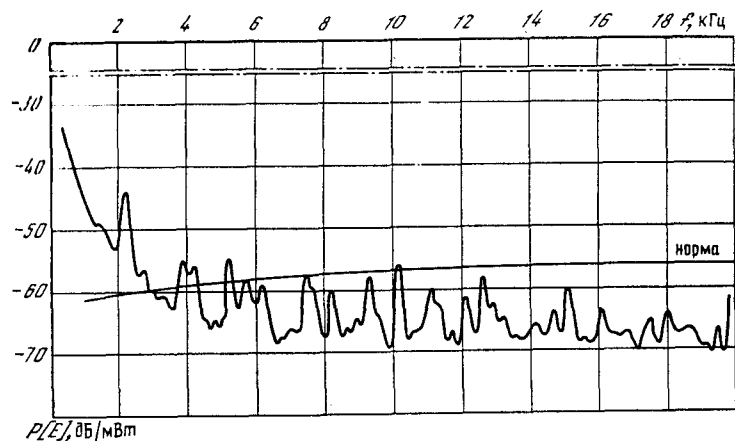


2 р. 60 к.

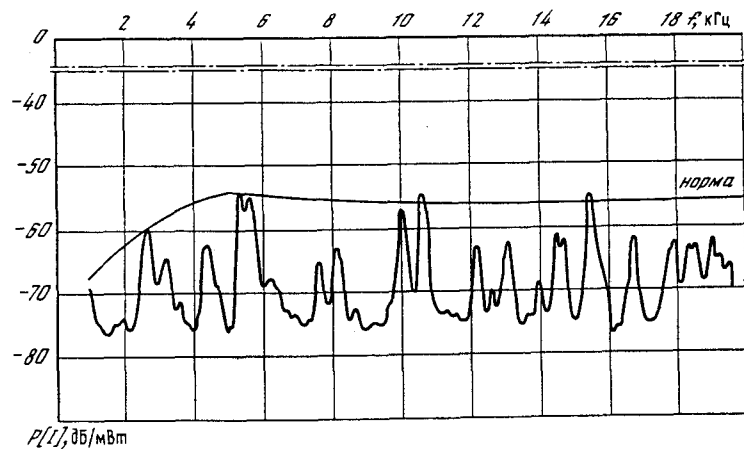


НАУЧНАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ





Р и с. 5. Электрическое поле помех в полосе частот 0 – 20 кГц



Р и с. 6. Ток помех в проводе питания в полосе частот 0 – 20 кГц

ке учтены. Последующие автономные испытания НП по параметрам ЭМС дали положительные результаты.

Автономные испытания по параметрам ЭМС прошел также КНА спускаемого аппарата. Подавляющее число НП полностью удовлетворяло требованиям норм (ИФП, ГС-15СЦВ, ВМ-4, СИГМА-3 и др.). Превышения норм по току помех (до 12 дБ на отдельных частотах) показал прибор ИСАВ; аппаратура МАЛАХИТ-В превысила нормы по току помех до 20 дБ.

Заключительные испытания на ЭМС станций "Вега-1" и "Вега-2" были проведены на космодроме Байконур. Пролетные аппараты были установлены в отдельных экранированных камерах, панели СБ были раскрыты, автоматическая стабилизированная платформа АСП-Г находилась в рабочем положении. Измерительная дипольная антенна ТВГ устанавливалась на специальном штативе в зоне расположения датчиков прибора АПВ-В, магнитная рамочная и высокочастотная дипольная антенны устанавливались

на штативе в зоне расположения АСП-Г. Измерительный токосъемник охватывал кабели питания, идущие от БУНА и БХБ. Остальная измерительная аппаратура ЭМС находилась в другом помещении на расстоянии около 20 м от экранированных камер.

На графиках (рис. 5, 6) представлены некоторые результаты измерений электромагнитных помех от пролетного аппарата станции "Вега-1".

Определенные трудности при испытаниях были связаны с влиянием КИА приборов и КПА, отсутствием ЭВТИ и малыми размерами экранированных камер, соизмеримых с размерами КА.

Анализ результатов испытаний показал, что в рабочих полосах частот НП уровни помех находятся в допустимых пределах. При этом, что весьма важно, удовлетворительная ЭМО на борту имеет место для наиболее чувствительных научных приборов: анализаторов плазменных волн АПВ-Н и АПВ-В, магнитометра МИША, трехканального спектрометра ТКС, инфракрасного спектрометра ИКС. Проверка функционирования НП по данным телеметрической информации также дала положительные результаты. По оценке научной информации замечаний к КНА не было.

Таким образом, результаты заключительных комплексных испытаний на ЭМС в пролетных аппаратах позволили сделать вывод, что принятые меры обеспечили удовлетворительную ЭМО на борту космических станций "Вега-1" и "Вега-2" и обеспечили ЭМС научного и служебного комплексов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пановский В., Филипс М. Классическая электродинамика /Пер. с англ. под ред. С.П. Капицы. М.: Физматгиз, 1963. 432 с.
2. Гальперин Ю.С., Гладышев В.А., Козлов А.И. и др. Электромагнитная совместимость научного космического комплекса АРКАД-3. М.: Наука, 1984. 190 с.

УДК 621.396.967 : 629.78

Т.К. Бреус, Д.Я. Штерн, М.Л. Элькин

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ОБОЛОЧЕК ПЛАНЕТ

В последние годы стала очевидной актуальность исследования свойств верхних границ ионосфер планет земной группы. По имеющимся данным, у Венеры ионопауза представляет собой токовый слой, экранирующий ионосферу от проникновения в нее солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Магнитное поле токового слоя создает "магнитный барьер", тормозящий солнечный ветер и образующий ударную волну, а также уникальное для планет солнечной системы явление – индуцированную магнитосферу с протяженным плазменно-магнитным хвостом. Во время возмущений неустойчивость ионопаузы приводит к "продавливанию" солнечного ветра и межпланетного магнитного поля в глубь ионосферы [1].

У Земли в области плазмоспаузы при взаимодействии горячей плазмы магнитосферы с холодной плазмосферной плазмой возникает ряд явлений, по-видимому, сильно влияющих на свойства как нижней ионосферы, так и магнитосферы [2].

Следует отметить, что, несмотря на значительное количество экспериментов, в настоящее время мы не располагаем достаточными данными о плазменных оболочках планет. Например, сведения о существовании ионопаузы в марсианской ионосфере весьма неопределенны [2]. В то же время продолжающаяся дискуссия об определяющей роли собственного магнитного поля Марса во взаимодействии с солнечным ветром может, наконец, закончиться, если удастся установить, существует ли ионопауза в марсианской ионосфере и обладает ли она свойствами, сходными с ионопаузой в венеианской ионосфере [3].

Очевидно, что обнаружение ионопаузы у планет, исследование морфологии и динамики ионопаузы у планет и плазмоспаузы у Земли представляет огромный интерес как для проблемы обтекания планет солнечным ветром, так и для изучения свойств самих ионосфер.

Сложившаяся ситуация с данными по плазменным оболочкам планет во многом зависит от принципиальных ограничений применявшихся до сих пор методов. Все данные были получены прямыми измерениями при помощи различных плазменных зондов и ионных масс-спектрометров, установленных на космических аппаратах (КА), или путем радиопросвечивания ионосферы планеты с КА на Землю. Прямые измерения возможны лишь в непосредственной близости от КА и страдают погрешностями, связанными с изменением электрического потенциала КА, особенно увеличивающимися при резком изменении концентрации плазмы, т.е. как раз в наиболее интересных областях вблизи верхней границы ионосферы [2]. Радиопросвечивание дает усредненную величину концентрации по трассе распространения, причем значительное влияние на результаты оказывает межпланетная плазма и ионосфера Земли, ограничивая точность измерений величиной порядка 10^3 см^{-3} [1], в то время как концентрация на верхних границах ионосфер быстро падает от 10^3 до 10 см^{-3} .

Для исследования ионосферы Земли с успехом использовалось радиозондирование с борта искусственного спутника — зондирование сверху. После запуска в 1962 г. первого спутника с ионосферной станцией "Алуэтт-1" было запущено на орбиты спутников Земли около десятка КА с аппаратурой радиозондирования на борту, в том числе "Космос-381" и "Интеркосмос-19" [4, 5]. Возможность получать при радиозондировании данные о распределении плотности электронной компоненты в подспутниковом плазменном слое до главного максимума за малый интервал времени делает этот метод исключительно важным для исследования динамики и взаимодействия плазменных образований. Надо отметить, что орбиты, с которых проводилось зондирование сверху, лежали в интервале высот от 1000 до 3500 км и полученные данные были ограничены областями существенно ниже границы земной ионосферы.

Принципиальные технические решения, использованные в существующей спутниковой аппаратуре радиозондирования, в основном мало отличались от обычно применяемых в наземных ионосферных станциях: зондирование коротким импульсом, обеспечивающим необходимую точность

определения дальности; передатчик в виде широкополосного усилителя мощности, работающий на ненастроенную антенну; приемник с аперриодическим входом. В связи с жесткими ограничениями по габаритам, весам и потребляемой мощности при создании бортовой аппаратуры радиозондирования наибольшие трудности возникли в обеспечении необходимой импульсной мощности передатчика. В наземных ионосферных станциях она составляет десятки киловатт. При зондировании сверху положение облегчается отсутствием ослабления электромагнитных волн, обусловленного высокой концентрацией нейтральных частиц, как это имеет место в нижней ионосфере. Это позволило обойтись значительно меньшими мощностями (100–140 Вт) при высоте орбиты около 1000 км и до 400 Вт при зондировании с орбиты высотой до 3500 км. Для получения даже таких мощностей в транзисторных передатчиках потребовались значительные усложнения, связанные с необходимостью параллельного включения активных элементов или узлов.

Проведенные эксперименты по радиозондированию ионосферной плазмы продемонстрировали большую эффективность этого метода и создали предпосылки для рассмотрения возможности радиозондирования плазмосферы Земли с высоких орбит, обеспечивающего получение данных о верхней границе ионосферы — плазмоспаузе, а также применения метода радиозондирования для исследования плазменных оболочек других планет земной группы.

Возможности создания аппаратуры радиозондирования для исследования границы плазмосферы Земли впервые обсуждались в 1969 г. участниками программы ISIS [6], позже проект радиозондирования плазмоспаузы с геостационарного спутника рассматривался японскими исследователями [7]. Главная трудность на пути реализации подобных проектов — достижение энергетического потенциала аппаратуры радиозондирования, обеспечивающего необходимую дальность действия.

Верхняя граница плазмосферы Земли — плазмоспауза — находится на высотах 13–20 тыс. км в зависимости от местного времени и уровня геомагнитной активности. КА с аппаратурой радиозондирования, предназначенный для исследования плазмосферы, должен иметь орбиту, у которой по крайней мере апогей будет выше максимальной высоты плазмоспаузы. Желательно, чтобы орбита была близка к круговой и проходила выше плазмоспаузы. Если принять высоту над поверхностью Земли, с которой будет проводиться радиозондирование, за 20 тыс. км, расстояние до верхней границы плазменной оболочки может достигать 7 тыс. км, а до областей с концентрацией электронов 10^5 см^{-3} — около 19 тыс. км.

Таким образом, для обеспечения радиозондирования плазмосферы Земли желательно обеспечить дальность действия аппаратуры 20 тыс. км. Можно ограничиться и меньшей дальностью действия, если использовать сильно вытянутую орбиту и проводить измерения только на ее восходящей и нисходящей ветвях; именно такой вариант обсуждался участниками проекта ISIS [6]. Конечно, при этом ценность получаемых данных будет существенно меньшей, так как для исследования динамики и взаимодействия плазмосферы с магнитосферой важно получать одновременно данные на всю глубину от границы до области максимальной концентрации. По крайней мере, если по техническим причинам желаемая дальность действия

окажется недостижимой, обеспечение возможно большей дальности действия является нижней задачей при разработке таких проектов.

Верхние границы ионосферы Марса и Венеры значительно ближе к поверхности планеты, чем у Земли. Ее высота не превышает 500 км с дневной стороны у Венеры и Марса и ~ 3000 км с ночной у Венеры [1]. Это дает возможность получать полные данные о плазменных оболочках этих планет выше главного максимума при радиозондировании со сравнительно низких орбит (< 3 тыс. км), используя аппаратуру с характеристиками, близкими к характеристикам спутниковых ионозондов, применявшихся у Земли. Однако вероятность того, что удастся получить такие оптимальные условия измерений, мала, так как КА подобного назначения должен обеспечить проведение большого количества разнообразных экспериментов. Траектория аппарата будет выбираться компромиссной, отвечающей разным, часто противоречивым требованиям. В таких условиях увеличение дальности действия аппаратуры радиозондирования улучшает ее совместимость (в смысле требований к траектории) с другим научным оборудованием космических аппаратов.

В частности, у Марса можно рассматривать возможность использования для радиозондирования ионосферы планеты КА на орбите спутника с марсоцентрическим расстоянием порядка 9–10 тыс. км. При этом дальность действия бортовой аппаратуры зондирования должна быть порядка 6–7 тыс. км.

При внешнем радиозондировании отражающий плазменный слой представляет собой выпуклую поверхность, при отражении от которой угол расхождения лучевой пучка увеличивается, что приводит к ослаблению принимаемого сигнала по сравнению с отражением от плоской поверхности. Выпуклая поверхность как бы увеличивает дальность до отражателя по сравнению с фактической. Из простых геометрических соображений можно найти коэффициент эквивалентного увеличения дальности K в зависимости от соотношения фактической дальности H_0 и радиуса кривизны поверхности отражения r :

$$K = 1 + H_0/r. \quad (1)$$

При зондировании ионосферы Земли с низких орбит (1000–3500 км) эквивалентное увеличение дальности было невелико ($K = 1,1 \div 1,4$). С увеличением высоты орбиты до 20 тыс. км эквивалентная дальность, исходя из которой следует выбирать энергетический потенциал аппаратуры радиозондирования $H_3 = H_0 K$, будет достигать 70 тыс. км до областей с концентрацией электронов 10^5 см^{-3} и 10 тыс. км до верхней границы плазмосферы Земли. При зондировании ионосферы Марса с орбиты спутника с марсоцентрическим расстоянием 9–10 тыс. км эквивалентная дальность будет достигать 15 тыс. км.

Таким образом, эквивалентная дальность действия аппаратуры радиозондирования для исследования плазменных оболочек Земли и планет должна приблизительно на порядок превышать достигнутую в осуществленных экспериментах по внешнему радиозондированию ионосферы Земли.

Уравнение, связывающее эквивалентную дальность (H_3) с мощностью передатчика (P_r) и мощностью отраженного сигнала на входе приемника (P_r) в предположении зеркального отражения от плазменного слоя,

имеет вид:

$$P_r = \frac{P_t L_t}{4 \pi (2 H_3)^2} \frac{\lambda^2}{4 \pi} L, \quad (2)$$

где L_t — множитель потерь при излучении, λ — длина волны зондирующего сигнала, L — множитель, включающий в себя поляризационные потери, потери за счет расщепления на обыкновенную и необыкновенную компоненты, влияние диаграммы направленности антенны.

На предельной дальности мощность отраженного сигнала будет соответствовать чувствительности приемника:

$$P_{r_{\text{мин}}} = SkT \Delta f, \quad (3)$$

где S — пороговое отношение сигнал/шум, T — эквивалентная температура входа приемника, k — постоянная Больцмана, Δf — полоса частот приемника.

Из приведенных соотношений ясно, что при сохранении других параметров мощность передатчика должна увеличиваться пропорционально квадрату дальности действия. Очевидно, что достижение требуемой дальности путем увеличения импульсной мощности передатчика неприемлемо, так как для этого мощность должна была бы составлять десятки киловатт. Необходимы другие технические решения, которые позволили бы обойтись без чрезмерного увеличения мощности передатчика.

В существующих спутниковых ионозондах передающий канал строился по схеме широкополосного усилителя, и связь с антенной осуществлялась через повышающий трансформатор. При этом антенна в большей части диапазона частот зондирования была очень далека от согласования. Особенно велико рассогласование в нижней части диапазона, где размеры антенны много меньше длины волны. Эквивалентная схема короткой антенны может быть представлена последовательно соединенным активным R_a и емкостным сопротивлением X_a . Эти величины определяются выражениями [8]:

$$R_a = 20 \beta^2 l^2, \quad (4)$$

$$X_a = 60 \left(2 \ln \frac{2l}{r} - 3,39 \right) / \beta l \quad (\beta l < 0,5), \quad (5)$$

где l и r — длина и радиус штыря вибратора, $\beta = 2 \pi / \lambda$. Если E — эффективная ЭДС передатчика, то излучаемая мощность

$$P_{\text{изл}} = E^2 / X_a^2 R_a \quad (X_a \gg R_a). \quad (6)$$

Мощность, излучаемая при сопряженном согласовании, составляет

$$P_{\text{изл}_{\text{мах}}} = E^2 / 4 R_i, \quad (7)$$

где R_i — внутреннее сопротивление передатчика. Потери рассогласования при передаче составят

$$P_{\text{изл}_{\text{мах}}} / P_{\text{изл}} = X_a^2 / 4 R_i R_a. \quad (8)$$

Оценим эти потери для магнитосферного зонда, на проект которого мы ссылались [6]. В проекте $2l = 295$ м, $2r = 1,2$ см. Из (4) и (5) для рабочей

частоты 20 кГц (нижняя граница диапазона зондирования) находим $X_a = 14,3$ кОм, $R_a = 0,123$ Ом, потери рассогласования составят $1,04 \cdot 10^6$.

Увеличить эффективность передающего канала можно, включив в антенный контур индуктивность (удлинительную катушку), компенсирующую емкостную составляющую сопротивления антенны. Ее величина должна изменяться при перестройке передатчика по диапазону, обеспечивая резонансную настройку антенной цепи на всех частотах. Такая система может быть реализована с помощью электрически перестраиваемой катушки с ферритовым сердечником-ферровариометром [9], управляемой схемой автоподстройки.

В этом случае излучаемая мощность составляет

$$P_{\text{изл,рез}} = E^2 R_a / (R_i + X_a/Q)^2. \quad (9)$$

Здесь Q — добротность последовательного колебательного контура, образуемого емкостным сопротивлением антенны и индуктивным сопротивлением ферровариометра.

Выигрыш в излучаемой мощности при использовании резонансного согласования составляет

$$P_{\text{изл,рез}}/P_{\text{изл}} = X_a^2 / (R_i + X_a/Q)^2. \quad (10)$$

При использовании такого решения в магнитосферном зонде при добротности ~ 20 потери рассогласования уменьшились бы в 164 раза, что увеличило бы дальность действия на этой частоте в $\sqrt{164} \approx 13$ раз.

Резонансное согласование антенны весьма полезно и в режиме приема. Во-первых, оно обеспечивает заметный выигрыш в чувствительности, собственные шумы приемника оказываются ниже галактического шума [10]; во-вторых, выполняя роль преселектора, ферровариометр способствует устранению внешних помех. Другие возможности увеличения дальности действия состоят в применении сложного зондирующего сигнала. При традиционном построении импульсного ионозонда и дискретном способе перестройки по частоте (видимо, только такой способ будет использован в будущих станциях) полоса частот приема должна быть сопряжена с длительностью зондирующего импульса τ

$$\Delta f \sim 1/\tau,$$

выбираемой по величине необходимого разрешения по дальности

$$\Delta H \sim \tau c/2,$$

где c — скорость света.

Отсюда

$$\Delta f = c/2 \Delta H. \quad (11)$$

Выражения (3) и (11) определяют жесткую связь чувствительности приемника при традиционном построении с требуемой разрешающей способностью по дальности.

Применение для зондирования сложного сигнала со сжатием в приемном устройстве обеспечивает улучшение фактической чувствительности за счет уменьшения порогового отношения сигнал/шум без ухудшения разрешающей способности. Наиболее подходящим представляется бинар-

ный фазокодированный сигнал [11]. Возможность использования такого сигнала на основе последовательностей Баркера уже упоминалась [7]. Сигнал на основе последовательностей Баркера максимальной длины (13-элементный) может обеспечить 13-кратный выигрыш в чувствительности; возможно применение и более длинных кодов с соответствующим увеличением выигрыша. Итак, использование резонансного согласования антенны с приемопередатчиком и применение для зондирования бинарного фазоманипулированного сигнала могут в значительной мере помочь решить задачу достижения необходимой дальности действия бортовой аппаратуры радиозондирования плазменных оболочек планет.

Сделаем оценки энергетики при радиозондировании ионосферы Марса с борта КА на орбите спутника с марсоцентрическим расстоянием 9 тыс. км. В этом случае эквивалентная дальность действия аппаратуры должна составлять 15 тыс. км.

Особенности дальнего КА накладывают жесткие ограничения на размеры антенны, что в свою очередь ограничивает минимальную частоту зондирования. В данном случае при длине плеча дипольной антенны 20 м минимальная частота зондирования может быть выбрана около 180 кГц. По формулам (4), (5) найдем сопротивление антенны на этой частоте: $R_a = 0,12$ Ом, $X_a = 10$ кОм. Множитель потерь при излучении определяется из (7) и (9):

$$L_t = 4 R_a R_i / (R_i + X_a/Q)^2$$

и будет иметь величину $3,6 \cdot 10^{-4}$ при принятой добротности антенного контура.

Мощность отраженного сигнала на входе приемника (P_r) найдем из уравнения (2). При мощности передатчика 100 Вт она составит $3,5 \cdot 10^{-13}$ Вт, множитель L принят здесь равным 0,5.

Мощность шумов на входе приемника можно найти из выражения

$$P_{\text{рш}} = k T \Delta f.$$

Так как шумы приемника достаточно малы, T может быть принята равной температуре галактических шумов $\sim 10^7$ К. Если задать $\Delta f = 2$ кГц, получим $P_{\text{рш}} = 2,8 \cdot 10^{-13}$ Вт. Отношение сигнал/шум на входе приемника на нижней частоте диапазона 180 кГц будет

$$P_r/P_{\text{рш}} = 1,25.$$

С увеличением частоты отношение сигнал/шум растет, на частоте 600 кГц оно составит 7.

Применение бинарного фазоманипулированного сигнала позволит при обработке в приемном канале увеличить отношение сигнал/шум. В данном случае можно выбрать 11- или 13-импульсную последовательность Баркера, которая обеспечит увеличение отношения сигнал/шум более чем на порядок. Применение более длинных последовательностей будет неоправданно, так как это может привести к ухудшению отношения сигнал/шум на выходе за счет паразитных сигналов, возникающих при обработке [11].

Таким образом, в рассматриваемом варианте радиозондирования ионо-

сферы Марса с борта КА обеспечивается достаточно большое превышение сигнала над шумами при импульсной мощности передатчика 100 Вт.

Изложенные здесь соображения позволяют с уверенностью говорить о возможности создания бортовой аппаратуры радиозондирования плазменных оболочек планет с орбит высотой до 20 тыс. км. При этом необходимая дальность действия может быть обеспечена при умеренных импульсных мощностях передатчика (не более чем мощность в осуществленных экспериментах) путем использования сложного зондирующего сигнала и системы резонансного согласования антенны.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Breus T.K.* // Space Sci. Revs. 1979. Vol. 23. P. 253.
2. *Грингауз К.И., Безруких В.В.* Плазмосфера Земли: Обзор // Геомагнетизм и аэрономия, 1977. Т. 17, № 5. С. 784–803.
3. *Breus T.K.* // Geophys. Intern. 1980. Vol. 19. N 1. P. 17.
4. *Florida C.D.* The development of series of ionospheric satellites // Proc. IEEE. 1969. Vol. 57, N 6. P. 867–865.
5. Аппаратура для исследования внешней ионосферы. М.: ИЗМИРАН. 1980. 305 с.
6. *Franklin C.A., Maclean M.A.* The design of swept-frequency topside-sounders // Proc. IEEE. 1969. Vol. 57, N 6. P. 897–929.
7. *Ondoh T., Nakamura Y., Kosiki T., Satanabe S.* Radio sounding of the plasmopause by geostationary satellite // J. Radio Res. Lab. 1977. Vol. 24, N 114. P. 67–65.
8. *Айзенберг Г.З.* Антенны ультракоротких волн. М.: Связьиздат. 1959. 699 с.
9. *Несвижский Ю.Б.* Высокочастотные ферриты в радиопередающей технике. М.: Связь, 1976.
10. *Кольвах С.В., Элькин М.Л.* О согласовании приемника бортовой аппаратуры планетного ионозонда с короткой антенной // Наст. сб.
11. *Науменко И.И., Элькин М.Л.* О применении сложных сигналов при радиозондировании околопланетной плазмы // Наст. сб.

УДК 621.396.967:621.391.81:52–853

И.И. Науменко, Д.Я. Штерн, М.Л. Элькин

О ПРИМЕНЕНИИ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ ПРИ РАДИОЗОНДИРОВАНИИ ОКОЛОПЛАНЕТНОЙ ПЛАЗМЫ

Сложные сигналы, используемые в современных радиолокационных системах для увеличения их эффективности, отличаются от простого (монокроматического) зондирующего импульса дополнительной модуляцией (частотной, фазовой или амплитудной), расширяющей частотный спектр зондирующего сигнала по сравнению со спектром исходного импульса [1]. Таким образом, применение сложных сигналов открывает возможность увеличивать энергию зондирующего сигнала путем увеличения его протяженности и выбирать ширину спектра, исходя из требуемой разрешающей способности и точности по дальности.

О применении сложных сигналов при зондировании ионосферы имеется мало данных. Коли и Стори в 1963 г. провели эксперименты по зондирова-

нию ионосферы с использованием сложных сигналов на основе бинарных фазокодированных последовательностей и последовательностей Хаффмена (кодирование по фазе и амплитуде) [2]. В обоих случаях был получен выигрыш в уровне принимаемого сигнала по сравнению с зондированием простым импульсом, близкий к расчетному, соответствующий числу элементов кода. С.А. Намазов с сотрудниками проводил зондирование ионосферы сложными сигналами с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Специальная приставка к ионозонду обеспечивала зондирование импульсами длительностью 400 мкс с шириной спектра 100 кГц, получаемой за счет линейной частотной модуляции несущей частоты, а также сжатие принятого импульса в приемнике. Применение ЛЧМ сигналов позволило увеличить разрешающую способность по высоте на порядок по сравнению с монокроматическими импульсами в соответствии с увеличением ширины спектра. Использование ЛЧМ сигналов позволило надежно получать ионограммы во всем рабочем диапазоне частот зондирования, вплоть до критических [3]. В наземных ионосферных станциях не возникает существенных препятствий увеличению мощности передатчика до уровня, необходимого при работе монокроматическими импульсами. В этом, видимо, причина отсутствия серьезного интереса к применению сложных сигналов при зондировании ионосферы.

В ионозондах внешнего зондирования ионосферы Земли, устанавливавшихся на советском и американских спутниках, также не сочли необходимым применять сложные зондирующие сигналы [4, 5]. Однако разработчики первого бортового ионозонда на спутнике "Алуэтт-1" считали применение сложных сигналов на основе бинарных фазокодированных последовательностей перспективным средством совершенствования ионозонда внешнего зондирования [5].

Применение сигналов такого же вида рассматривалось и в проекте японского магнитосферного ионозонда [6]. Выбор бинарного фазоманипулированного сигнала представляется оправданным простотой его формирования и обработки средствами цифровой техники. Амплитуда этих сигналов постоянна, а фаза принимает значения 0 или π через определенные промежутки времени, кратные некоторому интервалу — длительности субимпульсов, различающихся только значениями фазы (рис. 1, а). На выходе приемного устройства с фазовым детектированием эхосигнал имеет вид прямоугольных импульсов, полярность которых изменяется в соответствии с изменением фазы кодовой последовательности (рис. 1, б). Аналогичная последовательность прямоугольных импульсов используется в качестве опорного напряжения в корреляторе, на вход которого поступает видеосигнал с фазового детектора. При точном совпадении во времени эхосигнала с опорным на выходе коррелятора возникает сигнал, в N раз превышающий сигнал на его входе. При сдвиге эхосигнала относительно опорного амплитуда сигнала на выходе коррелятора будет уменьшаться. Так как эхосигнал и опорный сигнал имеют одинаковую форму, отклик коррелятора описывается автокорреляционной функцией (АКФ) используемой последовательности, причем ее основной лепесток соответствует точному совпадению эхосигнала с опорным, а боковые лепестки — различным временным сдвигам.

Существует несколько бинарных фазоманипулированных последователь-