

УДК 551.510.535:550.338

АНАЛИЗ ТИПОВ ЗОНДИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ В ЗАДАЧЕ ИОНОСФЕРНОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ И КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТРАНСИОНОСФЕРНОГО МОНИТОРИНГА В АРКТИКЕ

И.В. Крашенинников

Поступила в редакцию 07 января 2016 г.

Представлены результаты анализа возможности реализации метода многочастотного радиопросвечивания ионосферы (трансионосферного радиозондирования) для высокоапогейного спутника над территорией арктического региона. Рассмотрены базовые типы сигналов, применяемые в современной практике радиозондирования ионосферы, и предлагается, в качестве оптимального варианта, использовать технологию линейно-частотной модуляции зондирующего излучения с борта спутника. Выполнены оценки требуемого энергетического потенциала для геостационарных высот и анализируется фактор движения космического аппарата – доплеровское смещение частоты зондирующих радиоволн.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: МНОГЧАСТОТНОЕ РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ, ТРАНСИОНОСФЕРНОЕ РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ, ЛИНЕЙНО-ЧАСТОТНО МОДУЛИРОВАННЫЙ СИГНАЛ, ТРАНСИОНОГРАММА.

ВВЕДЕНИЕ

Радиозондирование ионосферы Земли является основным источником данных о ее состоянии и можно выделить несколько базовых методов в задаче диагностики со сканированием частоты излучаемой волны: вертикальное (ВЗ) и наклонное (НЗ) — зондирование с земной поверхности, внешнее (ВнЗ) и трансионосферное (ТИЗ) — с использованием космических аппаратов. Их можно разделить по двум принципиальным моментам — совмещению или разнесу точек излучения и приема в пространстве. Если изменение частоты происходит в достаточно широком диапазоне, то результатом является получение ионограммы — регистрации частотной зависимости группового запаздывания сигналов, прошедших различными путями в ионосфере, в точке приема. Разрешающая способность методов радиозондирования, т.е. способность выделить и разделить способы переноса энергии (моды) электромагнитной волны из одной точки пространства в другую, определяется структурой используемого сигнала и, соответственно, от него и зависит качество ионограммы. В настоящее время в практике зондирования ионосферы используется три вида сигналов: амплитудно-модулированный (простой или гладкий радиоимпульс), линейно-частотно-модулированный (ЛЧМ) и фазо-кодированный (ФКМ). Последние два вида из этих сигналов считаются сложными и широкополосными [1], хотя, нужно отметить, что и для работы с первым видом от приемника тоже требуется расширенная полоса приема.

В данной работе представлены результаты анализа энергетического потенциала в задаче многочастотного радиопросвечивания ионосферы (трансионосферного радиозондирования) с геостационарных высот локализации спутника в технологии использования линейно-частотно-модулированного сигнала, как оптимального для сверхдальнего распространения декаметровых радиоволн

ТИПЫ СИГНАЛОВ В ЗАДАЧЕ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Оценкой эффективности (потенциала) применения того или иного типа сигналов, в частности, разрешающей способности является база сигнала (В) — произведение временного масштаба на ширину спектра. Возможность выделения зондирующего сигнала из фоновых электромагнитных шумов (SNR — signal to noise ratio) определяется произведением мощности излучения и базы применяемого типа радиосигнала.

Амплитудно-модулированный сигнал ($B \sim 1$). Исторически это самый первый вид сигнала, примененного для разделения мод в поле волны, прошедшей через ионосферную плазму. В своем развитии в рамках этого подхода использовалось импульсное излучение в широком диапазоне длительностей — от 10 до 500 мкс. Для приема коротких импульсов уже необходима расширенная полоса приемника. Так, как выяснилось в результате экспериментов, для оптимальной длительности в ~ 100 мкс требуется полоса приема ~ 10 кГц, а также необходима значительная мощность передающего устройства (РПДУ) $\sim 10\text{--}20$ кВт в импульсе, поскольку расширенная полоса приема повышает также и уровень (среднеквадратичный) шумов на входе приемника. Кроме того, радиоимпульс, при прохождении в диспергирующей и случайно-неоднородной среде, расплывается за счет частотной зависимости рефракции и рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях плазмы. И чем больше проходимое расстояние, тем менее качественными выглядят ионограммы радиозондирования ионосферы — на рис. 1 представлены примеры ионограммы ВЗ (левая панель) и НЗ совместно с ВЗ (правая панель) с расстояния ~ 1000 км. Из регистрации следов НЗ видно, что энергетики (с учетом диаграмм направленности антенн) уже не хватает для выделения слабоэнергетичных мод: верхних лучей моды 1E (да и сам след имеет квазидискретный вид) и слабо проявляются следы верхних лучей моды 1F2. В настоящее время, область применимости простого гладкого импульса ограничивается классическим методом ВЗ (в России — обсерваторский ионозонд “Парус-А” [2], ионозонд “Томион”) и, в некоторой степени, НЗ, реализуемый средствами ВЗ на однокачковых радиотрассах (~ 1000 км) [2].

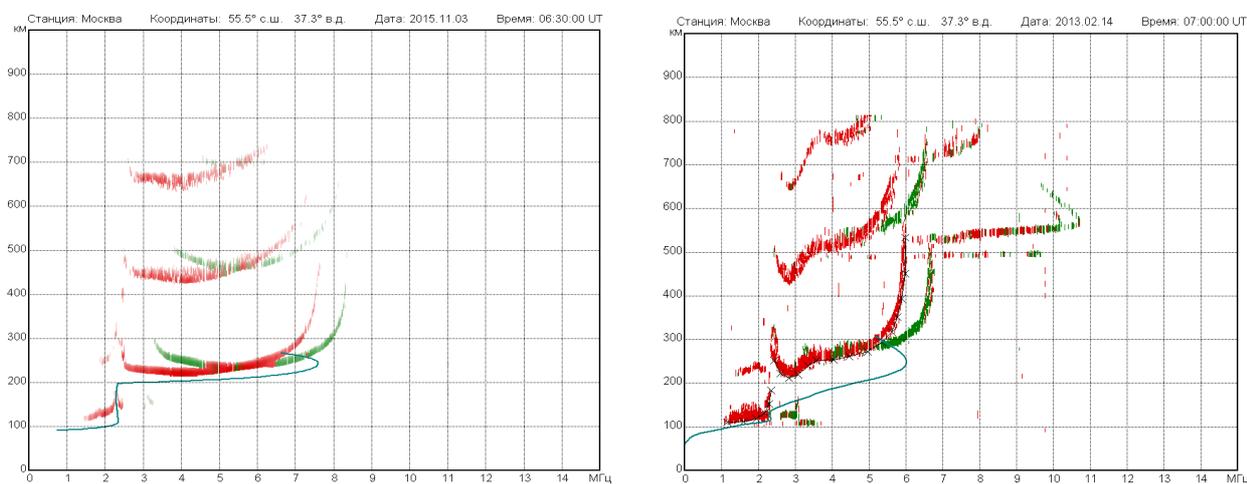


Рис. 1. Пример данных ВЗ (03.11.2015 06:30 UTC) и комплексного — ВЗ + НЗ (14.02.2013 07:00 UT) радиозондирования ионосферы, полученные на ст. ИЗМИРАН средствами ионозонда “Парус-А”.

Фазо-кодо-манипулированный сигнал ($B \sim 10$). В основе этого метода лежит принцип усложнения исходного импульсного сигнала, его фрагментация в виде последовательности элементарных радиоимпульсов со специальной функцией распределения параметров, например, дискретных значений начальных фаз гармонического заполнения. Таким образом в один зондирующий импульс закачивается больше энергии (увеличивается длительность импульса). При приеме выполняется свертка с исходным сигналом (корреляционная обработка) и, таким образом, имеет место сжатие общего тела сигнала, что приводит как к выигрышу соотношения сигнал/шум, так и разрешающей способности по сравнению с классическим разрешением для полной длительности зондирующего сигнала (как правило, для ВЗ она составляет ~ 500 мкс). Такая операция позволяет уменьшить излучаемую мощность практически на один–два порядка — с 10 кВт до 300–500 Вт, чтобы иметь соизмеримое со случаем гладкого импульса соотношение сигнал/шум.

В таблице 1 представлены примеры эффективности двух видов кодовых последовательностей по отношению к простому импульсу: 13-ти элементный код Баркера (максимально возможный) [3] и 1019-элементный компланарный код Лежандра [4]. Выигрыш в 30 дБ обеспечивает 40 мс импульс с 2038 элементами компланарной кодировки. Компланарная кодировка использует два импульса: нечетный модулируется одной последовательностью, а четный — другой, специально подобранной так, что в результате достигается минимальный (в идеале нулевой) уровень боковых лепестков корреля-

ционной функции. Такой длинный импульс уже невозможно использовать в режиме ВЗ, хотя уровень излучаемой мощности может быть принципиально понижен до 1 Вт [4], правда, с очень скромным результатом в качестве регистрации следов на ионограмме.

Таблица 1.
Характерные параметры ФКМ-сигналов

Вид кодировки	Число элементов	Длительность элемента, μ s	SNR, дБ
гладкий импульс	1	100	0
код Баркера	13	30	11
код Лежандра	1019	40	30

Принципиальные моменты работы наиболее известного ионозонда DPS-4 (Digital Portable Sounder) [5], построенного на данном типе сигнала, иллюстрируются рис. 2: левая панель отображает формирование сигнала 16-ти элементной компланарной кодовой последовательностью с длительностью импульса 533 мксек и длительностью элемента в 33 мксек. Спектральная ширина сигнала ~ 30 кГц, т.е. база сигнала $B \sim 15$. Результат — ионограмма ВЗ (правая панель), полученная, практически, в то же время и том же месте, что и ионозондом “Парус-А” — ст. ИЗМИРАН (рис. 1). Потенциальный выигрыш в SNR оценивается в ~ 15 дБ, хотя в реальности она несколько меньше, что видно из сравнения ионограмм (рисунки 2 и 1) — так следы кратных отражений выглядят значительно убедительнее для ионозонда “Парус-А” с гладким радиоимпульсом. В России на этом принципе построены и эксплуатируются в прикладных целях ионозонды “Вектор” (НИИДАР) и “Томион” (Томск).

Значительное расплывание следов кратных отражений в спокойных условиях может свидетельствовать еще об одной особенности ФКМ-сигналов — эффекте хаотизации элементарных “кирпичиков”-элементов при распространении на большие расстояния в дисперсной и рассеивающей среде, поскольку их длительность достаточно мала и, расплываясь, они начинают интерферировать. Это может приводить к значительным вариациям начальной фазы в элементах, а, следовательно, к некорректной сборке сигнала. На рисунке 3 представлены примеры очень немногих экспериментальных исследований на протяженных р/трассах с ФКМ-сигналами. На правой панели хорошо видно, что, несмотря на высокое значение SNR, следы кратных сигналов имеют очень большую диффузность, да и основной сигнал — след моды 1F2 не отличается высокой четкостью [6]. Такой же эффект можно

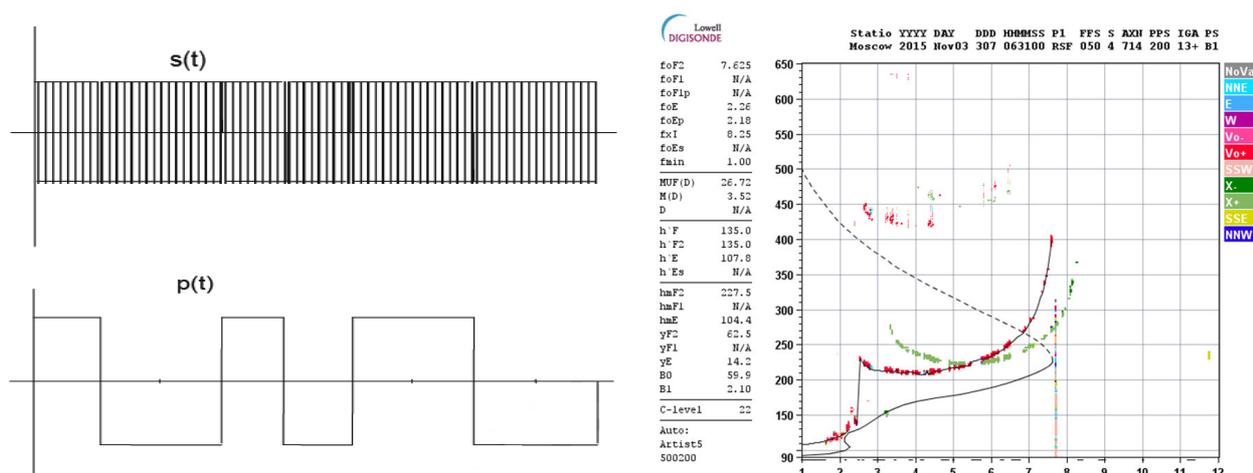


Рис. 2. Кодировка импульсного сигнала (левая панель) в ионозонде DPS-4 (компланарный 16-ти элементный код) и ионограмма ВЗ, полученная на ст. ИЗМИРАН (правая панель) – 03.11.2015 06:31 UTC.

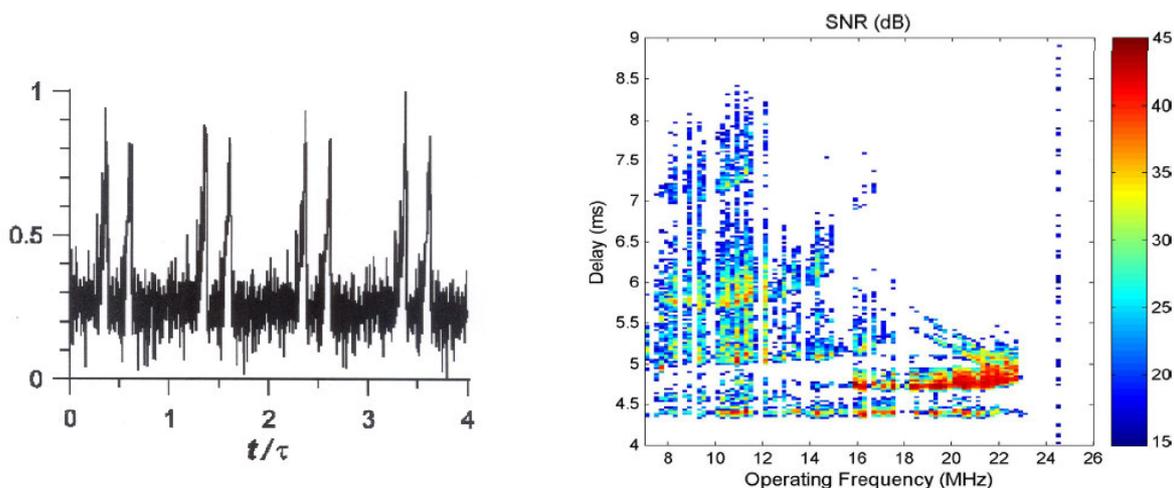


Рис. 3. Левая панель — нормированная амплитуда (корреляционная функция) сигнала на выходе накопителя при двухмодовом распространении радиоволн в эксперименте на трассе Екатеринбург (Егоршино) - ИЗМИРАН (~1500 км) 14.07.2004 г. с широкой полосой (~150 кГц). Правая панель — ионограмма ВЗ в эксперименте на р/трассе ~1500 км (март 2009, 14:30 LT, Китай) — полоса ~30 кГц. Цветом отображается отношение сигнал/шум в дБ. В обоих случаях излучаемая мощность ~ 300 Вт.

видеть и на ионограмме ВЗ (рис. 2, правая панель) для кратных отражений. По сравнению с классической ионограммой (рис. 1, левая панель, различие во времени съема ионограмм составляет всего 1 мин) имеет место: во-первых, значительная диффузность следов и, во-вторых, слабое выделение из фоновых шумов.

Линейно-частотно модулированный сигнал ($B \sim 1000$). В основе этого метода лежит идея о переводе группового запаздывания мод в частотное пространство и использование развитых методов спектрального анализа для их разрешения — формирование модовой структуры волнового поля. Для этого частоты передатчика и приемника синхронно перестраиваются и вследствие того, что для различных мод времена прохождения расстояния между двумя конечными точками трассы различаются, в суммарном поле они будут иметь различное частотное смещение по отношению к опорной частоте. Чем ниже скорость перестройки, тем большая энергия может быть передана в конкретном частотном интервале, тем выше будет соотношение сигнал/шум и меньше требуемая мощность излучения. Однако при этом возрастает общее время зондирования. Разрешающую способность данного метода так же, как и в классическом случае, ограничивает дисперсионное искажение, приводящее к уширению спектральных линий на временном интервале интегрирования, и рассеяние на мелкомасштабных неоднородностях. В настоящее время, наиболее употребительной (оптимальной) скоростью перестройки является ~100 кГц/сек. Мощность передатчика может понижаться до десятков ватт для достижения такого же соотношения сигнал/шум, как и в случае гладкого импульса или ФКМ-сигнала. Время интегрирования, как правило, составляет 1 сек, а текущая частотная полоса работы приемника ~3 кГц, т.е. база сигнала $B \sim 3000$.

ЛЧМ-сигнал имеет свои особенности в реализации режима ВЗ ионосферы [7]. В силу того, что синтез опорных частот должен выполняться непрерывно, существуют два пути использования ЛЧМ-технологии в ионозондах ВЗ. Первый — ЛЧМ-излучение модулируется импульсом (псевдослучайная последовательность импульсов постоянной длительности [8]), как и в классическом случае вертикального радиозондирования ионосферы и применяется комплексная обработка. На этом принципе построен ионозонд Varray Research, основоположник технологии ЛЧМ-сигнала в радиозондировании ионосферы. Второй — разделяются приемная и передающая антенны на некоторое расстояние (~100 м и более) для ослабления земной волны и используются маломощные РПДУ (~5–10 Вт). Выделение полезного сигнала выполняется в приемнике с большим динамическим диапазоном (> 100 дБ). Примеры ионограмм ВЗ приведены на рис. 4 — с использованием импульсной технологии на левой панели (интервал импульса ~ 500 мкс), когда используется одна антенна для излучения и приема и отдельных, разнесенных антенн — правая панель (моностат). Потенциальный выигрыш в SNR по сравнению со стандартной ситуацией: гладкий импульс 100 μ s, излучаемая мощность 1 кВт и параметрами ЛЧМ-сигнала: 100 Вт с 1 секундным интервалом интегрирования может составлять ~40 дБ. Однако в реальности SNR несколько меньше, в силу интегрирования и шумов в расширенной полосе анализа, и оценивается величиной ~30 дБ. Т.е., излучаемая мощность может быть понижена

до десятков ватт. Следует отметить, что импульсная реализация ЛЧМ-технологии порождает собственные шумы и для нее требуется более высокий энергетический потенциал, что можно видеть на рис. 4 — мощности РПДУ не хватает для выделения следа отражения от E-слоя ионосферы вследствие большего поглощения зондирующих волн в области низких частот.

Пример современных ионограмм НЗ, полученных на р/трассах различной протяженности: ИЗМИРАН — Нижний Новгород (~ 500 км) и Инскип(Англия) — ИЗМИРАН (~2500 км), представлен на рис. 5 и видно, что использование техники ЛЧМ-зондирования позволяет выделить не только базовые моды, но и различить магнитоионные компоненты внутри этих мод (даже при квазипоперечном распространении), да и само качество ионограмм НЗ, в общем, заметно выше по сравнению с простым импульсным методом (рис. 1) и ФКМ-сигналом (рис. 3). Потенциальная возможность высокой разрешающей способности ЛЧМ-технологии в экспериментах по нелинейному воздействию мощного излучения на ионосферную плазму показана в [9], где требовалось выделить слабый сигнал ракурсного рассеяния зондирующего излучения на искусственно генерируемых мелкомасштабных неоднородностях. Принципиальная возможность ее применения к сверхдальним р/трассам рассмотрена в [10], что доказывает устойчивость сигнала в прохождении больших расстояний в ионосферной плазме.

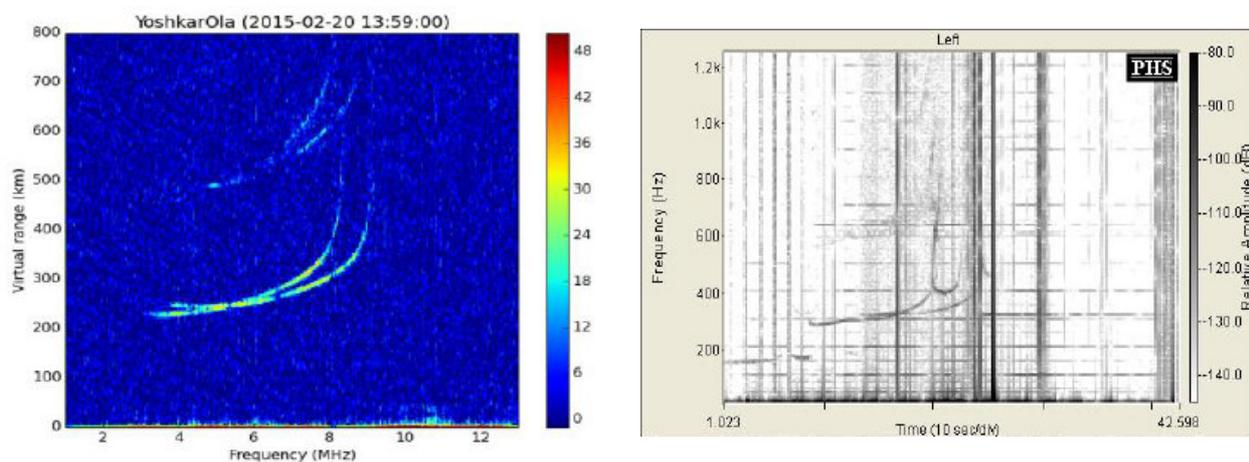


Рис. 4. Левая панель – ионограмма ВЗ на основе ЛЧМ-технологии с импульсной модуляцией, правая панель – ионограмма с непрерывным излучением (моностат).

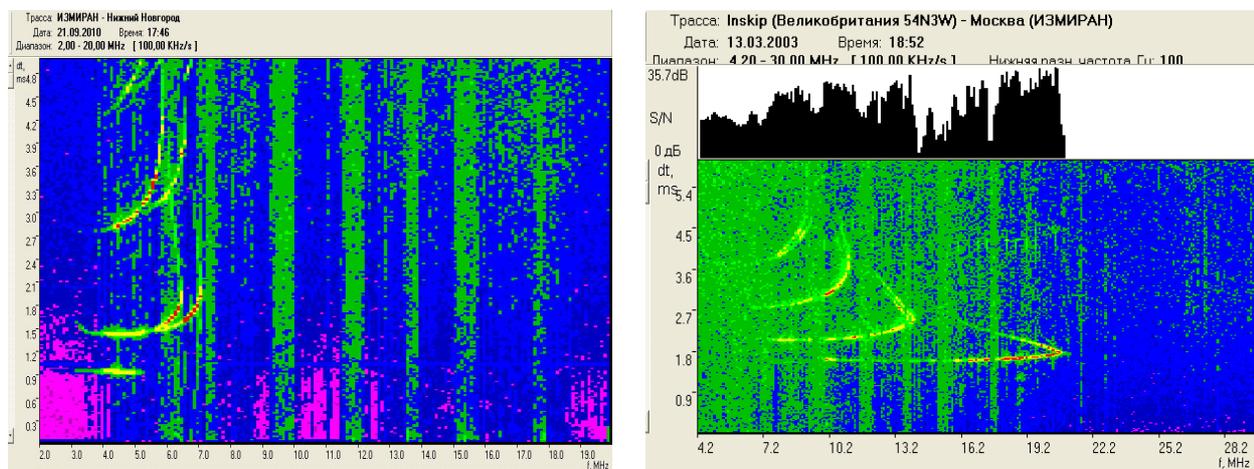


Рис. 5. Левая панель — ионограмма НЗ на дальности ~500 км, а правая панель — 2500 км. Ионограммы получены с использованием технологии ЛЧМ-сигнала. Отношение сигнал/шум может достигать ~ 40 дБ при мощности излучения ~ 500 Вт.

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ТИПА СИГНАЛА И МОЩНОСТИ БОРТОВОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ВЫСОКОАПОГЕЙНОГО (ГЕОСТАЦИОНАРНОГО) СПУТНИКА

В задаче радиозондирования (радиопросвечивания) ионосферы с борта высокоапогейных (геостационарных) спутников имеется особенность, отличающая данный вид диагностики от других – очень большое расстояние между точками излучения и приема. Оно превышает диаметр Земли, как характерный размер, и уже вполне могут возникать как эффекты дифракции радиоволн с длиной волны в десятки метров, так и возрастает поперечный размер физической области ионосферы (определяется первой зоной Френеля), влияющей на прохождение зондирующих волн. Т.е., увеличивается область неопределенности в локализации оценки ионосферных параметров. Также возрастают требования к энергетическому потенциалу метода диагностики вследствие большой расходимости.

Представленные выше результаты анализа типов диагностических сигналов позволяют утверждать, что наиболее перспективным средством в проблеме радиопросвечивания с больших орбитальных расстояний является подход на основе ЛЧМ-сигнала. Данный метод объединяет в себе как высокий коэффициент выигрыша в SNR за счет интегрального когерентного накопления, так и простоту структуры излучаемого сигнала (локально гармоническая радиоволна). Мощность излучения с борта спутника ограничена требованиями по электромагнитной совместимости с другим радиоэлектронным оборудованием и энергетическими возможностями платформы. Поэтому, представляется, что в рассматриваемом случае оптимальными являются следующие параметры реализации метода транзиосферного радиозондирования:

1. Базовый тип сигнала — ЛЧМ-сигнал с управляемой скоростью перестройки. Наиболее отработанным вариантом является скорость в 100 кГц/сек.
2. Выходная максимальная мощность РПДУ — 100 Вт с возможностью излучения дискретных уровней мощности (10%, 25% и 50 % от максимальной мощности).
3. Рабочая передающая антенна — горизонтальный диполь в свободном пространстве с относительно небольшими линейными размерами.

В последующих исследованиях представляется целесообразным проведение специального эксперимента моделирующего работу предлагаемой системы радиомониторинга ионосферы Земли.

ОСОБЕННОСТИ ТРАНСИОСФЕРНОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ С ВЫСОКОАПОГЕЙНЫХ СПУТНИКОВ – УЧЕТ ВЛИЯНИЯ СМЕЩЕНИЯ ЧАСТОТЫ

В основе технологии ЛЧМ-сигнала лежит преобразование группового запаздывания в сдвиг частоты. Если при этом передатчик сигнала движется, то появляется доплеровский сдвиг частоты, который, в общем случае, будет являться источником погрешности. Из специальной теории относительности принимаемая частота электромагнитной волны при направлении движения по линии, соединяющей приемник и передатчик, имеет вид

$$\nu = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - v_s^2/c^2}}{1 + v_s/c},$$

где ν_0 — номинальная частота, v_s — скорость спутника. Поскольку $v_s/c \ll 1$, то

$$\nu \approx \nu_0 / (1 + v_s/c) \approx \nu_0 (1 - v_s/c)$$

Поправка к частоте для номинала в 10 МГц и скорости спутника ~ 1 км/сек (над арктической зоной спутник движется по сильно вытянутой орбите с относительно небольшой скоростью) составляет $\Delta\nu = \nu_0 v_s/c \approx 30$ Гц. В реализации квадратуры на разностной частоте, по которой и оценивается спектр, с высоты в 10 000 км при скорости перестройки 100 кГц/сек относительная погрешность составит $\Delta f_d = 30/3000 \approx 1\%$. Т.е. групповое запаздывание будет содержать детерминированную погрешность ~ 100 км. За время равное продолжительности сеанса зондирования (от 2 до 20 МГц при скорости в 100 кГц/сек длительность сеанса составит ~ 3 мин) спутник пройдет расстояние ~ 180 км. Эти два фактора приведут к некоторому искажению транзиограммы, но, практически, не повлияют

на формирование частоты отсечки, поскольку спектр приписывается номиналу, а в нем доплеровская поправка очень мала (~ 0,0003%) — находится в доверительном интервале точности измерений.

ОБЩАЯ ОЦЕНКА СООТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ — ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ И ПРИНЦИПАЛЬНАЯ ВОЗМОЖНОСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ ИОНОГРАММЫ В МЕТОДЕ ТРАНСИОНОСФЕРНОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ С ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ ВЫСОТ ЛОКАЛИЗАЦИИ КА

Для уверенного выделения сигнала необходимо чтобы соотношение сигнал/шум с учетом коэффициента усиления приемной антенны, по крайней мере, составляло ~20 дБ. Предположим, что в качестве приемных антенн в точках приема будут использоваться слабонаправленные вертикальный или горизонтальный диполи (для высоких углов прихода целесообразно использовать горизонтальный диполь, для малых — вертикальный). Излучение также осуществляется посредством антенны дипольного типа. Для короткого диполя, находящегося в свободном пространстве, напряженность волнового поля может быть представлена соотношением [11]

$$E_0 \approx 210P_0^{1/2} / d, \tag{3}$$

где E_0 имеет размерность в милливольт на метр, P_0 — в киловаттах и d — в километрах. Следовательно, при отсутствии поглощения и учете только фактора расходимости в свободном пространстве, величина напряженности поля составит ~ 6 мкВ/м (μV) на поверхности Земли для стандартного излучателя 1 кВт.

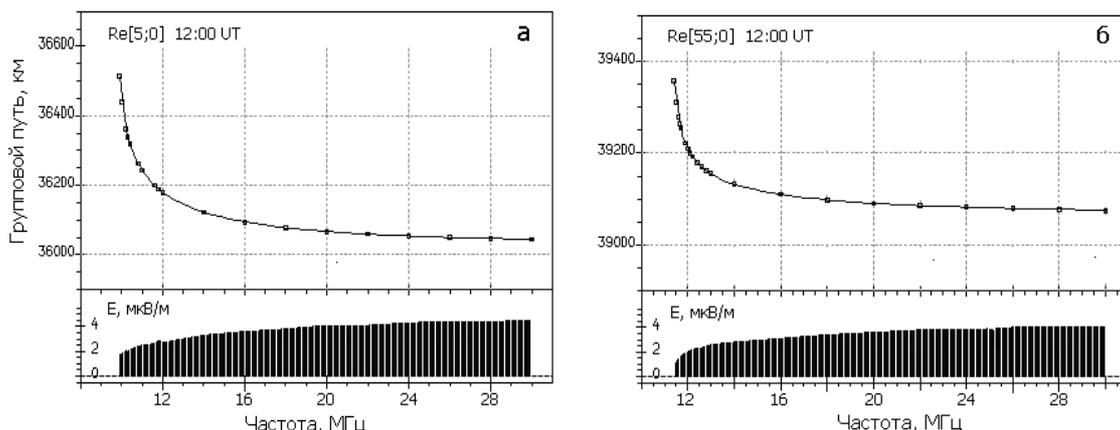


Рис. 6. Синтезированные ионограммы трансionoсферного зондирования ионосферы с геостационарного ИСЗ в глобальной модели ионосферы СМИ-88 для локального полудня сентября месяца и широт приема: 5°(а) и 55°(б).

На рисунке 5 представлены две синтезированные в изотропном приближении распространения радиоволн трансionoсферные ионограммы для модели ионосферы СМИ-88 (справочная модель ионосферы для электронной концентрации и эффективной частоты соударений электронов) при приеме в двух точках вдоль нулевого меридиана: вблизи экватора (на широте 5°) и на широте 55° (Москва). Уровень солнечной активности — средний (число солнечных пятен — $R = 50$) и время — локальный полдень. Видно, что дополнительная рефракция и поглощение поля волны за счет передачи энергии среде через частоту соударений электронов с ионами и нейтральными молекулами азота, кислорода и атомарного кислорода, рассчитываемой в модели, приводит к существенному уменьшению напряженности поля (~2 μV даже на частоте 30 МГц). Характер уменьшения волнового поля от частоты нелинеен. Особенно быстрое спадание поля имеет место вблизи частоты отсечки, вследствие большой расходимости при прохождении антиволноводного участка траектории в окрестности главного ионосферного максимума. В таблицах 2 и 3 представлены результаты оценки соотношения сигнал/шум в базовом решении (для мощности излучателя в 1 кВт) для 3-х частот: 12, 20 и 30 МГц. В данном случае рассматривался электромагнитный шум, состоящий из трех компонент: атмосферного,

галактического и антропогенного происхождения. Уровень антропогенного шума выбирался для загородной зоны расположения приемной станции, что естественно для ионосферных обсерваторий. Количественно суммарную среднеквадратичную величину шума (дБВт) в частотной полосе Δf в герцах можно оценить по методике, принятой МККР (CCIR-International Radio Consultative Committee) [12] в виде [11]

$$P_N = F_a + B - 204,$$

где $F_a(f)$ — эффективное среднеквадратичное значение шума (дБТ) суммированное по всем компонентам, в полосе 1 Гц [11] по отношению к тепловому шуму, $B = 10 \log(\Delta f)$ и последнее слагаемое — тепловой шум электронов $10 \log kT_0 = -204$, T_0 — 290°К, k — постоянная Больцмана.

В таблицах 2 и 3 представлены результаты оценки общего шума по отношению к фоновой компоненте — тепловому шуму электронов при температуре 20° С ($P_N[\text{дБТ}] = P_N[\text{дБВ}] + 204$) для выбранных частот в тех же точках приема, что и синтезированы транзиограммы (рис. 6) в величинах дБТ для полосы в 1 кГц. Хорошо видно, что для низкочастотной части транзиограмм интенсивность шума на экваторе существенно выше, чем в средних широтах, что объясняется более высокой грозовой активностью в тропической зоне, формирующей атмосферную компоненту шума.

Таблица 2.
Энергетический потенциал (на широте 5°).

f , кГц	E_0 , мкВ/м	P_N , дБТ	E_N , дБмкВ/м	E_N , мкВ/м	S/N , дБ
12000	2,7	45	1,9	1,2	7
20000	4,1	40	1,6	1,2	10
30000	4,5	27	-8,7	0,4	20

Таблица 3.
Энергетический потенциал (на широте 55°).

f , кГц	E_0 , мкВ/м	P_N , дБТ	E_N , дБмкВ/м	E_N , мкВ/м	S/N , дБ
12000	2,0	39	-3,9	0,6	10
20000	3,6	32	-7,0	0,4	19
30000	4,1	27	-8,9	0,4	20

Среднеквадратичная напряженность поля шума (в мкВ/м) для частоты f в мегагерцах выражается через мощность, частоту и частотную полосу Δf в герцах как [11]

$$E_N = F_a + 20 \log f + B - 95$$

и соответствующие значения в логарифмическом и линейном масштабах приведены в таблицах 2 и 3, как и итоговое отношение сигнала к шуму — $20 \log(E_0/E_N)$. Т.е., можно сказать, что для импульсного сигнала длительностью ~100 мсек (что необходимо для разрешения магнитоионных компонент) при мощности излучения в 1 кВт и приеме на изотропную антенну без потерь уже возможен, в принципе, прием зондирующего сигнала. Но следует отметить, что при учете требуемой частотной полосы в ~10 кГц для нижней, наиболее информативной части транзиограммы, сигнал и шум становятся сопоставимыми. (Необходимо также иметь в виду, что в реальной ионосфере имеет место магнитоионное расщепление сигналов. Поэтому для каждой компоненты поле уменьшится, как минимум, в $\sqrt{2}$ раз, а соотношение сигнал/шум на 3 дБ). Однако серьезным препятствием для излучения импульсных сигналов указанной мощности с борта ИСЗ являются проблемы их электромагнитной совместимости

с прочими измерительными и штатными системами. А снижение мощности излучения, например, на порядок приведет к низкому качеству трансionoграмм.

Альтернативой подход состоит в использовании сложных широкополосных сигналов. В настоящее время в практике наклонного радиозондирования ионосферы, включая диагностику волнового поля, рассеянного на искусственных неоднородностях, генерируемых при воздействии мощного радиоизлучения на ионосферу, апробированным средством является использование ЛЧМ-сигнала [9]. В этих экспериментах уверенно регистрировалось рассеянное на искусственных генерируемых неоднородностях поле зондирующих волн, которое на ~30–40 дБ ниже уровня прямого сигнала на расстоянии ~1000 км при мощности излучения в ~500 Вт. При этом существенно (до 3–5 мин.) увеличивается время зондирования. Тем не менее, принимая во внимание, что положение геостационарного или высокоэллиптического ИСЗ над земной поверхностью практически не меняется подобное удлинение сеанса зондирования не является неприемлемым. Коэффициент усиления в технологии ЛЧМ-сигнала составляет, как минимум, 30 дБ. Уменьшение мощности до 100 Вт дает уменьшение на 10 дБ, но, даже уменьшая ее на порядок величины (увеличивается частотная полоса сигнала), можно рассчитывать на формирование соотношения сигнал/шум на уровне ~15–20 дБ, что вполне достаточно для надежного приема сигнала. Дальнейшее увеличение этого параметра возможно уже только за счет коэффициента усиления приемной антенны.

КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ ТРАНСИОНОСФЕРНОГО Р/ЗОНДИРОВАНИЯ В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ

Результатом многочастотного радиопросвечивания ионосферы является трансionoграмма — зависимость группового пути регистрируемых зондирующих сигналов от частоты (принципиальный вид — рис. 6, но с магнитоионным расщеплением следа). Характерным свойством трансionoграммы является наличие минимальной частоты, на которой еще регистрируется прохождение зондирующих сигналов через ионосферу — так называемая частота отсечки. Задачей диагностики является оценка геофизических параметров ионосферы, которые бы отражали ее текущее состояние, в частности, наиболее традиционно информативного — величину плазменной частоты в максимуме слоя F2 — $foF2$. Поэтому математическая часть метода многочастотного радиопросвечивания ионосферы состоит в анализе соотношений, связывающих частоту отсечки и локализованное значение критической частоты главного ионосферного максимума. Для углов прихода, близких к вертикальным (рис. 6а), частота отсечки будет очень близка к f_xF2 — критической частоте необыкновенной компоненты волнового поля, которая через гирочастоту электронов связана с $foF2$. Для измеряемых параметров трансionoферного радиозондирования с больших расстояний сохраняется свойство локальности — характерной размер зоны Френеля $\sqrt{\lambda z}$ составляет ~30 км.

Эффективность метода МРПИ можно выразить в следующих аспектах:

1. Относительная простота в реализации — на борт КА ставится только радиопередающее устройство с системой синхронизации и универсальной передающей антенной. Интервал зондирования можно выбрать соответствующим стандарту ВЗ — 15 мин.
2. Прием излучения также осуществляется относительно недорогими приемниками и результат — значение частоты отсечки будет получен непосредственно в месте регистрации. Для приема сигналов трансionoферного прохождения могут использоваться диапазонные связные антенны. Простая структура трансionoграммы позволяет надеяться на автоматизацию ее распознавания и оценку ключевого ионосферного параметра — $foF2$.
3. Даже только временные данные $foF2$ в локальном пункте арктической зоны дают возможность использовать адаптационные свойства ионосферных моделей, что значительно повышает надежность оперативного мониторинга и прогноза радиосвязи в декаметровом диапазоне радиоволн. Это важный прикладной аспект радиозондирования ионосферы, в том числе, с высокоапогейных спутников.
4. Сам факт успешной реализации метода радиопросвечивания с больших дальностей имеет фундаментальное значение, поскольку является совокупностью результатов как теоретического представления о сверхдальнем трансionoферном распространении радиоволн, так и технической реализации современных методов радиозондирования ионосферы Земли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ базовых типов сигналов, используемых в практике ионосферного радиозондирования, и получена оценка энергетического потенциала в задаче многочастотного радиопросвечивания ионосферы (трансионосферного радиозондирования) с высот локализации геостационарных (высокоорбитальных) спутников в технологии использования линейно-частотно модулированного сигнала, как оптимального для сверхдальнего распространения радиоволн. На основе уже применяющихся в практике систем ионосферной радиосвязи в авиации выбрано радиопередающее устройство с мощностью в 100 Вт, способное стать основой для формирования зондирующего радиоизлучения с борта космического аппарата.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 15-29-06052.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов В.А., Иванов Д.В., Рябова Н.В. Зондирование ионосферы и дециметровых каналов связи сложными сигналами // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия “Радиотехнические и инфокоммуникационные системы”, 2010. №1(8). С. 3–37.
2. Гивишвили Г.В., Крашенинников И.В., Лещенко Л.Н., Власов Ю.М., Кузьмин А.В. Ионозонд “Парус-А”: Функциональные возможности и перспективы развития. // Электронный научный журнал «Гелиогеофизические исследования», 4-й выпуск, 2013. Изд-во: Институт прикладной геофизики им. ак. Е.К. Федорова, Москва.
3. Barker R.H. Group synchronization of binary digital systems // in *Communication Theory*, W. Jackson, Ed. London, UK: Academic, 1953. P. 273–287.
4. Huang J., MacDougall J.W. Legendre coding for digital ionosondes // *Radio Science*, 2005. V.40. RS4013, doi: 10.1029/2004RS003123.
5. Reinisch B. The digisonde portable sounder – DPS // *Technical manual*. University of Massachusetts Lowell Center for Atmospheric Research, 2007, Version 4.3. 404 p.
6. Ming Y., Gang C., Zhengui Z., Yuhao W., Bo B. A Novel Low-Power Multifunctional Ionospheric Radio Sounding System // *IEEE Transaction on Instrumentation and measurements*, 2012. V.61. No.5. P. 1252 – 1259.
7. Иванов В.А., Куркин В.И., Носов В.Е., Урядов В.П., Шумаев В.В. ЛЧМ-ионозонд и его применение в ионосферных исследованиях // *Изв. вузов. Радиофизика*, 2003. Т.46. № 11. С. 919–252.
8. Pool A. W. V. On the use of pseudorandom codes for «chirp» radar // *IEEE transaction on antennas and propagation*, 1979. v. AP27, n. 4, P. 480–485
9. Урядов В.П., Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г., Кубатко С.В., Понятов А.А., Черкашин Ю.Н., Крашенинников И.В., Валов В.А., Комраков Г.П., Макаров А.В., Бредихин Д.В. Зондирование искусственно возмущенной области ионосферы с помощью ионозонда/пеленгатора с линейной частотной модуляцией сигнала. // *Изв. вузов. Радиофизика*, 2009. Т.ЛII, №4. С. 267–277.
10. Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Вертоградова Е.Г., Понятов А.А. Сверхдальнее зондирование ионосферного канала с помощью ионозонда/пеленгатора с линейной частотной модуляцией сигнала // *Изв. Вузов Радиофизика*. 2010. Т.53. №3. Сс. 176–187.
11. Maslin N.M. *HF Communication: A System Approach*. Pitman Publishing. 1987. 240 p.
12. Spaulding A.D., Stewart F.G. An Updated Noise Model for Use in IONCAP. NTIA Report TR-87-212. 72 p. 1987.

ANALYSIS OF BASIC TYPES OF SIGNALS IN PROBLEM OF IONOSPHERIC RADIO SOUNDING AND CRITERIA OF EFFECTIVENESS THE COSMIC SYSTEM FOR TRANSIONOSPHERIC MONITORING THE ARCTIC REGION

I.V. Krasheninnikov

Some results in applicability of multi-frequency radio translucence of the ionosphere (transionospheric radiosonde) from high elliptical satellites over the Arctic are presented. The basic types of signals used in the modern practice of radio sounding of the ionosphere were analyzed and it has been suggested as the best option, to apply a linear-frequency modulation of the probe radiation on a board of the satellite for this purpose. Estimation of the required energy potential of the diagnostic system for positioning in geostationary altitude and speed ratio of the spacecraft, leading to the Doppler frequency shift of the sensing radio waves were analyzed.

KEYWORDS: RADIO TRANSLUCENCE OF THE IONOSPHERE, TRANSIONOSPHERIC RADIO SOUNDING, LINEAR FREQUENCY MODULATED SIGNALS, TRANSIONOGRAM.