

УДК 551.510.535:550.338

## МНОГОЧАСТОТНОЕ РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЕ АРКТИЧЕСКОЙ ИОНОСФЕРЫ

Г.В. Гивишвили, И.В. Крашенинников, В.А. Гарбацевич

Поступила в редакцию 30.12.2016 г.

Рассматривается метод многочастотного радиопросвечивания ионосферы с использованием высокоэллиптических космических аппаратов и технических средств наземных приемных пунктов с особенностями его реализации в Арктическом регионе. Анализируются возможности метода, в частности, энергетический потенциал регистрации частоты отсечки с использованием, как классических импульсных сигналов, так и линейно-частотно модулированного излучения. Обсуждаются физические предпосылки реализации предлагаемого метода диагностики состояния ионосферы.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ИОНОСФЕРА, МЕТОД, РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЕ, КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ, БОРТОВОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ, НАЗЕМНЫЙ ПРИЕМНИК

### ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг ионосферы с помощью космических аппаратов (КА) основан на разновидности традиционного вертикального зондирования (ВЗ) ионосферы, при которой ионозонд располагается на борту КА. Впервые эта идея была реализована в 1962 г. [1], после чего было произведено множество пусков КА с высотой орбиты от 508 до 3523 км с ионозондами на борту. Доказавший свою жизнеспособность и востребованность, метод получил название внешнего зондирования (topside sounding), или ВнЗ. Однако, при всех его бесспорных преимуществах, ему также присущ ряд специфических особенностей, ограничивающих его применение, в частности, в вопросах оперативной (в реальном времени) диагностики и краткосрочного прогноза состояния окружающего космического пространства. Во-первых, большая скорость перемещения проекции низкоорбитальных КА вдоль земной поверхности ( $8 \div 12$  км/с) не позволяет строго разделять временные и пространственные характеристики диагностируемой среды. Во-вторых, задержка между непосредственными измерениями параметров среды, сбросом данных в наземные пункты приема и первичной обработки информации с последующей выдачей результатов в аналитические центры может составлять довольно продолжительное время. В-третьих, ВнЗ определяет, фактически, два параметра: критическую частоту ( $f_oF2$ ) и высоту максимума слоя F2 в подспутниковой точке. Структура внутренней ионосферы остается недоступной контролю с высот локализации спутника. В-четвертых, появление КА в зоне прямой видимости над каждым фиксированным пунктом наблюдений (или приема информации) происходит крайне ограниченное время ( $20 \div 25$  мин), притом, вследствие смещения орбиты по долготе, не чаще одного раза в сутки.

В работах [2,3] был предложен альтернативный метод ионозондового мониторинга ионосферы с помощью использования КА на геостационарной или высокоэллиптической орбите. Энергетические аспекты проблемы трансionoсферного радиозондирования для геостационарного КА рассматривались в [4] и была предложена реализация метода на основе использования линейно-частотно-модулированного сигнала. В данной работе рассматриваются базовые основы метода многочастотного радиопросвечивания ионосферы с высокоэллиптических спутников применительно к Арктическому региону.

### МЕТОД МРПИ – АЛЬТЕРНАТИВНОЕ РЕШЕНИЕ

Метод включает в себя: а) ставку исключительно на просвечивание ионосферы на частотах декаметрового диапазона, близких к границе радиопрозрачности, что исключает резонансное взаимодействие (зондирование) между средой и радиоволной; б) разделение радиопередающих и радиоприемных устройств. Тем самым: а) источником информации становится не традиционная

ионограмма, а ионограмма, фиксирующая только сигналы радиопросвечивания; б) инструментом измерения становится не ионозонд, а система из одного сканирующего бортового передающего модуля (БПМ) и сети из наземных приемных модулей (НПМ), синхронизированных с бортовым передающим устройством. Так как в данном случае на земной поверхности регистрируются лишь сигналы, не испытавшие полного внутреннего отражения, метод назван многочастотным радиопросвечиванием ионосферы (МРПИ) [3].

Вследствие относительной стабильности мощности излучаемых сигналов и определенности в местоположении источника излучения в пространстве метод МРПИ может, также, представлять собой аналог многочастотного искусственного риометра (измерителя уровня поглощения космического радиоизлучения). Сигналы, регистрируемые в методе МРПИ, несут больше информации и обладают существенно большей чувствительностью, нежели используемые в практике традиционных риометрических измерений. Это особенно актуально для полярной ионосферы, которая регулярно подвергается разнообразным возмущениям в нижней ионосфере (эффекты аномального поглощения – ППШ и АП) и в слое F2 (во время ионосферных и магнитосферных бурь и суббурь), вносящим заметные погрешности в функционирование навигационных систем *GPS* и ГЛОНАСС в арктическом регионе.

Зависимость группового пути от частоты –  $P'(f)$ , в данном случае, есть ионограмма радиопросвечивания (или транзионограмма), которая, в общем случае, представляет собой более простой объект, нежели ионограммы вертикального или наклонного радиозондирования, что позволяет надеяться на автоматизацию процесса распознавания ее структуры, интерпретации и обработки. Таким образом, в каждом текущем сеансе измерений на каждом из НПМ определяются следующие характеристики:

1.  $f_c$  – частота отсечки, равная наименьшей частоте (НЧ) прошедших сквозь ионосферу сигналов, которая может быть связана со значением  $f_oF2$  в локальной области пересечения луча зрения на спутник и главного ионосферного максимума, что дает возможность использовать адаптационные процедуры в модельном представлении ионосферы и, в частности, более корректно рассчитывать максимально применимую частоту (МПЧ);

2.  $L(f)$  – частотная зависимость поглощения транзионосферных сигналов, позволяющая с высокой точностью оценивать энергетику КВ-сигналов, распространяющихся в полярной зоне и вычислять интегральное состояние фактора ионосферного поглощения.

## ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Энергетическая проблема является решающим фактором в надежности регистрации транзионограмм и рассмотрим ее на примере численного эксперимента со спутником, находящимся: а) над Северным полюсом и б) над Исландией с высотами: 10000, 20000 и 30000 км. Прием осуществляется в п. Диксон (73°N, 80°E). Рассматриваемые радиотрассы ориентированы, практически, в плоскости магнитного меридиана (меридиональная) и ортогонально к ней (широтная), а дальности по земной поверхности между излучателем и приемником составляют ~ 1900 и ~ 2600 км. Такая постановка задачи соответствует двум асимптотическим случаям – квазипродольному и квазипоперечному распространению радиоволн в ионосфере. Расчеты выполнялись в глобальной модели ионосферы СМИ-88 [5], особенностью которой является парциальная модель полярной ионосферы Беспрозванной [6], для марта 2016 г. – в период весеннего равноденствия. Рассматривались случаи локальных полудня и полуночи с индексом солнечной активности  $R_z = 50$  и спокойных геомагнитных условий. Технология моделирования в краевой задаче распространения радиоволн для высокоширотной ионосферы в принципиальной форме описана в [7] и различие состоит только в высоте источника излучения над земной поверхностью. Для меридиональной радиотрассы лучевые траектории, по которым формируется волновое поле для частот вблизи границы радиопрозрачности ионосферы, представлены на рис. 1 и видно, что наибольшее воздействие ионосферной плазмы на зондирующие волны происходит в окрестности главного ионосферного максимума.

Учитывались следующие факторы в формировании энергетических характеристик волнового поля, задаваемого стандартным излучателем мощностью 1 кВт с полосой 1 кГц: геометрическая (пространственная) расходимость и поглощение в ионосфере через частоту столкновений электронов с ионами и нейтральными молекулами газов. В силу большого расстояния от спутника до приемного пункта фактор расходимости является определяющим в итоговой напряженности волнового поля – он более чем на четыре порядка превосходит столкновительные потери волны в ионосферной плазме.

Антенны как передающая на спутнике, так и приемная на Земле предполагались изотропными, и использование реальных антенн, особенно на приемном конце радиотрассы, может дать существенный выигрыш в задаче выделения зондирующего сигнала. Соотношение сигнал/шум (SNR) рассчитывалось по методике, использованной в [4] для геостационарного КА, отличие состояло в пренебрежении антропогенным источником электромагнитного шума в силу его малости в Арктическом регионе.

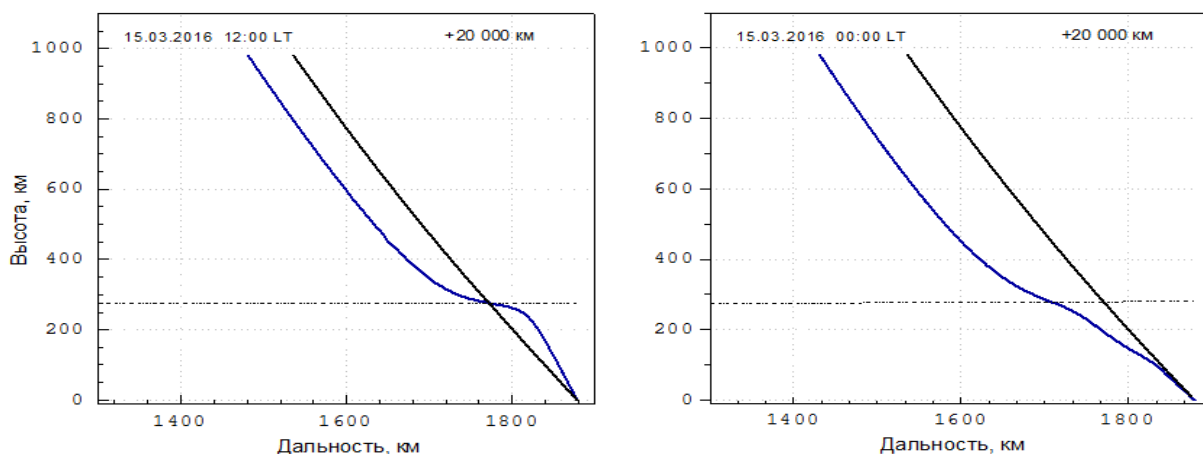


Рис. 1. Лучевые траектории в меридиональной плоскости для луча прямого зрения на спутник и для частоты вблизи границы радиопрозрачности ионосферы: левая панель – локальный полдень, правая – локальная полночь.

На рисунке 2 приведены результаты в виде трансionoграмм для локальных полудня (левая панель) и полуночи (правая панель) для высоты локализации КА 30 000 км в меридиональной плоскости р/трассы радиопросвечивания. Хорошо видно, что на частоте отсечки уменьшается как напряженность поля, что связано с антиволноводным характером распространением в окрестности максимума слоя F2 (рис. 1), так и SNR, причем для полуночи SNR даже меньше, чем для полудня, в силу общего возрастания электромагнитных шумов с уменьшением частоты. Антиволноводное распространение характеризуется повышенной расходимостью радиоволны и появлением неустойчивости лучевой трубки, что проявляется в флуктуациях напряженности волнового поля в окрестности частоты отсечки.

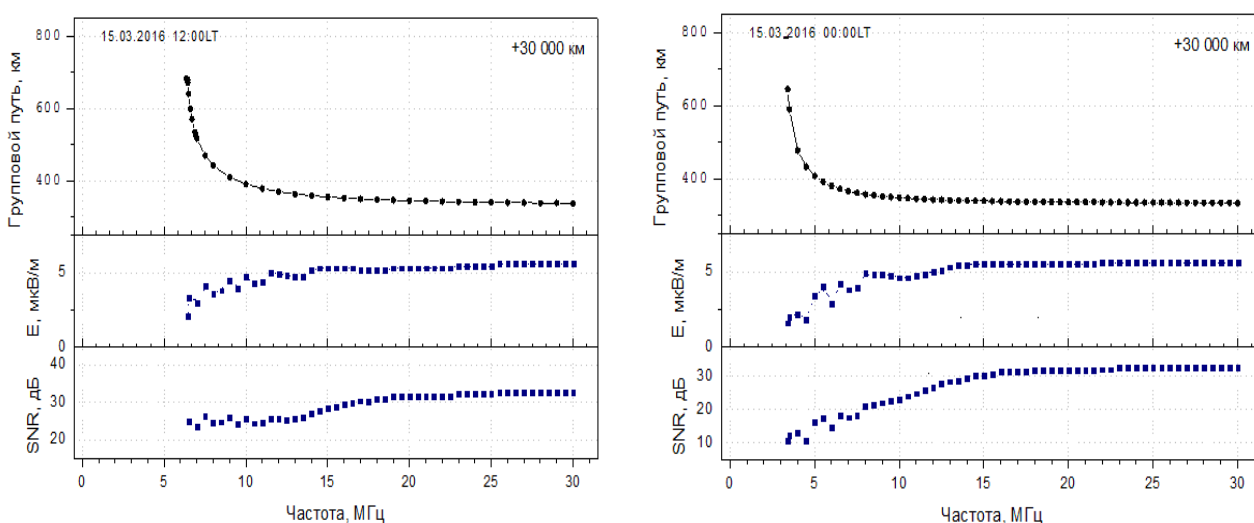


Рис. 2. Синтезированные трансionoграммы с энергетическими характеристиками в точке приема: напряженностью волнового поля и соотношением сигнал/шум: левая панель – локальный полдень, правая панель – локальная полночь.

В реальной практике радиозондирования ионосферы частотная полоса применяемых сигналов значительно больше – для простых импульсных посылок она составляет  $\sim 10$  кГц и такой сигнал в рассмотренной постановке задачи уже будет на уровне шумов в окрестности частоты отсечки. Кроме того излучение импульсных сигналов относительно большой мощности может создавать проблемы электромагнитной совместимости с другой измерительной и управляющей аппаратурой, находящейся на борту КА. Альтернативой подход состоит в использовании структурированных широкополосных сигналов, что позволяет снизить излучаемую мощность. Однако в данной ситуации сложно рассчитывать на фазо-кодо-манипулированный (ФКМ) сигнал, поскольку его применение требует расширенной полосы приемника  $\sim 30$  кГц, а выигрыш за счет увеличения его базы составляет  $\sim 13$ – $15$  дБ. В настоящее время в практике наклонного радиозондирования ионосферы, в том числе и на больших расстояниях и в тонких экспериментальных исследованиях по ракурсному рассеянию диагностического радиоизлучения на искусственно генерируемых мелкомасштабных неоднородностях, апробированным средством является использование ЛЧМ-сигнала [7,8]. При этом существенно (до 3–5 мин.) при стандартной в ионосферных исследованиях скорости  $100$  кГц/сек увеличивается время зондирования. Тем не менее, принимая во внимание, что положение высокоорбитального ИСЗ над земной поверхностью мало меняется на таком масштабе времени, подобное удлинение сеанса зондирования не является неприемлемым. Выигрыш в SNR в технологии ЛЧМ-сигнала составляет  $\sim 30$  дБ. Уменьшение мощности излучения до  $100$  Вт дает уменьшение SNR на  $10$  дБ, но, даже уменьшая ее на порядок величины (увеличивается частотная полоса сигнала на этапе обработки), можно рассчитывать на увеличение соотношения сигнал/шум на  $10$  дБ, что уже вполне достаточно для приема сигнала. Дальнейшее увеличение этого параметра возможно только за счет коэффициента усиления приемной антенны, которое, например, для фазированной антенной решетки (ФАР), состоящей из 4-х горизонтальных диполей может составлять  $10$ – $12$  дБ.

## СТРУКТУРА ТРАНСИОНОГРАММЫ

На рисунке 2 представлен основной след на трансионограмме в изотропном приближении показателя преломления для трассы радиозондирования – Северный полюс – Диксон, для которой условия прохождения радиоволн близки к квазипродольному приближению. В реальной ситуации наиболее сильным фактором, усложняющим структуру трансионограммы, будет геомагнитное поле – появится магнитоионное расщепление в форме O- и X-компонент (рис. 3). Величина расщепления в рассматриваемом случае будет несколько больше, чем, к примеру, на средних широтах и составляет  $\sim 1$  МГц (рис. 3), что связано с большим значением модуля гирочастоты электронов в высоких широтах. Следует отметить нестандартный для квазипродольного распространения радиоволн вид ветвей трансионограммы – локальное искривление лучевой траектории в окрестности максимума слоя F2 приводит к практически квазипоперечному приближению, когда асимптотика O-компоненты стремится к асимптотике виртуальной “изотропной” ветви, что более характерно для широтной радиотрассы. Другой особенностью ионограмм в условиях сильного продольного градиента может быть формирование дополнительных следов. Такие следы, в отличие от базовых, могут существовать только в довольно узком частотном диапазоне. Так, для локально-полуденного случая (рис. 1), высока вероятность формирования комбинированной моды со вторым скачком, обусловленным отражением от ионосферы вследствие роста электронной плотности в направлении на приемник. При определенной конфигурации положений излучающих и приемных средств может проявиться влияние полярной стенки главного ионосферного провала, для которой продольная неоднородность (градиент) весьма существенен.

## ПРИЕМНЫЕ АНТЕННЫ

Результаты моделирования показывают, что вертикальные углы прихода зондирующих волн на дальностях от приемной точки  $\sim 2000$  км составляют  $\sim 60$ – $70^\circ$  к горизонту. Для таких углов прихода в декаметровом диапазоне радиоволн можно выделить два класса пригодных антенн, использующихся в наземном вертикальном радиозондировании ионосферы: проволочные (токовые) антенны ромбического типа (полуромбического – “Дельта”) с нагрузкой в верхней части и горизонтальные дипольные (ВГД) [9]. Базовым условием их применимости в задаче МРПИ является работа в широком диапазоне частот ( $2$ – $30$  МГц), что достигается относительно небольшими линейными размерами, чтобы диаграмма направленности не распадалась на верхней границе диапазона зондирования. Длина

волны для частоты 30 МГц составляет 10 м и, следовательно, для “Дельта”-антенны линейные размеры должны быть порядка длины волны (10-15 м), а для дипольной –  $\frac{1}{4} \lambda$  (2.5 м).

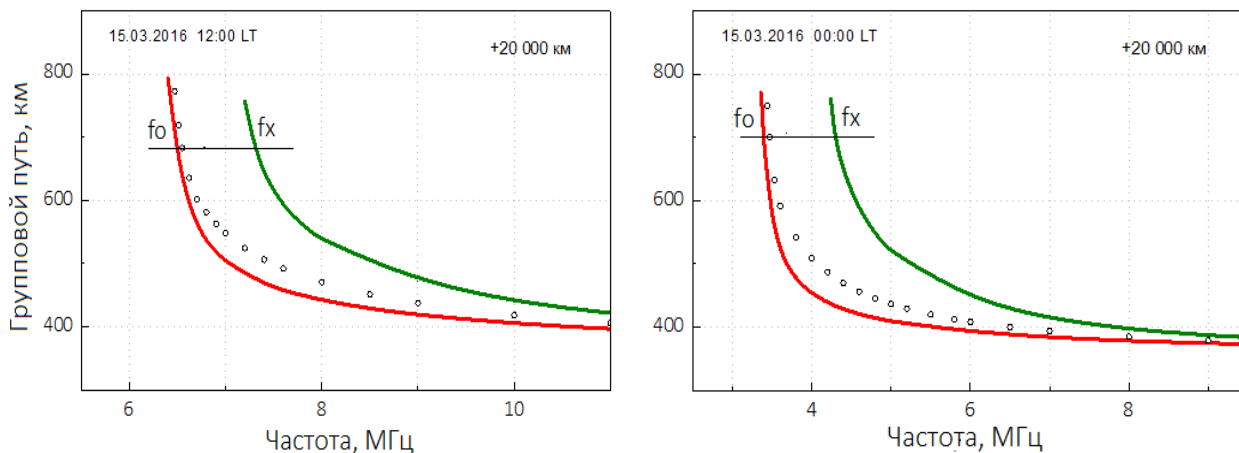


Рис. 3. Синтезированные трансionoграммы с учетом магнитоионного расщепления зондирующих волн в области максимального изменения группового пути: левая панель – локальный полдень, правая панель – локальная полночь. Светлыми кружочками отмечен след в изотропном приближении показателя преломления.

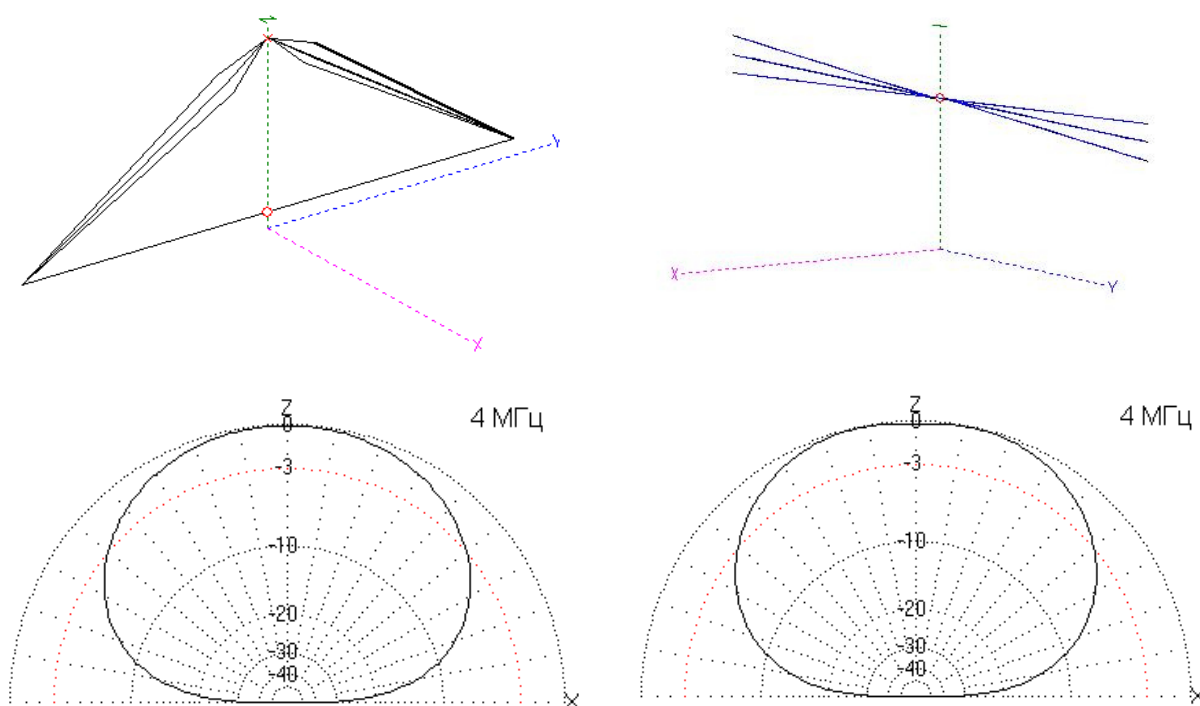


Рис. 4. Схематические изображения рабочих приемных антенн и диаграмм направленности в вертикальной плоскости в задаче многочастотного радиопросвечивания ионосферы с высокоапогейных спутников в Арктической зоне: “Дельта”- антенна и горизонтальный диполь.

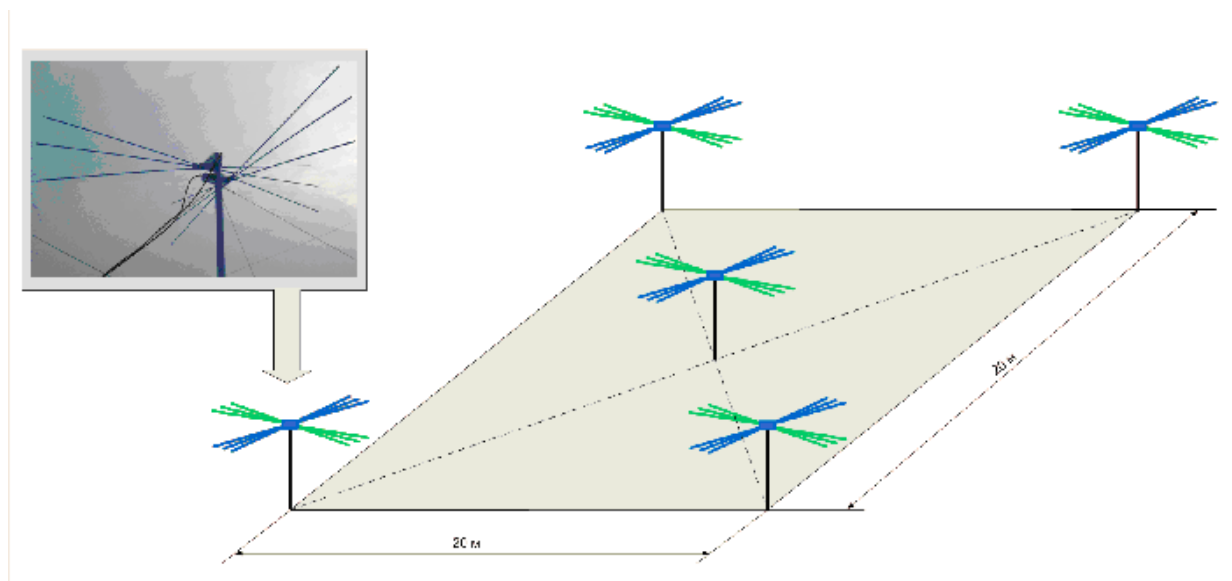


Рис. 5. Фазированная антенная решетка (20×20 м) из скрещенных дипольных антенн в задаче многочастотного радиопросвечивания ионосферы с высокоапогейных спутников в Арктической зоне. Потенциальный коэффициент усиления ~ 12-15 дБ.

Диапазонность антенны достигается специальным инженерным приемом – искусственным увеличением сечения антенного полотна [10]: для проволочных антенн – несколькими проводами (рис. 4, левая панель), а для диполей – наличием нескольких лучей в плече в вертикальной плоскости (рис. 4, правая панель). Высоты подвеса антенн стандартные для высокоугловых исследований: 2 м – для нижнего провода “Дельта” – антенны с вертикальным размером ~ 10 м и 5–6 м – для горизонтальной дипольной антенны.

Диаграммы направленности (ДН) рассчитывались в численной реализации электродинамического представления теории антенн [11]. В горизонтальной плоскости ДН в области низких частот для рассматриваемых антенн имеют практически изотропный (слабовытянутый в плоскости элементов антенн) характер и степень вытянутости в плоскости полотна несколько выше у “Дельта”-антенны. Нормированные диаграммы направленности в вертикальной плоскости для частоты 4 МГц приведены на рис. 4 и видно, что они, в большой степени, подобны, но значительно различаются в величине коэффициента усиления. Для “Дельта”-антенны он составляет ~ 0 дБ, а для дипольной ~ 6–7 дБ в главном направлении. Таким образом, основываясь на результатах расчета энергетического потенциала (рис. 2), можно заключить, что выделение сигнала уже возможно при приеме линейно-частотно-модулированного сигнала на одну горизонтальную дипольную антенну (на практике лучше использовать два скрещенных диполя для разделения характеристических волн). Применение ФАР на рассмотренных элементах может за счет формирования более узкой диаграммы направленности в зенитном направлении довести коэффициент усиления до 10-12 дБ. Пример такой антенны, разработанной для транспортируемого ионозонда вертикального радиозондирования с невысокой мощностью излучения (~ 600 Вт) и сложным сигналом, представлен на рис. 5.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ, ПОДТВЕРЖДАЮЩИЕ ВОЗМОЖНОСТЬ РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДА

Экспериментальные свидетельства возможности реализации устойчивой радиотрассы в КВ-диапазоне волн между высокоорбитальным КА и земной поверхностью основаны на данных измерений, ведущихся с 50-х годов прошлого столетия. Они могут быть разделены на несколько групп:

1. Измерения интенсивности радиоизлучения Солнца в интервале зенитных углов  $\chi = 0 \div 80^\circ$  на частотах  $\geq 5$  МГц, с рефракционной поправкой по углу, не выходящей за пределы  $1'$  [12].
2. Измерения интенсивности радиоизлучения Юпитера на частотах  $8 \div 40$  МГц; с шириной лепестка приемной антенны, составляющей около  $2,5^\circ$  [13].
3. Измерения интенсивности космических радишумов на частотах  $9 \div 25$  МГц в годы высокой, умеренной и низкой солнечной активности – рис. 8 [13].

4. Измерения интенсивности дискретных источников космического радиоизлучения:  $5,8 \div 25$  МГц (Кассиопея А) и  $13 \div 25$  МГц (Лебедь А) [14].
5. Радиомаяковые измерения с геостационарных КА на частотах  $40 \div 41$  МГц [15,16].

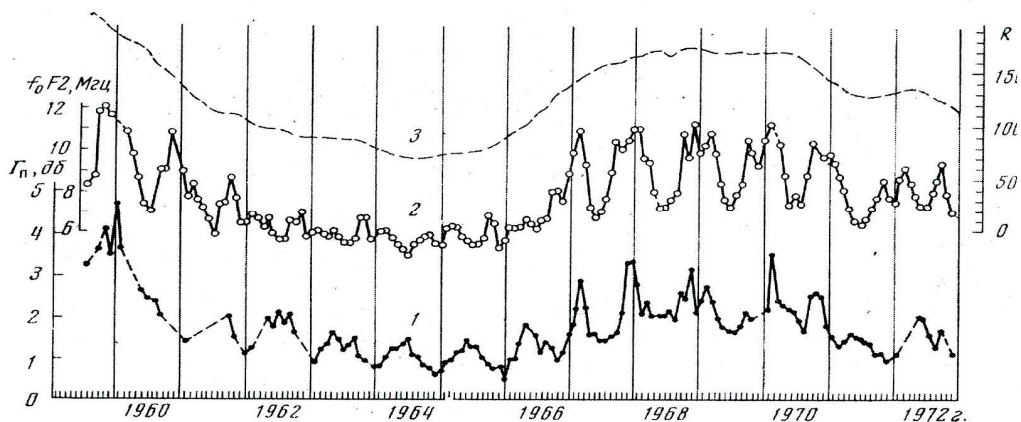


Рис. 6. Вариации: поглощения космических радиошумов на частоте 13 МГц – кривая 1;  $f_0F_2$ - кривая 2; сглаженных чисел Вольфа – кривая 3.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен метод диагностики ионосферы в Арктическом регионе, основанный на радиопросвечивании (РПС) ионосферы сигналами переменной частоты декаметрового диапазона. Сигналы излучаются с борта высокоапогейного КА и принимаются на земной поверхности. Результаты их анализа фиксируются в виде ионограмм РПС в противоположность известным ионограммам ВЗ, НЗ или ВнЗ.

Достоинства метода МРПИ заключаются в:

- относительной простоте реализации и радиофизической обоснованности;
- простой структуре ионограмм радиопросвечивания;
- однозначности регистрируемых характеристик,
- оперативности их обработки.

Тем самым, появляется новый инструмент в решении проблемы мониторинга ионосферы в арктической зоне Российской Федерации.

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

## ЛИТЕРАТУРА

1. Florida C.D. The Development of a series of ionosphere satellites // Proc. IEEE/ V. 57, № 6, P.867-875, 1969.
2. Гивишвили Г. В., Иванов-Холодный Г.С. Авторское свидетельство № 1443619 от 08. 08. 1988.
3. Гивишвили Г.В. Многочастотное просвечивание ионосферы – новый метод глобальной диагностики ионосферы в реальном времени. // Космические исследования. Т. 32. Вып.4-5. С. 142-149. 1994.
4. Гивишвили Г.В., Данилкин Н.П., Жбанков Г.А., Крашенинников И.В. Дистанционное зондирование ионосферы в декаметровом диапазоне с геостационарного ИСЗ.// Геомагнетизм и аэронавигация. М.: Наука. Т. 52. № 4. С. 519-524. 2012.
5. Часовитин Ю.К., Широчков А.В., Беспрозванная А.С. и др. Глобальная эмпирическая модель распределения электронной концентрации, температуры и эффективной частоты соударений электронов в ионосфере // Ионосферные исследования, 1988. № 44 М.: МГК, С. 6-13.
6. Беспрозванная А.С., Широчков А.В., Щука Т.И. Эмпирические модели электронной концентрации в полярной ионосфере при различных гелиогеофизических условиях // Прогнозирование ионосферы и условий распространения радиоволн. М.: Наука, 1985. С. 29-39.
7. Кица П.В., Крашенинников И.В., Лукашкин В.М. Моделирование многочастотного распространения

- КВ-сигналов в высоких широтах // Геомагнетизм и аэрономия, 1993. Т.33. №1. С. 158-162.
8. 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.
  9. Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Вертоградов В.Г., и др. Диагностика искусственно-возмущенной ионосферы с помощью современной техники зондирования. Электромагнитные волны и электронные системы. Выпуск: Проблемы космических исследований. 2010. Т.15. С. 22–29.
  10. Айзенберг Г.З., Белоусов С.П., Журбенко Э.М., Клигер Г.А., Курашов А.Г. Коротковолновые антенны. М.: "Радио и связь", 1985. 535 с.
  11. Гончаренко И.В. Антенны КВ и УКВ. М.: Радио, 2004. (в 4-х томах).
  12. Железняков В.В. Радиоизлучение Солнца и планет. М. С. 213, 1964.
  13. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Толмачева А.В. Поглощение радиоволн в ионосфере умеренных широт в течение цикла солнечной активности. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 25, №2, С. 251-254. 1975.
  14. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Коробков Ю.С. О спектре дискретных источников космического радиоизлучения Кассиопея А и Лебедь А в декаметровом диапазоне волн // Астрономический журнал, Т. 44, №5, С. 981-983, 1967.
  15. Ерухимов Л, М., Митякова Э.А., Мясников Е.Н. и др. О спектре искусственных ионосферных неоднородностей на разных высотах. // Изв. ВУЗов Радиофизика. Т. 20, №12, с. 1814-1820, 1977.
  16. Солодовников Г.К., Синельников В.М., Крохмальников Е.Б. Дистанционное зондирование Земли с использованием радиомаяковых космических аппаратов. М. Наука. 1988 г.

## MULTI-FREQUENCY RADIO TRANSLUCENCE OF ARCTIC IONOSPHERE

G. V. Givishvili, I.V. Krasheninnikov, V.A. Garbatsevich

A method of multi-frequency radio exposure of the ionosphere with the use of high-elliptic satellites as emitting points and some aspects of technical facilities of ground receiving stations in Arctic area is considered. The required energy potential of recording the cut-off frequency using both classical pulse signals and linearly frequency-modulated radiation are analyzed. Physical prerequisites for the implementation of the proposed method for diagnosing the state of the ionosphere are discussed.

**KEYWORDS:** IONOSPHERE, METHOD, RADIO TRANSLUCENCE, SATELLITE, BOARD TRANSMITTER, SURFACE RECEIVER