c \cdot L}{f_0 V_{\perp}^2} \cdot \frac{d}{dt} \Delta f(t) \quad (6)$$

где  $c$  - скорость света,  $L$  - расстояние от спутника до перицентра радиолуча,  $h$  - высота радиолуча над поверхностью планеты,  $V_{\perp} = dh/dt$  - вертикальная компонента скорости захода или выхода спутника,  $f_0$  - частота несущей. Сравнение  $X_{DM}(t)$  и  $X_{CM}(t)$  с рассчитанной из частоты функцией  $X_{\Delta f}(t)$ , выявление совпадений и различий обеспечивает выделение регулярных структур просвечиваемой ионосферы из вариаций, обусловленных шумом или нейтральной атмосферой [16,17].

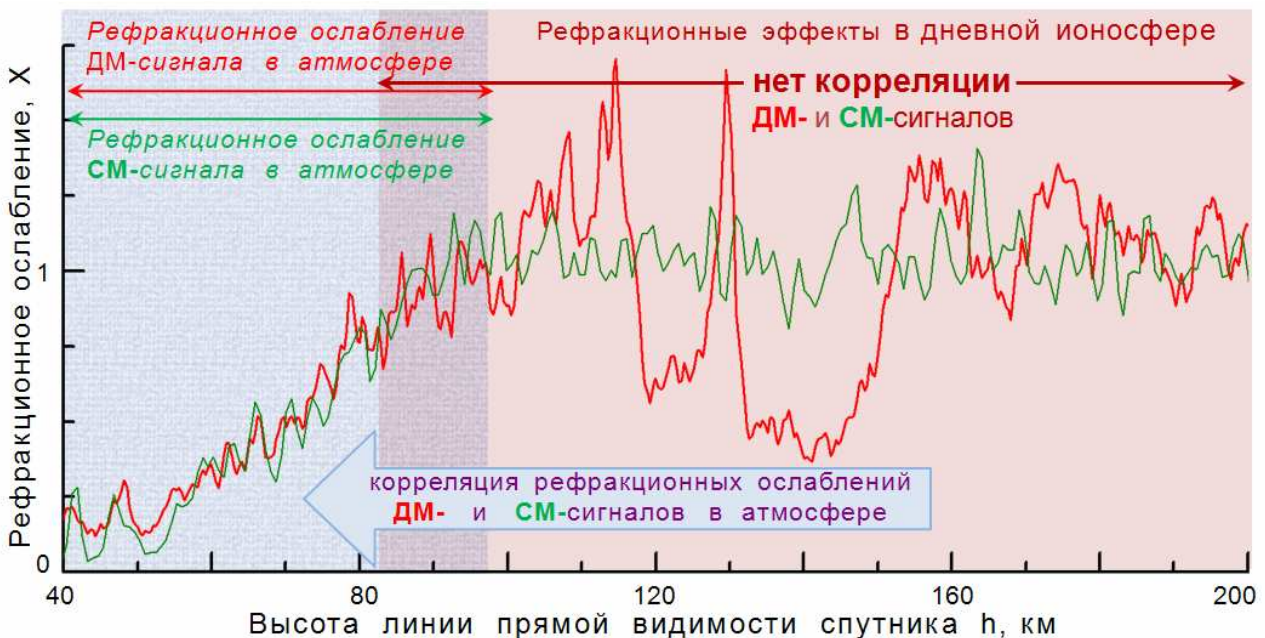


Рис.2. Сравнение рефракционных ослаблений ДМ (красная кривая) и СМ (зеленая кривая) сигналов при радиопросвечивании ионосферы и атмосферы на дневной стороне Венеры.

Сравнение  $X_{DM}(t)$  с функцией  $X_{\Delta f}(t)$  представлено на рис.3. Корреляция



$X_{DM}(t)$  с  $X_{\Delta f}(t)$  в ионосфере демонстрирует возможность радиовидения плазменных слоев как на малых высотах 80...120 км, где влияние атмосферы, ионосферы и шума сравнимы по величине, так и выше максимума ионизации, где концентрация электронов быстро уменьшается с увеличением высоты. Анализ корреляции  $X_{DM}(t)$  с  $X_{\Delta f}(t)$  особенно важен для исследования тонкой структуры ионосферы, когда эффекты сравнимы по величине с флуктуациями шума. Например, на границах плазменных слоев резко изменяется градиент электронной концентрации, что приводит к фокусировке (или расфокусировке) радиоволны с увеличением (или уменьшением) ее мощности, именно такие эффекты являются индикатором слоистых структур. Наличие многочисленных областей фокусировки на рис. 3 свидетельствует о слоистой структуре дневной ионосферы Венеры.



Рис.3. Сравнение рефракционных ослаблений ДМ-сигнала при радиопросвечивании ионосферы и атмосферы на дневной стороне Венеры, полученных по измерениям мощности  $X_{DM}$  (красная кривая) и вычисленных из частотных данных  $X_{\Delta f}(t)$  (синяя кривая).

На высотах 80...115 км (рис.3) четко обнаруживаются нижние слои ионосферной плазмы, которые ранее не наблюдались ни в одной миссии и

физические механизмы их формирования неизвестны. О существовании слоев нижней части ионосферы свидетельствует наличие максимумов и минимумов  $X_{\Delta f}(t)$  (напомним, что вариации  $X_{\Delta f}(t)$  не зависят от влияния атмосферы), совпадающих с вариациями  $X_{DM}(t)$ , на высотах от 80 до 115 км. Совпадения вариаций  $X_{\Delta f}(t)$  и  $X_{DM}(t)$  обусловлены влиянием именно ионосферной плазмы, как это следует из (6), а не шумом и не межпланетной плазмой. Флуктуации шума  $X_{\Delta f}(t)$  и  $X_{DM}(t)$  не коррелированы, т.к. погрешности измерений частоты и мощности (дифференциальной и интегральной характеристик сигнала) имеют разные источники. Флуктуации  $X_{\Delta f}(t)$  и  $X_{DM}(t)$  в межпланетной плазме также не коррелированы [18], т.к. соотношение (6) выполняется только при просвечивании ионосферы. Поэтому при отсутствии регулярных плазменных структур в области максимального сближения радиолуча с поверхностью планеты корреляция флуктуаций  $X_{\Delta f}(t)$  с  $X_{DM}(t)$  всегда отсутствует, что подтверждается сравнением  $X_{\Delta f}(t)$  с  $X_{DM}(t)$  в атмосфере ниже 80 км и результатами сравнения данных на контрольном участке измерений, свободном от влияния ионосферы.

Обнаружение новых свойств ионосферы Венеры стало возможным благодаря высокому потенциалу радиолинии КА ВЕНЕРА-15,-16. Высокое значение  $s/n$  обеспечило возможность определения  $X_{DM}(t)$  и  $X_{\Delta f}(t)$  на малых временных интервалах измерений  $\Delta t = 0.058$  с. На рис.4 представлены результаты сравнения  $X_{DM}(t)$  с  $X_{\Delta f}(t)$  при разных интервалах  $\Delta t = 0.47, 0.23, 0.116, 0.058$  с в дневной ионосфере. Временной интервал  $\Delta t = 0.46$  с примерно соответствует времени прохождения радиолучом области в ионосфере, соответствующей размеру первой зоны Френеля. Такой интервал измерений обычно использовался при дискретизации данных радиопросвечивания [9-11] и обеспечивал малые шумовые флуктуации, т.к. уменьшение интервала измерений параметров сигнала в 2 раза уменьшает энергию сигнала в 2 раза, что приводит к увеличению в 2 раза среднеквадратичного значения флуктуаций частоты сигнала. Сравнение кривых 1, 2 свидетельствует о том, что шумовые флуктуации на функциях  $X_{DM}(t)$  и  $X_{\Delta f}(t)$  маленькие, но наблюдаются

существенные различия между регулярными вариациями  $X_{DM}(t)$  и  $X_{\Delta f}(t)$ . Сравнение кривых 3, 4 свидетельствует о том, что при уменьшении временного интервала до  $\Delta t = 0.23$  с различие между  $X_{DM}(t)$  и  $X_{\Delta f}(t)$  уменьшается.

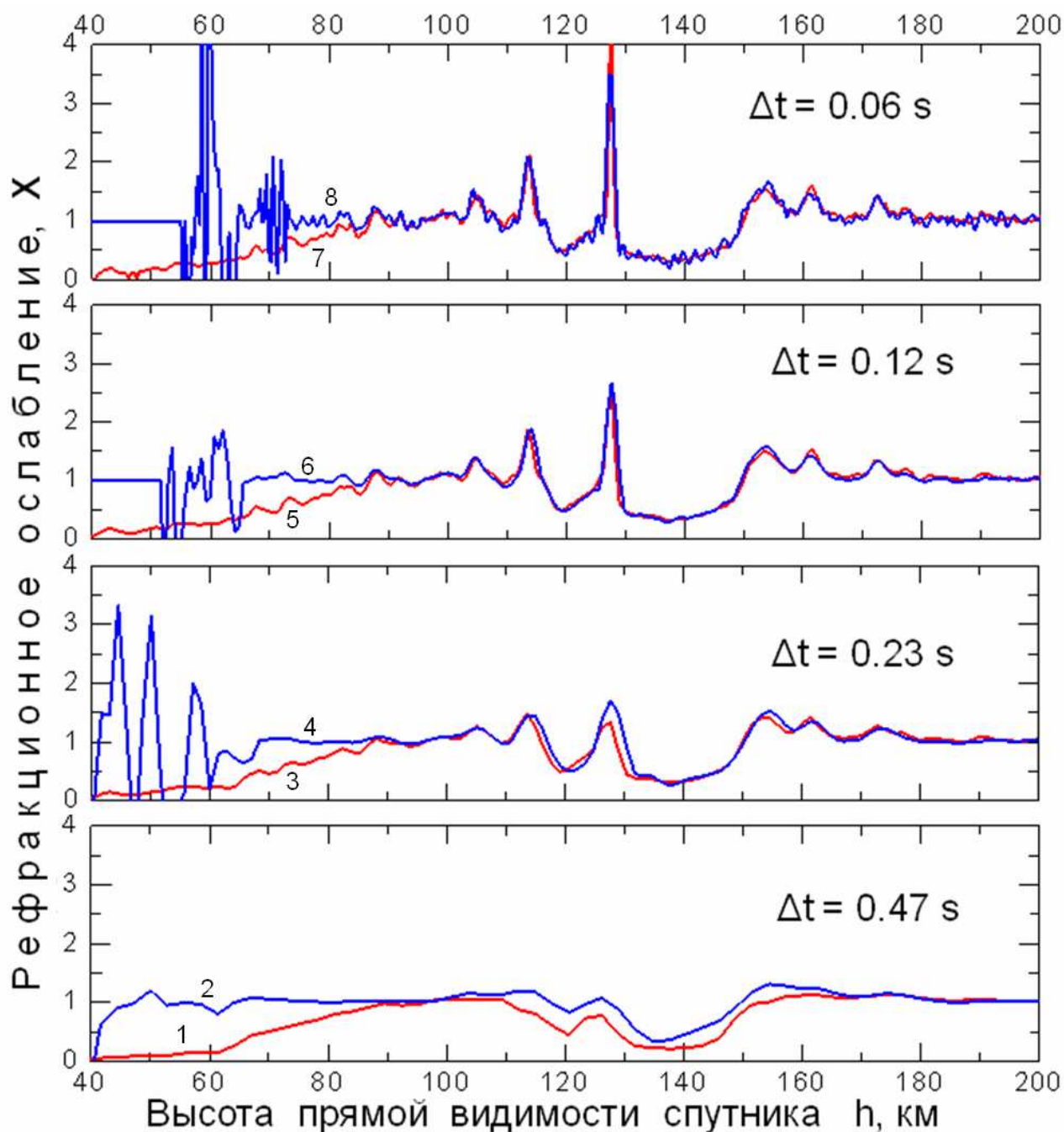


Рис.4. Сравнение рефракционных ослаблений ДМ-сигнала при радиопросвечивании ионосферы и атмосферы на дневной стороне Венеры, полученных по измерениям мощности  $X_{DM}$  (красная кривая) и вычисленных из частотных данных  $X_{\Delta f}(t)$  (синяя кривая), при разных интервалах времени между измерениями  $\Delta t = 0.47, 0.23, 0.12, 0.06$  с.

Совпадение  $X_{DM}(t)$  и  $X_{\Delta f}(t)$  появляется при  $\Delta t = 0.116$  с (кривые 5, 6), при

таким  $\Delta t$  шумы еще достаточно малые, четко выявляется влияние ионизированных слоев, но необходимо убедиться в том, что уменьшение  $\Delta t$  не изменит радиофизические эффекты. При  $\Delta t = 0.058$  с (кривые 7, 8) радиофизические эффекты изменяются и становятся более достоверными, т.к. наблюдается рефракционное усиление мощности сигнала в 4 раза и проявляется корреляция даже мелкомасштабных структур зависимостей  $X_{DM}(t)$  и  $X_{\Delta f}(t)$ . Интервал измерений  $\Delta t = 0.058$  с является минимально возможным, т.к. энергия сигнала становится малой и начинаются эффекты нелинейного усиления шума при измерениях, заметные на зависимости  $X_{\Delta f}(t)$  (кривая 8 рис.4). Дальнейшее уменьшение  $\Delta t$  невозможно из-за недостаточной энергии сигнала для точных измерений, при уменьшении  $\Delta t$  наблюдается резкое увеличение флуктуаций шума и неправильное определение параметров сигналов.

Представленные результаты демонстрируют необходимость существенного повышения энергетического потенциала радиолинии, используемой для проведения экспериментов радиопросвечивания. Только при высоком энергетическом потенциале радиолинии можно обеспечить высокую точность измерений параметров радиоволн на коротких интервалах времени, именно это позволит экспериментально проверить используемые приближения теории распространения радиоволн и увеличит пространственно-временное разрешение результатов радиопросвечивания для выявления новых свойств газовой оболочки планеты при осуществлении новых космических программ [7].

### **3. Увеличение чувствительности метода радиопросвечивания**

Для уменьшения  $\Delta t$  до величины 0.01 с или меньше необходимо существенно поднять потенциал радиолинии. При современном состоянии элементной базы это можно сделать путем изменения традиционной методики радиопросвечивания. Развитие цифровых технологий позволяет реализовать совершенно новые эксперименты. В таких сеансах радиопросвечивания наземный приёмно-передающий комплекс будет обеспечивать излучение в

режиме несущих (без модуляции) когерентных радиосигналов в направлении исследуемой планеты. Антенна ОА (или нескольких ОА), направленная на Землю, будет принимать эти когерентные сигналы, и они будут обрабатываться бортовым приемником, осуществляющим измерения мощностей и фаз принятых сигналов, а также спектров эхо-сигналов при бистатической радиолокации. Результаты измерений сохраняются в запоминающем устройстве и после окончания экспериментов передаются на Землю по штатному каналу связи. Принятая на Земле информация записывается и передается потребителям для научного анализа.

Анализ новой методики радиопросвечивания на трассе *Земля→ОА* позволяет сформулировать следующие ее достоинства.

1. Значительно уменьшается энергопотребление и вес бортовой аппаратуры, предназначенной для проведения радиофизических исследований. Вес бортового приемника не превышает 1 кг, а его энергопотребление не превышает 2 Вт.
2. Появляется возможность излучения высокостабильных сигналов с высокой степенью когерентности благодаря использованию квантового наземного генератора опорных сигналов, что существенно увеличит точность результатов радиофизических исследований.
3. Появляется возможность излучения сигналов высокой мощности (~20 кВт и более), что обеспечит очень высокое отношение сигнал/шум на входе бортового приемника (в соответствии с соотношением (5) в ~100 и более раз выше, чем в эксперименте *ОА→Земля*), а это увеличивает и точность, и пространственно-временное разрешение результатов радиофизических исследований.
4. При высоком потенциале радиолинии может быть исследована самая нижняя часть ионосферы Венеры, обнаруженная недавно. Ее влияние во многих экспериментах было незаметно из-за мешающего влияния инструментальных шумов. Возможно, также, что высокий потенциал радиолинии позволит выявить нижнюю область ионосферы на Марсе.

5. Высокое пространственно-временное разрешение результатов радиопросвечивания обеспечит идентификацию стратифицированных периодических возмущений в атмосфере и ионосфере, т.е. откроется возможность изучать источники волновых процессов в газовых оболочках планет.
6. При высокой мощности сигналов вблизи ОА отсутствует необходимость использования бортовых приемных антенн большого диаметра, что существенно уменьшит вес и габариты бортового оборудования.
7. При использовании антенны малого диаметра в соответствии с соотношением (3) увеличится диаграмма ее направленности, поэтому отсутствует необходимость очень точной ориентации антенны и экономится ресурс ОА.
8. Прием на борту сигналов высокой мощности при использовании антенны малого диаметра с широкой диаграммой направленности обеспечит радиопросвечивание атмосферы вплоть до уровня критической рефракции во всех экспериментах без коррекции ориентации бортовой антенны.
9. Широкая диаграмма направленности бортовой антенны позволит в каждом сеансе радиопросвечивания проводить бистатическую радиолокацию поверхности планеты (до настоящего времени проведено менее 30 таких экспериментов). Высокая мощность отраженного поверхностью сигнала является важным звеном для детального изучения структуры поверхности.
10. Проведение регулярной бистатической радиолокации предоставит уникальную возможность изучения атмосферы вблизи поверхности Венеры в диапазоне высот от 0 до 35 км. Сведения о приповерхностной атмосфере Венеры до настоящего времени очень ограничены.
11. Излучение с Земли может одновременно приниматься несколькими спутниками, находящимися на орбите планеты, если они будут оборудованы соответствующими приемниками. Такая возможность обеспечит контрольные измерения вариаций параметров плазмы на трассе

связи для их устранения в эксперименте радиопросвечивания, что особенно важно при исследовании ночной ионосферы.

12. При определенных орбитах нескольких ОА появится возможность радиопросвечивания одних и тех же или разных областей околопланетного пространства почти одновременно, что предоставит уникальную возможность анализа пространственно-временной структуры атмосферы и ионосферы.
13. Наличие на орбите планеты нескольких ОА, оборудованных одинаковыми приемниками когерентных сигналов, позволит вести регулярный мониторинг ионосферы и атмосферы планеты, т.е. предоставит важные сведения для сравнительной планетологии.
14. Многограссовые измерения с помощью нескольких ОА вдали от газовой оболочки планеты предоставят возможность детально исследовать динамику межпланетной и околосолнечной плазмы.
15. Высокое отношение сигнал/шум в радиофизических экспериментах является важным условием для изучения ряда вопросов распространения радиоволн через слоистые структуры, в частности, появится возможность получить экспериментальную оценку размеров области ионосферы и атмосферы, которая вносит главный вклад в вариации параметров радиоволн, и эта оценка может оказаться существенно меньше зоны Френеля.

Недостатком рассмотренного метода радиофизических исследований на трассе *Земля*→*ОА* является необходимость передачи на Землю относительно большого объема информации с борта спутника, а для реализации этого метода необходима доработка наземной и бортовой аппаратуры. Представленный анализ показывает актуальность и целесообразность модернизации наземных пунктов дальней космической связи, обеспечение их универсальными, многофункциональными комплексами аппаратуры, которые позволят и управлять космическими аппаратами, и выполнять радиофизические эксперименты, и проводить радиолокацию космических объектов. Если

модернизация будет проведена и будут разработаны бортовые приемники когерентных сигналов, качество радиофизических исследований в космических миссиях существенно возрастет.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что развитие цифровых технологий позволяет реализовать совершенно новые радиофизические эксперименты, в которых наземный приёмо-передающий комплекс обеспечивает излучение в режиме несущих (без модуляции) когерентных радиосигналов в направлении исследуемой планеты. Антенны орбитальных аппаратов этой планеты, направленные на Землю, принимают когерентные сигналы, и бортовой приемник осуществляет измерения мощностей и фаз принятых сигналов, а также спектров эхо-сигналов при бистатической радиолокации. В таких экспериментах обеспечивается излучение сигналов высокой мощности (~10 КВт и выше) поэтому достигается очень высокое отношение сигнал/шум на входе бортового приемника (потенциал радиолинии увеличивается в ~10 раз и более по сравнению с традиционными экспериментами), что увеличивает точность и пространственно-временное разрешение результатов радиопросвечивания. В таких экспериментах можно выполнять бистатическую радиолокацию поверхности планеты в каждом сеансе, кроме того, по эхо-сигналам можно получать регулярную информацию о малоисследованном приповерхностном слое атмосферы Венеры.

Выполненный анализ свидетельствует о том, что актуальной задачей для планирования космических исследований, использующих орбитальные аппараты планет, является модернизация наземных пунктов дальней космической связи с целью обеспечения их универсальными, многофункциональными комплексами аппаратуры, которые позволят и управлять космическими аппаратами, и выполнять радиофизические эксперименты, и проводить радиолокацию космических объектов.

*Работа выполнена при частичной поддержке программы*

*ОФН РАН № VI.15 "Плазменные процессы в Солнечной системе".*



## ЛИТЕРАТУРА

1. Арманд Н.А., Гуляев Ю.В., Гаврик А.Л., Ефимов А.И., Матюгов С.С., Павельев А.Г., Савич Н.А., Самознаев Л.Н., Смирнов В.М., Яковлев О.И. Результаты исследований солнечного ветра и ионосфер планет радиофизическими методами // Успехи физических наук. 2010. Т. 180. № 5. С. 34-40. [http://ufn.ru/ufn10/ufn10\\_5/Russian/r105j.pdf](http://ufn.ru/ufn10/ufn10_5/Russian/r105j.pdf)
2. Mariner Stanford Group, Venus: Ionosphere and atmosphere as measured by dual frequency occultation on Mariner-5 // Science. 1967. № 158. P. 1678-1683.
3. Савич Н.А., Васильев М.Б., Гаврик А.Л. Дисперсионные интерферометры с пространственно разнесенными излучателями и приемниками // Радиотехника и электроника. 1981. Т. 24. № 2. С. 305-310.
4. Гаврик А.Л., Самознаев Л.Н. Анализ ошибок результатов радиопросвечивания дневной ионосферы Венеры, обусловленных ее несферичностью // Космические исследования. 1985. Т. 23. № 1. С. 148-157.
5. Гаврик А.Л., Самознаев Л.Н. Особенности дневной ионосферы Венеры в годы низкой и высокой активности Солнца // Космические исследования. 1987. Т. 25. № 2. С. 285-291.
6. А.Л. Гаврик, Ю.А. Гаврик, Л.Н. Самознаев. Неоднородная структура дневной ионосферы Венеры по данным радиопросвечивания при помощи станций Венера-15,-16 // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53. № 9. С. 1104-1111. <http://www.maikonline.com/maik/download.do?uid=VAFKCB4Y1V&ptype=401&dtype=pdf>
7. Проработка научно-технических предложений по составу научных задач и аппаратуры для комплексных исследований атмосферы и поверхности Венеры. Определение научной программы экспериментов, состава и характеристик комплекса научной аппаратуры миссии "Венера-Д". Формирование требований к служебным системам КА для обеспечения выполнения научной программы. Разработка проекта ТЗ на комплекс научной аппаратуры КА "Венера-Д": отчет о НИР (итоговый): / Институт космических исследований РАН; научный рук. д.ф.-м.н. Засова Л.В. – М.: ИКИ РАН, 2010. – 346 с. – Исполн. (с. 229-262): к.ф.-м.н. Гаврик А.Л. и др. – Библиогр.: с. 321-334. – № ГР Ф40550. – Инв. № 053/000105. <http://www.venera-d.cosmos.ru>
8. Pavelyev, A.G., Liou Y.A., Wickert J., Gavrik A.L., and Lee C.C. Eikonal acceleration technique for studying of the Earth and planetary atmospheres by radio occultation method // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. P. L21807. DOI:10.1029/2009GL040979. <http://hrsl.csrsl.ncu.edu.tw/DOCUMENTS/Paper/2009GL040979.pdf>
9. Савич Н.А., Андреев В.Е., Вышлов А.С., Гаврик А.Л., Конофалов В.П., Лаптев Н.В., Мармулев В.А., Местэртон А.П., Набатов А.С., Орлов Ю.Н., Осмоловский И.К., Самознаев Л.Н., Штерн Д.Я. Дневная ионосфера Венеры

- по данным радиозатмений спутников "Венера-15,16" в 1983 г. // Радиотехника и электроника. 1986. Т. 31. № 11. С. 2113-2120.
10. Савич Н.А., Андреев В.Е., Вышлов А.С., Гаврик А.Л., Конофалов В.П., Лаптев Н.В., Мармулев В.А., Местэртон А.П., Набатов А.С., Осмоловский И.К., Самознаев Л.Н., Штерн Д.Я. Ночная ионосфера Венеры по данным двухчастотного радиопросвечивания при помощи спутников "Венера-15,16" в 1983 г. // Радиотехника и электроника. 1986. Т. 31. № 3. С. 433-439.
  11. Савич Н.А., Андреев В.Е., Вышлов А.С., Гаврик А.Л., Климов В.В., Конофалов В.П., Лаптев Н.В., Мармулев В.А., Местэртон А.П., Набатов А.С., Осмоловский И.К., Самознаев Л.Н., Штерн Д.Я. Полярная ионосфера Венеры вблизи терминатора планеты по радиозатменным данным спутников "Венера-15,16" // Космические исследования. 1986. Т. 24. № 3. С. 448-454.
  12. Селезнев В.В., Андреев В.Е., Гаврик А.Л., Молотов Е.П. Измерения характеристик радиосигналов станций "Вега-1,2" при просвечивании кометы Галлея // Радиотехника. 1988. № 5. С. 56-59.
  13. Андреев В.Е., Гаврик А.Л. Распределение электронной концентрации в комете Галлея: решение обратной задачи по данным радиозондирования // Космические исследования. 1991. Т. 29. № 3. С. 458-467.
  14. Андреев В.Е., Гаврик А.Л. Плазменная оболочка кометы Галлея по данным радиозондирования // Письма в Астрономический журнал. 1993. Т. 19. № 12. С. 1081-1089.
  15. Gavrik A.L., Pavelyev A.G., Gavrik Yu.A. Detection of ionospheric layers in the Daytime Ionosphere of Venus at Altitudes of 80-120 km from VENERA-15 and -16 Two-Frequency Radio-Occultation Results // Geomagnetism and Aeronomy. 2009. V. 49. № 8. P. 1223-1225. DOI: 10.1134/S0016793209080362.  
<http://www.springerlink.com/content/a212563728825476/fulltext.pdf>
  16. Гаврик А.Л., Гаврик Ю.А., Копнина Т.Ф., Самознаев Л.Н. Вариации амплитуд и частот когерентных радиосигналов при просвечивании дневной ионосферы Венеры // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55. № 3. С. 277-284.  
<http://www.maikonline.com/maik/showArticle.do?auid=VAG762MEP3&lang=ru>
  17. Гаврик А.Л., Гаврик Ю.А., Самознаев Л.Н., Копнина Т.Ф. О возможности радиовидения слоистых структур в экспериментах радиопросвечивания ионосфер планет // Журнал радиоэлектроники. 2010. № 5. С. 1-14.  
<http://jre.cplire.ru/jre/may10/1/text.pdf>
  18. Гаврик А.Л., Вышлов А.С., Дорощук О.Н., Конофалов В.П., Лаптев Н.В., Набатов А.С., Осмоловский И.К., Савич Н.А. Измерение вариаций интегральной электронной концентрации на трассах связи со станциями "Венера-13" и "Венера-14" // Космические исследования. 1983. Т. 21. № 3. С. 445-448.