

УДК 550.388.2

Н. М. САЛИХОВ, В. М. СОМСИКОВ

(ДТОО «Институт ионосферы» АО «Национальный центр
космических исследований и технологий», г. Алматы)

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ДОПЛЕРОВСКОГО СДВИГА ЧАСТОТЫ ИОНОСФЕРНЫХ РАДИОСИГНАЛОВ НАД ОЧАГАМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Аннотация. Создан аппаратно-программный комплекс, позволяющий регистрировать Доплеровский сдвиг частоты радиосигналов, отраженных от ионосферы, над предполагаемыми очагами землетрясений. Аппаратная часть комплекса основана на принципе синхронно-фазового детектора, в основе которого заложена работа петли фазовой автоподстройки частоты. Программная часть комплекса представляет собой специально написанные программы, предназначенные для автоматизации процессов измерения доплеровских сдвигов частот, хранения данных и их визуализации. С помощью созданного аппаратно-программного комплекса были зарегистрированы аномалии в записях доплеровских сдвигов частот накануне и во время землетрясения магнитудой $M=4,3$, произошедшего на территории Киргизии 11.09.2013 года в 350 км от точки отражения радиоволны в ионосфере.

Ключевые слова: ионосфера, доплеровский сдвиг частоты, землетрясение.

Тірек сөздер: ионосфера, жиіліктер доплерлік шетке жылжулары, жер сілкінісі.

Keywords: ionosphere, Doppler shift frequency, earthquake.

Введение. Одним из эффективных методов контроля состояния ионосферы над очагами землетрясений является метод регистрации доплеровского сдвига частоты (ДСЧ) коротковолновых радиосигналов с непрерывной квазимонохроматической несущей на слабонаклонных радиотрассах. Суть метода заключается в том, что при распространении радиоволн через ионосферу, благодаря изменчивости во времени электронной концентрации, происходит изменение частоты радиоволны, которое и называется эффектом Доплера. При возрастании скорости изменения электронной концентрации в ионосфере пропорционально увеличивается наблюдаемая величина ДСЧ [1].

Для регистрации динамических процессов в ионосфере, обусловленных процессами в литосфере Земли, программно-аппаратный комплекс ДСЧ должен обеспечить круглосуточный режим записи ДСЧ с высоким уровнем автоматизации измерений. Это требование определяется тем, что временные масштабы волновых процессов в ионосфере очень широки - от десятков секунд до нескольких дней и даже месяцев, ионосферные радиосигналы в большинстве случаев бывают многолучевыми, а землетрясения имеют случайный временной характер.

Вышеперечисленным критериям соответствует метод измерения ДСЧ $fd(t)$, в основе которого лежит принцип работы петли фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Основными достоинствами метода с применением петли ФАПЧ являются сравнительная простота его реализации, высокая чувствительность к малым возмущениям и разрешению по времени, возможность работы в условиях многолучевости, возникающей вследствие пространственно-временной неоднородности ионосферы и особенностей распространения радиоволн коротковолнового диапазона [2,3].

На рисунке 1 представлена функциональная схема приемной части аппаратно-программного комплекса для измерения ДСЧ радиосигнала, отраженного от ионосферы.

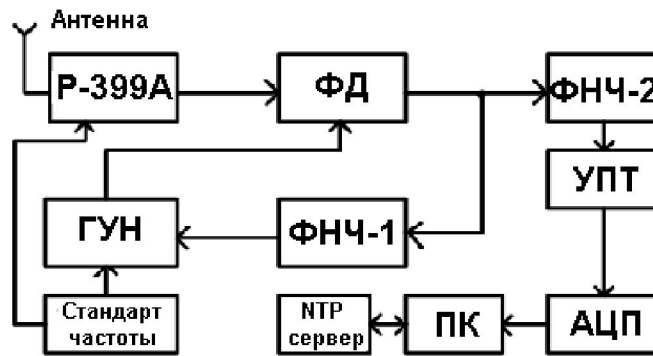


Рисунок 1 – Функциональная схема приемной части аппаратно-программного комплекса для измерения доплеровского сдвига частоты радиосигнала, отраженного от ионосферы

Сигнал от радиопередатчика со стабильностью не хуже $\pm 10^{-9}f$, отразившись от ионосферы, принимается антенной и поступает на радиоприемное устройство Р-399А и далее на фазовый детектор (ФД). На другой вход ФД подается сигнал от генератора управляемого напряжением (ГУН). Сигнал с выхода ФД в виде напряжения постоянного тока воздействует на ГУН и подстраивает его под частоту принимаемого сигнала, причем изменение напряжения с выхода ФД пропорционально ДСЧ. Сигнал, пройдя ФНЧ-2 и усилитель постоянного тока (УПТ), оцифровывается с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) типа Е-154 (Российской фирмы L-card) и в виде файла сохраняется в памяти персонального компьютера (ПК). Синхронизация бортового времени компьютера осуществляется по сети Интернет от NTP-сервера атомного стандарта частоты и времени. Для организации съема данных с АЦП, автоматизации процессов измерения, хранения данных в ПК и их визуализации написана специальная компьютерная программа.

Блок ФД представляет собой электронную схему, специально разработанную и изготовленную в Институте ионосферы, состоящую из усилителей сигналов с частотой 215 кГц, формирователей импульсов на основе туннельных диодов, импульсного фазового детектора, пороговых устройств и согласующих электронных усилителей. Калибровка приемной доплеровской установки проведена с помощью синтезатора частот Ч6-31. Также измерена нелинейность преобразования частоты с помощью петли ФАПЧ в величину напряжения при скачкообразной перестройке частоты эталонного генератора.

Измерения проводили следующим образом. На вход радиоприемного устройства Р-399А подавали высокостабильный сигнал, который перестраивали с шагом 0,5 Гц в интервале частот 5 Гц. Далее построили график зависимости изменения частоты от количества перестроек (N). В результате получили реальную характеристику преобразования. График реальной характеристики аппроксимировали прямой линией, соответствующей уравнению $Y=1,0074 \cdot X-3,3974$. Результаты расчета идеальной характеристики приведены на рисунке 2. На рисунке видим, что при сравнении идеальной характеристики преобразования с реальной характеристикой наблюдается нелинейность.



Рисунок 2 – Сравнение идеальной характеристики преобразования петли ФАПЧ доплеровской установки с реальной характеристикой

В полосе удержания петли ФАПЧ (15 Гц) нелинейность реальной характеристики составила менее одного процента и имела величину 0,46%, что вполне достаточно для качественного измерения ДСЧ радиосигнала, отраженного от ионосферы.

На основе аппаратно-программного комплекса измерений ДСЧ весной 2013 года на Радиополигоне Орбита (в 20 км от г. Алматы) был начат поиск ионосферных откликов, связанных с литосферными процессами Земли. Для регулярных измерений принимали сигнал вещательного радиопередатчика, находящегося на территории Киргизии (поселок Красная речка) в 164 км от Радиополигона Орбита. Радиостанция работала на частоте 4795 кГц ежедневно, но не полные сутки – с 0 часов до 18 часов по времени GMT.

На рисунке 3 приведена запись реального ионосферного сигнала $f_d(t)$. На графике в вариациях доплеровской частоты хорошо видны фоновые колебания с периодами среднемасштабных волновых возмущений и отчетливо прослеживаются восходно-заходные эффекты [4]. Это свидетельствует о достаточно хорошем качестве созданного аппаратно-программного комплекса регистрации ДСЧ.



Рисунок 3 – Пример записи вариаций доплеровского сдвига частоты. По оси X – время от начала суток 02.09.2013 г. по времени GMT в секундах

При проведении регулярных измерений ДСЧ на радиотрассе пос. Красная речка-Радиополигон Орбита было зарегистрировано возмущение в вариациях ДСЧ во время землетрясения произошедшего (согласно оперативным данным www.kndc.kz) 11 сентября 2013 года в 03ч 2мин 15с по времени GMT в Киргизии, в 412 км к юго-западу от г. Алматы магнитудой $M=4.3$. Координаты эпицентра: 40.88 градуса северной широты, 72.97 градусов восточной долготы, энергетический класс=9.6. Расстояние от эпицентра землетрясения до точки отражения радиоволны в ионосфере составило около 350 км.

Отклик ионосферы на землетрясение в записях $f_d(t)$ представлен на рисунке 4, где вертикальной стрелкой обозначено время землетрясения. На графике виден всплеск ДСЧ длительностью около 15 мин, возникший через 12 минут после землетрясения. Подобные результаты были получены в Европе при регистрации ДСЧ сейсмической волны, пришедшей 11 марта 2011г. от эпицентра землетрясения магнитудой $M=9$ (о. Хонсю, Япония, 9000 км) [5].

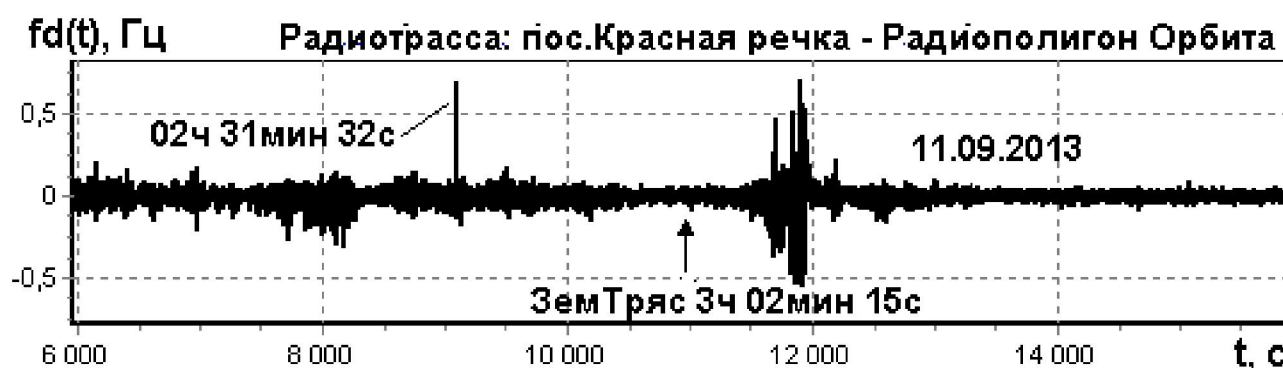


Рисунок 4 - Отклик землетрясения в ДСЧ радиосигнала, отраженного от ионосферы. По оси X – время от начала суток 11.09.2013 г. по времени GMT в секундах

Наибольший интерес представляет положительный всплеск, появившийся за 1757с до землетрясения (в 02ч 31мин 32с), который можно рассматривать, как аномалию в записях ДСЧ перед данным землетрясением. В развернутом виде аномальный положительный всплеск доплеровской частоты с большим разрешением по времени приведен на рисунке 5.

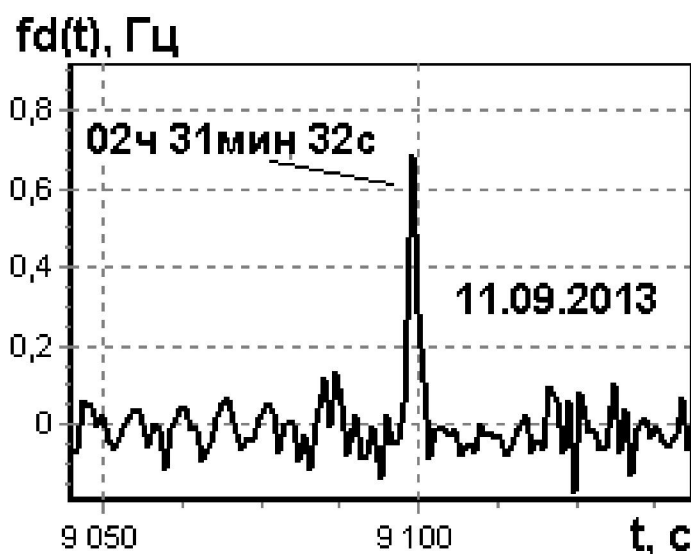


Рисунок 5 – Аномальный всплеск в ДСЧ радиосигнала, отраженного от ионосферы, накануне землетрясения. По оси X - время от начала суток 11.09.2013 г. по времени GMT в секундах

Видно, что всплеск ДСЧ представляет собой не одиночный выброс в виде помехи, а достаточно продолжительный отклик с длительностью около 24 секунд. Возможно, наблюдаемый сдвиг доплеровской частоты отражает подготовительные процессы в литосфере земли перед сейсмическим событием ($M=4.3$), произошедшим 11.09.2013 года.

Заключение.

Создан аппаратно-программный комплекс, позволяющий регистрировать доплеровские частоты радиосигналов, отраженных от ионосферы над предполагаемыми очагами землетрясений. Написаны программы, обеспечивающие автоматизацию процессов измерения доплеровских частот, хранение данных, их визуализацию и анализ. С помощью аппаратно-программного комплекса были зарегистрированы эффекты в ионосфере накануне и во время землетрясения, произошедшего 11.09.2013 года магнитудой $M=4.3$ на территории Киргизии 11.09.2013 года в 350 км от точки отражения радиоволны в ионосфере.

Радиотрасса пос. Красная речка – Радиополигон Орбита проходит над местностью, где значимые землетрясения магнитудой $M > 4$ бывают редко. Поэтому необходима организация радиотрасс с использованием высокостабильного радиопередатчика круглосуточного действия над очагами, представляющих наибольшую сейсмическую опасность для мегаполиса Алматы, таких как Кеминский и Верненский очаги землетрясений. В связи с этим, в настоящее время в Институте ионосферы ведутся работы по созданию передающего радиоцентра, способного передавать стабильный радиосигнал, предназначенный для высокоточных доплеровских измерений. Накопление статистических данных по доплеровским измерениям в дальнейшей перспективе позволит разработать автоматизированную систему для оповещения о сильных землетрясениях.

Работа выполнена по РБП 002 «Прикладные научные исследования в области космической деятельности» в рамках проекта «Исследовать взаимосвязь динамических процессов в атмосфере с процессами естественного и антропогенного происхождения на Земле».

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Девис К. Радиоволны в ионосфере. М. Изд-во «Мир». – 1973. – 501 с.
- 2 Салихов Н.М. Отклик ионосферы на акустические источники возмущений естественного и искусственного происхождения. Канд. дисс. Алма-Ата. – 1984. – 165 с.
- 3 Краснов В.М., Салихов Н.М., Жумабаев Б.Т. История и перспективы доплеровского метода исследования в Казахстане. Геодинамика и солнечно-земные связи. Алматы. – 2013. – С. 220-230.
- 4 Сомсиков В.М. Солнечный терминатор и динамические явления в атмосфере. Геомагнетизм и аэронавтика. – 2011. V. 51. – N. 6. – P. 723-735.
- 5 Chum J., Hruska F., Zednik J., and Lastovicka J. Ionospheric disturbances (infrasound waves) over the Czech Republic excited by the 2011 Tohoku earthquake. J. Geophys. Res. – V. 117, A08319, doi:10.1029/2012JA017767. – 2012.

REFERENCES

- 1 Davies K. Radio waves in the ionosphere. – M. – 1973. – 501 p.
- 2 Salikhov N.M. Ionospheric response to the acoustic disturbances sources of natural and artificial origin. Phd. disser. Almaty. – 1984. – 165 p.
- 3 Krasnov V.M., Salihov N.M., Zhumabaev B.T. Retrospectives and perspectives of the Doppler method researches in Kazakhstan. Geodynamics and solar terrestrial relations. Almaty. – 2013. – P. 220-230.
- 4 Somsikov V.M. Solar terminator and dynamic phenomena in the atmosphere. Geomagnetism and Aeronomy. – 2011. – V. 51. – N. 6. – P.723-735.
- 5 Chum J., Hruska F., Zednik J., and Lastovicka J. Ionospheric disturbances (infrasound waves) over the Czech Republic excited by the 2011 Tohoku earthquake. J. Geophys. Res. – V. 117. – A08319, doi:10.1029/2012JA017767. – 2012.

Резюме

Н. М. Салихов, В. М. Сомсиков

(«Ионосфера институты» ЕЖШС «Ұлттық ғарыштық зерттеулер мен технологиялар орталығы» АҚ, Алматы қ-сы)

ЖЕР СІЛКІНІСТЕРІ ОШАҚТАРЫНЫҢ ҮСТІНДЕ ИОНОСФЕРАЛЫҚ РАДИОСИГНАЛДАР ЖИІЛІГІНІҢ ДОПЛЕРЛІК ШЕТКЕ ЖЫЛЖУЫН ТІРКЕУ ҮШІН АППАРАТТЫҚ-БАҒДАРЛАМАЛЫҚ КЕШЕН

Жер сілкіністері болжалды ошақтарының үстінде, ионосферадан шағылысқан радиосигналдар жиілігінің доплерлік шетке жылжуын тіркеуге мүмкіндік беретін аппараттық-бағдарламалық кешені жасалған. Кешеннің аппараттық бөлігі, негізінде жиіліктің фазалық автореттеу бұралаңының жұмысы орын алған, синхрондық-фазалық детектор қағидасына негізделген. Кешеннің бағдарламалық бөлігі мәліметтерді сақтау және оларды бейнелендіру, жиіліктер доплерлік шетке жылжуларын өлшеуі процестерін автоматтандыру үшін арнаулы ойланып жазылған бағдарламалары болып табылады. Қырғызстан аумағында 11.09.2013 жылы ионосферада радиотолқын шағылысының нүктесінен 350 шақырымда болған жер сілкінісінің алдыңғы күнінде және уақытында жиіліктер доплерлік шетке

жылжуларының жазбаларында магнитудасы $M=4,3$ болғанда, жасалған аппараттық-бағдарламалық кешені көмегімен аномалиялары тіркелген болған.

Тірек сөздер: ионосфера, жиіліктер доплерлік шетке жылжулары, жер сілкінісі.

Summary

N. M. Salikhov, V. M. Somsikov

(Institute of Ionosphere, National Center of Space Research and Technology, Almaty)

THE HARDWARE -SOFTWARE COMPLEX FOR THE REGISTRATION OF DOPPLER SHIFT FREQUENCIES OF IONOSPHERIC RADIOSIGNALS ABOVE THE EARTHQUAKE CENTER

It has been created a hardware-software complex that allows to record a Doppler shift frequencies of radiosignals, reflected from the ionosphere above the alleged of earthquake center. The hardware part of the complex based on the principle of a phase locked loop. The software part of the complex is a specially written software which designed for automated measurement of Doppler shift frequencies, for storage and visualization of data. By the hardware-software complex the anomalies in the Doppler shift frequencies were recorded before and during the earthquake ($m_b = 4.3$), which occurred in Kyrgyzstan 11.09.2013 at 350 km from the point of reflection of radiowaves in the ionosphere.

Keywords: ionosphere, Doppler shift frequency, earthquake.