

О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС И ПРИЕМНИКА ДИП ДЛЯ МОНИТОРИНГА ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

В.В. Селезнев¹, П.А. Корнеев¹, А.Л. Гаврик², В.М. Смирнов²

¹ ООО "Метрон"

² Институт радиотехники и электроники РАН,
141190, Фрязино, М.О., пл. Введенского, 1,
E-mail: vsmirnov@ire.rssi.ru

Результаты измерений параметров когерентных сигналов, излучаемых со спутников глобальной навигационной системы Глонасс, демонстрируют работоспособность макета-образца дисперсионного ионосферного профилометра, предназначенного для определения параметров земной ионосферы по наблюдениям за сигналами спутников системы Глонасс. Данные измерений приведенной разности частот сигналов использованы для определения высотных профилей распределения коэффициента преломления. Анализ результатов показывает, что дисперсионный ионосферный профилометр может служить инструментом диагностики состояния ионосферы и обеспечивать высокоточную коррекцию влияния ионосферы Земли в радиусе до 1000 км от пункта наблюдения.

Введение

Создание высокоточных методов наблюдения за процессами, происходящими в атмосфере и ионосфере, является одной из важнейших задач в геофизике. Волновые движения, проникая в атмосферу и ионосферу, увеличивают свою интенсивность вследствие существенного уменьшения плотности нейтрального газа с ростом высоты. Слабые возмущения в пограничном слое атмосферы, вызываемые метеорологической активностью, антропогенными или сейсмогенными воздействиями, могут приводить к заметным волновым явлениям и изменениям концентрации плазмы в ионосфере, что в свою очередь приводит к увеличению погрешности определения координат наземных объектов. Для наблюдения таких возмущений перспективно использовать прецизионные радиополя, создаваемые навигационными спутниками системы Глонасс. Причем, для решения этой задачи целесообразно использовать измерения по фазе несущей на двух когерентных частотах.

Для обеспечения высокоточной геодезической привязки наземных пунктов необходима коррекция влияния ионосферы Земли на радиотехнические измерения параметров навигационных сигналов. Эта проблема особенно актуальна при использовании одночастотных навигационных приемников.

Совершенствование техники измерений и обработки навигационных сигналов привело к развитию новых методов высокоточной коррекции ионосферы Земли. Эти методы основаны на использовании алгоритмов решения обратной некорректной задачи радиопросвечивания ионосферы по трассе спутник-Земля и двухчастотной регистрации спутниковых сигналов [1-4]. Для реализации таких методов предлагается использовать российский дисперсионный приемник сигналов спутниковой навигационной системы (НС) Глонасс.

Дисперсионный ионосферный профилометр

Дисперсионный ионосферный профилометр (ДИП) является наземным радиотехническим комплексом. ДИП - это multifunctionальная система нового поколения, которая, в частности, позволяет измерять параметры двух когерентных радиосигналов НС Глонасс в реальном времени и получать необходимые для определения параметров ионосферы Земли данные альманаха НС Глонасс. Возможность определять практически реальное высотное распределение параметров ионосферы позволяет в перспективе осуществлять высокоточную коррекцию фазовых и дальномерных измерений, что в свою очередь обеспечит повышение точности определения координат наземных пунктов.

В настоящее время приемник ДИП обеспечивает одновременный прием и обработку сигналов 6 навигационных спутников системы Глонасс, излучающих сигналы на двух когерентных частотах, при этом каких-либо ограничений на входные сигналы нет, так как в каждом канале осуществляется независимый поиск, обнаружение и слежение за сигналом. Все гетеродинные частоты, включая частоту дискретизации,

когерентны частоте высокостабильного эталона, что дает возможность прецизионного измерения приведенных разностей фаз и частот когерентных сигналов.

Типовой вариант приемника содержит три конструктивно раздельных блока: блок питания, антенный блок (АБ) и блок прецизионных фазовых измерений, состоящий из аналоговой и цифровой частей приемника сигналов. Функциональная схема приемника ДИП представлена на рис. 1.

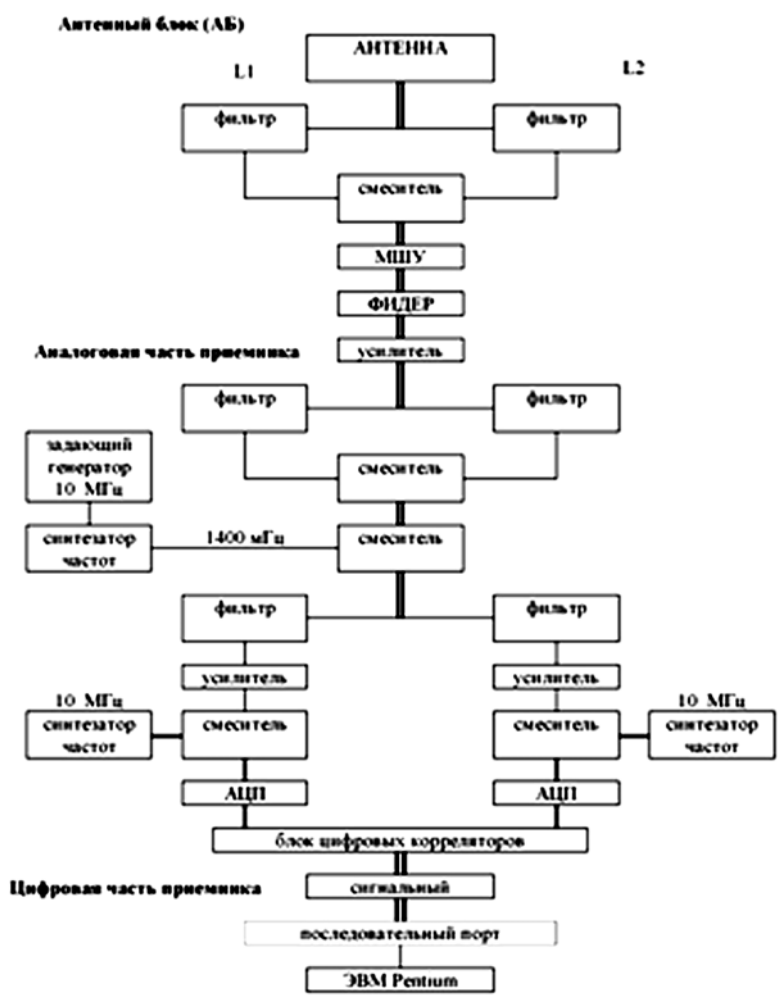


Рис. 1. Функциональная схема измерений параметров радиосигналов навигационных спутников Глонасс в дисперсионном ионосферном профилометре.

В антенном блоке совокупность сигналов от НС, принятых антенной, усиливается в предварительном малошумящем усилителе (МШУ), фильтруется во всей полосе несущих частот 1570 - 1625 МГц (L1) и 1240-1256 МГц (L2), а затем усиливается для компенсации потерь в фидере. Антенный блок подключается к приемнику радиочастотным кабелем длиной 25-50 м.

Блок прецизионных фазовых измерений конструктивно оформляется в виде устройства, в котором расположены модули аналоговой высокочастотной линейки, аналого-цифрового преобразователя АЦП, приемокоррелятора, вычислителя и интерфейсного устройства. Такое решение позволяет оперативно подключать ДИП к любой ЭВМ, работающей под управлением Windows NT/XP/2000, и записывать результаты измерений непосредственно на жесткий диск компьютера.

Высокочастотная линейка (аналоговая часть ДИП) осуществляет независимое гетеродинирование и фильтрацию двух сигналов промежуточной частоты. Затем каждый сигнал каналов L1 и L2 оцифровывается в АЦП.

Используемые гетеродинные частоты и частота дискретизации когерентны частоте эталона. В качестве эталона применяется высокостабильный генератор с номинальной частотой 10 МГц. Частотные формирования выбраны таким образом, что методические ошибки выделения приведенной разности фаз двух когерентных сигналов отсутствуют.

Многоразрядный код отсчетов сигнала с АЦП обрабатывается собственно цифровым приемником ДИП, основными элементами которого являются программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) и сигнальный процессор. В ПЛИС программируются синтезаторы отсчетов опорных сигналов несущей и

символьной частот, дискриминаторы соответствующих каналов, фазовые детекторы и демодуляторы телеметрии (ТМ), канал выделения информации. Квадратурные компоненты сигналов с ПЛИС обрабатываются сигнальным процессором. В сигнальном процессоре осуществляется начальная загрузка ПЛИС и реализуются соответствующие алгоритмы обработки сигнала: обнаружение и оценивание его параметров (формирование оценок частот несущих, измерение фаз и амплитуд сигналов и т.п.), буферизация выделенных информационных данных и интерфейс с внешней ЭВМ.

Информационные кадры, содержащие текущий номер кадра и массив данных выделенной информации (коды частот несущих, отношения сигнал/шум, индикация захвата систем фазовой автоподстройки (ФАП) по несущей и символам, другая необходимая информация), передаются в согласованном формате в ЭВМ через последовательный порт. Частота измерений параметров сигналов определяется пользователем и составляет обычно 1 Гц, но при необходимости может быть увеличена до 10-50 Гц (максимальная частота определяется характеристиками ЭВМ: скоростью приема и записи информации на жесткий диск компьютера).

Аппаратные средства ДИП поддерживаются разработанным математическим обеспечением (МО). В состав МО входят программа-оболочка, файлы прошивок ПЛИС и программы сигнального процессора обработки сигнала. Для обеспечения возможности проведения автономных комплексных проверок разработана тестовая прошивка ПЛИС со встроенным имитатором модулированного сигнала на номинальной частоте, который в смеси с шумами комплекса обеспечивает необходимый пороговый энергетический потенциал. По спектральной плотности шума принимается решение об исправности линейного тракта, а по выделенной тестовой информации и по параметрам измерений принимается решение об исправности цифровой части тракта обработки сигнала.

В начале сеанса измерений запускается программа-оболочка, в функции которой входит управление системой и диагностика состояния. Все процедуры обмена информацией и управления осуществляются в реальном времени без остановки процесса обработки сигналов в ДИП. Запись информации является непрерывной, она может продолжаться в течение нескольких суток, поэтому данные записываются в последовательно создаваемые файлы ограниченного объема, которые можно скопировать или начать обрабатывать на этом же компьютере.

Результаты применения ДИП для мониторинга состояния ионосферы Земли

Дисперсионный ионосферный профилометр регистрирует фазы Φ_L сигналов на двух когерентных частотах поддиапазонов L_1 и L_2 ($L_1 > L_2$). Для определения влияния ионосферы на основании этих данных формируется приведенная разность фаз двух когерентных сигналов:

$$\Delta\Phi(t) = \Phi_{L_1}(t) - \frac{L_1}{L_2} \Phi_{L_2}(t)$$

Такая схема регистрации эквивалентна использованию дальномерных измерений. Однако в случае фазовых измерений существует проблема определения начальной фазы Φ_0 каждого сигнала. Эта проблема не позволяет в данном приемнике использовать в прямом виде фазовые измерения, так как значения разности фаз можно получить только с точностью до некоторой неизвестной постоянной $\Delta\Phi_0(t)$:

$$\Delta\Phi_I(t) = \Delta\Phi(t) + \Delta\Phi_0(t)$$

При проведении высокоточных измерений это требует разработки методики фазовой калибровки. Учитывая то обстоятельство, что $\Delta\Phi_0(t) = const$, можно использовать приращения приведенной разности фаз на временном интервале наблюдений Δt . Это дает возможность определить изменение приведенной разности частот ΔF сигналов, обусловленное влиянием ионосферы, и избежать в этом случае необходимости определения фазовой неопределенности $\Delta\Phi_0(t)$:

$$\Delta F(t) = \frac{\Delta\Phi_I(t + \Delta t) - \Delta\Phi_I(t)}{2\pi\Delta t} = \frac{\Delta\Phi(t + \Delta t) - \Delta\Phi(t)}{2\pi\Delta t}$$

Данное соотношение уже не содержит фазовых неопределенностей и может быть использовано для определения высотного распределения электронной концентрации ионосферы Земли.

На рис. 2 и 3 в качестве примера представлены результаты измерений параметров двух когерентных сигналов НС Глонасс в одном из сеансов наблюдений, полученные с помощью ДИП, установленного в Институте радиотехники и электроники РАН, г. Фрязино. Примерные координаты пункта расположения при-

емника: 55°58' с.ш., 38°02' в.д. Измерения проводились в дневное время суток с 8 до 20 часов, в сеансах измерений одновременно наблюдалось от 1 до 6 спутников. В центральной части обоих рисунков (рис. 2в, 3в) показано изменение угла места в процессе слежения за спутниками №34 и №36, осью абсцисс является текущее местное время проведения измерений.

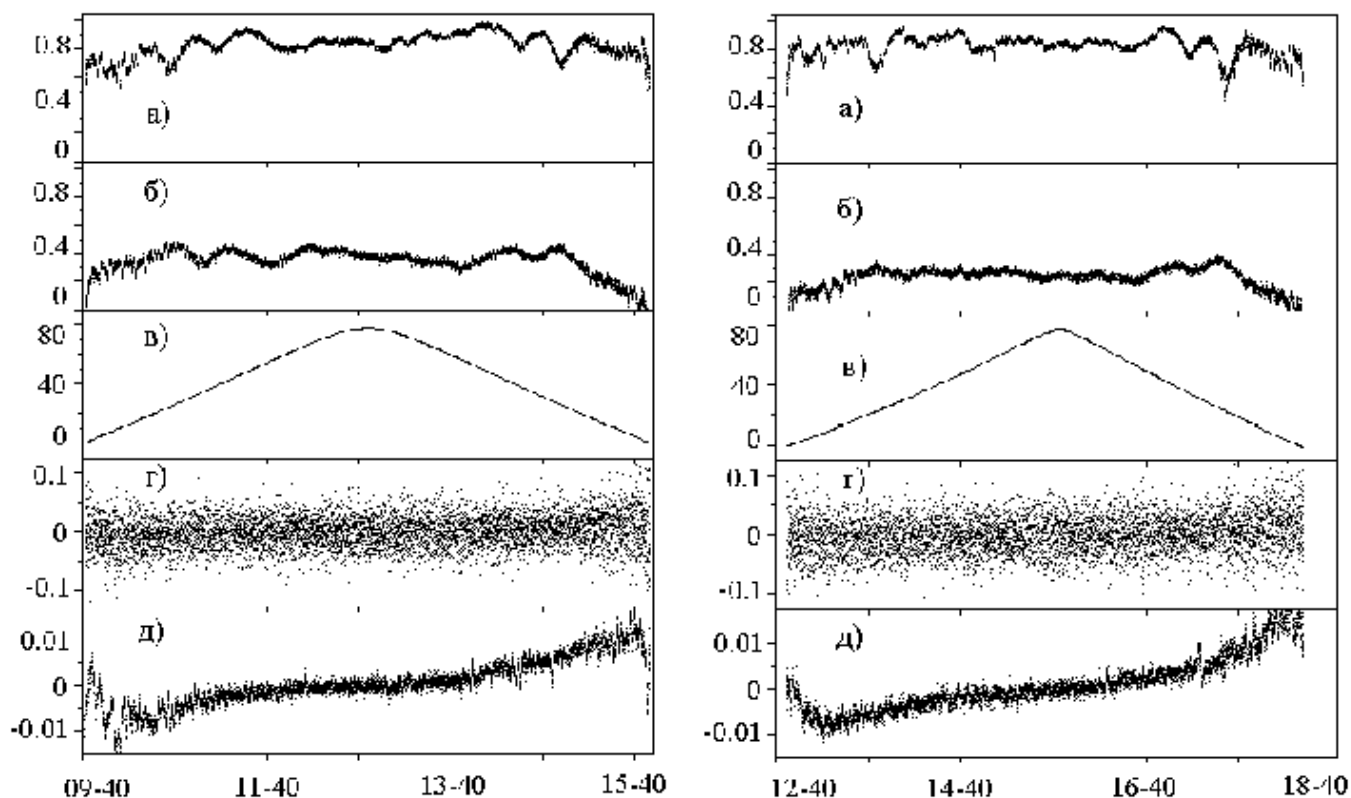


Рис. 2, 3. Результаты измерений параметров двух когерентных сигналов для спутника №34 (а и б - нормированные вариации амплитуды сигналов $A_1(t)$ и $A_2(t)$, в - изменение угла места, г - вариации приведенной разности частот сигналов $\Delta F(t)$ (частота выборки 1сек), д - результаты усреднения этих данных на интервале времени 30 сек).

На рис. 2 а, б представлены вариации амплитуды сигналов $A_1(t)$ и $A_2(t)$, нормированные на выбранное значение A_0 , двух когерентных поддиапазонов L_1 (рис. 2 а) и L_2 (рис. 2 б), из которых видно, что захват обоих сигналов и начало измерений их параметров произошли в 9 час 40мин 20 сек, когда угол места составлял $0,1^{\circ}$. С ростом угла места спутника 34 амплитуда сигнала $A_1(t)$ (рис. 2 а) выросла до значения 0,8, а амплитуда сигнала $A_2(t)$ (рис. 2б) выросла до значения 0,4. Относительно этих уровней далее наблюдались вариации, обусловленные как диаграммой направленности антенны, так и влиянием ионосферы и атмосферы Земли. После захода спутника за горизонт, когда угол места оказался меньше 0° , слежение за сигналами прекратилось.

Аналогичная картина наблюдалась и при слежении за спутником №36: на рис. 3 а, б представлены вариации амплитуды сигналов $A_1(t)$ и $A_2(t)$, нормированные на значение A_0 , из которых видно, что захват обоих сигналов и начало измерений их параметров произошли в 12 час 45 мин 05сек, когда угол места составлял $0,1^{\circ}$. С ростом угла места амплитуда сигнала $A_1(t)$ (рис. 3 а) выросла до значения 0,8, а амплитуда сигнала $A_2(t)$ (рис. 3 б) выросла до значения 0,3. Относительно этих уровней далее также наблюдались вариации, обусловленные как диаграммой направленности антенны, так и влиянием ионосферы и атмосферы Земли. Слежение за сигналами спутника №36 также прекратилось после его захода за горизонт, когда угол места оказался меньше 0° .

На основе этих данных можно сделать вывод о том, что ДИП позволяет вести многочасовые наблюдения за сигналами нескольких НС Глонасс с момента их появления над горизонтом до момента захода спутников за горизонт.

На рис. 2 г, д представлены вариации приведенной разности частот сигналов $\Delta F(t)$, измеренные в процессе наблюдения за спутником №34 с частотой выборки 1сек (рис. 2 г) и результаты усреднения этих данных на интервале времени 30 сек (рис. 2 д). Из рис. 2 г видно, что флуктуации $\Delta F(t)$ относительно нулевого уровня не превышают значений 0,015 Гц, причем наибольшие флуктуации наблюдаются в начале и в конце сеанса, когда угол места меньше 10° . На рис. 2г трудно выявить наличие или отсутствие регулярных трендов $\Delta F(t)$. Для того, чтобы продемонстрировать регулярные изменения $\Delta F(t)$, обусловленные изменением интегральной электрон-

ной концентрации на пути распространения радиоволн от спутника до ДИП, усредним измеренные данные методом скользящего среднего на интервале 30 сек. Результаты такого усреднения представлены на рис. 2д, из которого четко видны вариации $\Delta F(t)$, обусловленные ионосферой Земли. При малых углах места ($<20^\circ$) вариации $\Delta F(t)$ могут достигать значений 0,015 Гц. Их природа требует отдельного анализа состояния ионосферы. При больших углах места ($>20^\circ$) наблюдается закономерное увеличение $\Delta F(t)$ от -0,008 Гц до +0,008 Гц, обусловленное геометрией радиопросвечивания ионосферы Земли с помощью околоземного спутника.

Аналогичная картина наблюдалась и при слежении за спутником №36: на рис. 3 г, д представлены вариации приведенной разности частот сигналов $\Delta F(t)$, измеренные в процессе наблюдения за спутником №36 с частотой выборки 1 сек (рис. 3 г) и результаты усреднения этих данных на интервале времени 30 сек (рис. 3 д). Из рис. 3 г видно, что флуктуации $\Delta F(t)$ относительно нулевого уровня также не превышают значений 0,015 Гц, причем наибольшие флуктуации наблюдаются также в начале и в конце сеанса, когда угол места меньше 10° . Результаты усреднения данных на интервале 30 сек представлены на рис. 3д, из которого четко видны вариации $\Delta F(t)$, обусловленные ионосферой Земли. При малых углах места ($<20^\circ$) вариации $\Delta F(t)$ существенно отличаются от измерений, представленных на рис. 2д, а при больших углах места ($>20^\circ$) наблюдается аналогичное закономерное увеличение $\Delta F(t)$ от -0,008 Гц до +0,008 Гц, обусловленное геометрией радиопросвечивания ионосферы Земли с помощью околоземного спутника.

Среднеквадратическая погрешность данных измерений относительно аппроксимации их полиномом 6-й степени составляет не более 0,0005 - 0,001 Гц. В зависимости от зенитного угла наблюдения это составляет не более 10 - 20 % от значения частоты ΔF в данной точке наблюдения. Такая точность определения частоты сигнала позволяет использовать получаемые ДИПом данные измерений приведенной разности частот сигналов навигационной спутниковой системы Глонасс для определения высотного распределения электронной концентрации ионосферы Земли.

Восстановление высотных профилей ионосферы осуществлялось по измерениям приращения частоты сигналов. Интегральное уравнение радиопросвечивания ионосферы в этом случае записывается в следующем виде [1]:

$$\Delta f(t) = \frac{4,04 \cdot 10^3}{f_2 c} \frac{a^2 \sin 2\vartheta}{2} \frac{d\vartheta}{dt} \int \frac{N(z)(a+z)dz}{[(a+z)^2 - a^2 \sin^2 \vartheta]^{3/2}},$$

где c - скорость света, a - радиус Земли в месте расположения приемника, ϑ - зенитный угол наблюдения, $\frac{d\vartheta}{dt}$ - скорость изменения зенитного угла наблюдения, $f_2 = 1246 + 0,4375 \cdot k$ - частота в МГц, k - номер частотной литеры (идентифицирует номер спутника).

Скорость изменения зенитного угла наблюдения $\frac{d\vartheta}{dt}$ изменялась в пределах не более $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ рад/с.

Максимальное значение частоты не превышало 0,05 Гц.

Значение приращения измеряемой частоты за счет влияния ионосферы Земли определялось по формуле

$$\Delta f = \frac{1125}{2^{30}} (9F_2 + 7F_1),$$

где F_2 и F_1 - значения приращения фазы на односекундном интервале измерений. Числовые коэффициенты обусловлены спецификой дискретного представления измеряемого сигнала в приемнике ДИП.

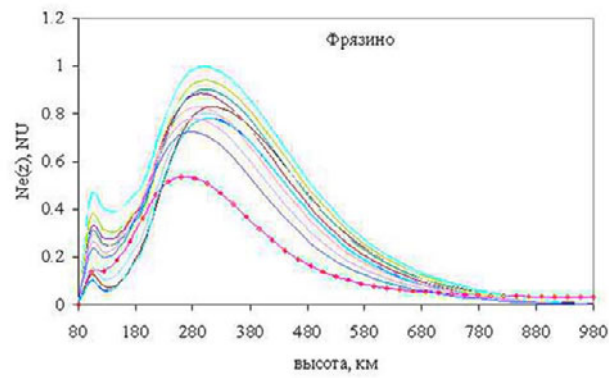
В качестве примера рассмотрим результаты обработки данных ДИП: в течение дневного сеанса наблюдений от 9 до 16 час московского времени (5-12 час UT) на координатной сетке наблюдений 24-51° в.д. и 52-63° с.ш. были получены высотные профили электронной концентрации. Результаты восстановления высотных профилей и их пространственно-временное представление для одного из спутников показаны на рис. 4. На следующем рис. 5 показаны изменения значения максимума электронной концентрации и высоты F2-слоя ионосферы в течение всего сеанса измерений. Ход $N_{e \max}$ и HF2 подвержены сильным вариациям, которые обусловлены также и тем, что спутники наблюдались одновременно в разных зонах видимости.

Таким образом, результаты выполненных измерений продемонстрировали работоспособность макета-образца дисперсионного приемника, предназначенного для определения параметров ионосферы по наблюдениям спутников глобальной навигационной системы Глонасс. По полученным данным измерений приведенной разности частот сигналов определены высотные профили распределения коэффициента преломления. Анализ результатов показал, что дисперсионный приемник может служить инструментом диагностики состояния ионосферы и обеспечивать высокоточную коррекцию влияния ионосферы Земли в радиусе до 1000 км от пункта расположения ДИП. Для верификации полученных данных и определения истинной точности измерений приведенной разности частот необходимо провести сопоставление с данными других независимых измерений. В дальнейшем этот прибор может стать одним из основных элементов аппаратно-программного комплекса радиоголографического мониторинга окружающей среды сигналами спутников навигационной орбитальной группировки Глонасс. К тому же, приемник ДИП не решает навигационную задачу и, следовательно, не подпадает под возможные ограничения.

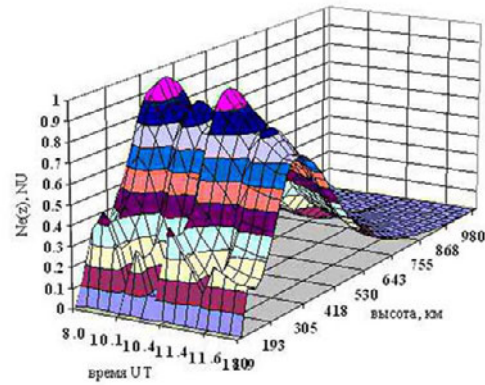
Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 04-05-08045-офи_a и гранта РФФИ 04-05-64207.

Литература

1. Андрианов В.А., Смирнов В.М. Определение высотного профиля электронной концентрации ионосферы Земли по двухчастотным измерениям радиосигналов искусственных спутников Земли. //Радиотехника и электроника, 1993, т.38. №7, с. 1326.
2. Андрианов В.А., Горобец В.П., Кораблев Е.В., Смирнов В.М. Методы коррекции атмосферной рефракции в космической геодезии и навигации. //Геодезия и картография, 1993, № 12, с. 20.
3. Андрианов В.А., Арманд Н.А., Мосин Е.Л., Смирнов В.М. Применение радиосигналов спутниковой навигационной системы для зондирования ионосферы Земли. Препринт ИРЭ РАН, 1995, №5(605), 24 с.
4. Андрианов В.А., Мосин Е.Л., Смирнов В.М. Определение регулярных вариаций $F2$ - области ионосферы Земли по измерениям параметров сигналов навигационных спутников. // Исследование Земли из космоса, 2000, №1, с. 15.

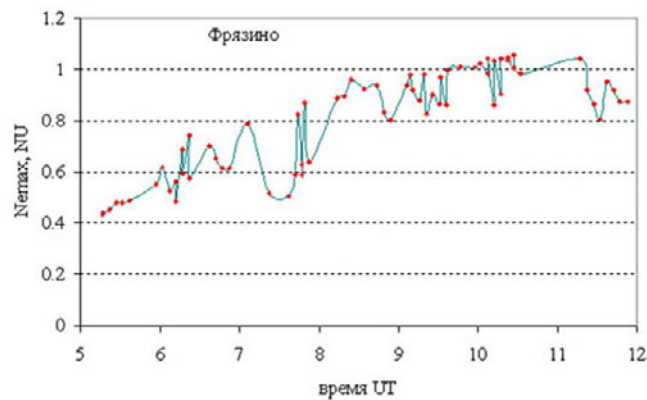


а)

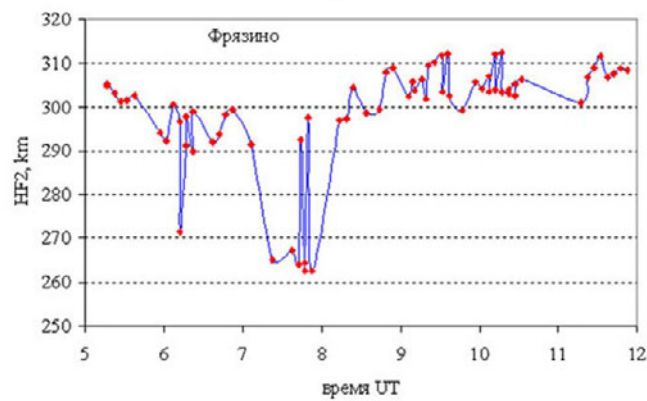


б)

Рис. 4. а) Высотные профили электронной концентрации и их б) пространственно-временное представление



а)



б)

Рис. 5. Поведение значений максимума электронной концентрации а) и его высоты б) в течение сеанса наблюдений.