

# МЕТОДЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

*Шкляник Е.И.*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Давыденко И.Н. – канд. тех. наук, доцент*

В предоставленной статье рассматривается фундаментальная проблема, важная как для научных, так и прикладных целей, а именно, исследование природы околоземного космического пространства. При её решении используют различные экспериментальные и модельные методы. С запуском космических аппаратов на околоземную орбиту начали развиваться спутниковые методы изучения окружающей среды. Цель данной работы – развитие теории и разработка технологии непрерывного мониторинга, предназначенных для исследования ионосферы и решения задач оперативного контроля высотного распределения и полной электронной концентрации ионосферы Земли с использованием радиосигналов спутниковых навигационных радиосистем в реальном масштабе времени.

В настоящее время для определения характеристик различных объектов используются радиофизические методы, основанные на решении обратных задач математической физики. Эти методы находят широкое применение при зондировании ионосферы Земли. Функции ионозонда могут выполнять многочастотные спутниковые системы, предназначенные для других целей.

Измерения параметров спутниковых сигналов в сочетании с методами математической обработки и моделирования нашли широкое применение в связи с внедрением в практику исследований современных вычислительных средств и методов экспериментальных исследований. Наличие штатных измерений радионавигационных параметров дает возможность использовать спутниковые радионавигационные системы как уже существующий, технически совершенный, надежный, широко распространенный и в этом смысле относительно дешевый инструмент получения диагностической информации об атмосфере Земли. В частности, они позволяют определять высотное распределение электронной концентрации ионосферы Земли с использованием специального математического аппарата решения так называемых некорректных обратных задач (без дополнительного зондирования с помощью спутниковых ионозондов и ионосферных станций или их редкого использования для сопоставления измерений в части высот, доступных ионосферным станциям).

Предложенные в [10-16] методы определения параметров ионосферы по данным спутниковых измерений дают возможность контролировать только интегральное содержание электронного распределения ионосферы Земли. Рассматриваемый в [3, 4] метод определения параметров земной ионосферы основан на использовании классической схемы радиопросвечивания спутник-спутник. Он позволяет определять высотное распределение электронной концентрации ионосферы Земли, но требует наличия одновременно двух спутников. Обеспечивая глобальность наблюдения за состоянием нижней части ионосферы Земли, данный метод не обладает высоким пространственным разрешением. Кроме того, геометрия эксперимента по затменной схеме радиопросвечивания спутник-спутник как правило такова, что получить высотное распределение ионосферы в данном месте и в данное время не всегда представляется возможным.

Глобальные спутниковые радионавигационные системы GPS и ГЛОНАСС дают уникальную возможность получения высотного профиля распределения электронной концентрации ионосферы Земли в подорбитальном пространстве космического аппарата для различных гелио- и геофизических условий в любое время суток и любой точке земной поверхности, включая океаны и моря, северный и южный полюса [1, 2, 6-7].

Использование навигационных систем для изучения и контроля состояния ионосферы представляет собой научно-технологический прорыв в области дистанционного зондирования верхней атмосферы и обладает глобальной перспективой, обусловленной большим количеством навигационных спутников и наземных пунктов наблюдения. Глобальные навигационные спутниковые системы можно использовать для изучения таких характеристик ионосферы, как интегральная электронная концентрация [9-11], профиль высотного распределения электронной концентрации [2, 6-7], ионосферные неоднородности, спорадический E-слой, активность авроральной области ионосферы [9], перенос крупномасштабных неоднородностей, воздействие искусственных возмущений на ионосферу, реально-временные и азимутально-временные вариации параметров максимума слоя F2.

Преимущества глобальных навигационных систем для мониторинга ионосферы Земли заключаются в следующем [5]:

- 1) возможность использования уже существующих спутниковых сигналов;
- 2) наличие хорошо развитой сети наземных пунктов международной геодезической службы (IGS - International Geodynamics Service) и опорных региональных пунктов (CORS - Continuously Operating Reference Stations);
- 3) применение для измерений стандартных двухчастотных навигационно-геодезических приемников;
- 4) интегральное электронное содержание ионосферы не зависит от предположений о магнитном поле Земли вплоть до высоты 20000 км;
- 5) данные двухчастотных измерений могут быть получены из многих источников, например, из баз данных IGS и CORS через Интернет;
- 6) данные измерений содержат информацию о всей толще ионосферы;
- 7) базы данных IGS и CORS содержат измерения разных типов приемников в едином формате RINEX (Receiver Independent Exchange);
- 8) влияние поглощения в ионосфере и магнитного поля Земли на параметры радиоволн можно не учитывать, так как номиналы излучаемых спутниками сигналов достаточно высоки.

Наземная навигационная сеть, насчитывающая в настоящее время свыше 1000 стационарных приемников GPS/ГЛОНАСС, данные которых представлены в Интернете, довольно плотно покрывает Северную Америку, Европу и гораздо хуже Азию. Меньше приемников на Тихом и Атлантическом океанах. Однако такое заполнение земной поверхности уже сегодня позволяет решать задачу глобального детектирования возмущений с невиданным ранее пространственным накоплением. Общедоступность международной геодезической сети, данные которой ежедневно выставляются на сайте в Интернете, позволяет проводить обработку методик детектирования эффектов воздействия на ионосферу различных факторов - как естественного, так и антропогенного происхождения.

Наличие незначительного числа наблюдательных пунктов на территории Беларуси и России не позволяет использовать для определения параметров ионосферы хорошо развитые в настоящее время методы компьютерной радиотомографии [8]. В такой ситуации метод радиопросвечивания на трассе спутник-Земля является практически единственно возможным средством, позволяющим одновременно определять высотные профили распределения электронной концентрации ионосферы на большей части её территории [1, 2, 6-7].

Поскольку наблюдения в сети проводятся непрерывно в различных точках земной поверхности, то получаемые с них данные измерений являются хорошей дополнительной, а часто и единственной информацией о динамике ионосферы. Эти измерения позволяют проводить исследования регулярных вариаций максимума электронной концентрации таких, как сезонные, суточные с выявлением различного рода трендов.

Методология исследований, основанная на решении обратных задач, является одним из новых направлений в изучении процессов, происходящих в ионосфере Земли. Преимущество методов, основанных на решении обратных задач распространения радиоволн в неоднородной атмосфере, заключается в том, что они позволяют проводить экспериментальные исследования непосредственно при эксплуатации спутниковых систем, предназначенных для решения других задач. Этот подход повышает информативность исследований и дает возможность проводить экспериментальные исследования более оперативно по сравнению с традиционными методами.

#### **Список использованных источников:**

- [1] Афраймович, Э.Л. Детектирование ионосферных возмущений естественного и антропогенного происхождения сигналами GPS / Э.Л. Афраймович, В.М. Смирнов //Сб. докл. XXI Всерос. науч. конф. Йошкар-Ола, 25-27 мая 2005г.- Йошкар-Ола: 2005.- Т.1.- С.46-52.
- [2] Альперт, Я. Л. Распространение радиоволн и ионосфера / Я.Л Альперт. -М.: АН СССР, 1960.-480 с.
- [3] Глобальные навигационные системы: тем. вып. /Труды Инст. инж. по электротехнике и радиоэлектронике.- 1983.- №10.- С.71.
- [4] Смирнов, В.М. Результаты применения спутникового мониторинга для расчета максимально применимых частот / В.М. Смирнов //Сб. тр. МГУЛ.-2000.- В.314.- С.104-110.
- [5] Андрианов, В.А. Зондирование ионосферы Земли с помощью спутниковых навигационных систем / В.А. Андрианов, Н.А. Арманд, Е.Л. Мосин, В.М. Смирнов //Электроника: Наука, технология, бизнес. 1997.-№2.- С.11-17.
- [6] Полное электронное содержание в авроральной и субавроральной ионосфере по данным радиопросвечивания навигационных ИСЗ / С.М Черняков и др. //Геомагнетизм и аэронавигация.- 1992.- Т.32.- №4.- С.94.
- [7] Wanninger, L.E. Determination of total electron content with GPS -Difficulties and their solution / L.E. Wanninger, E. Sardon, R. Warnant //Proc. of the Intern. Beacon Satellite Symp.- 1994. P.13.
- [8] Mannucci, A. A new method for monitoring the Earth's ionosphere total electron content using the GPS global network / A. Mannucci, B.D. Wilson, C.D. Edwards //Proc. of the ION GPS-93.- Ins. of Navigation, 1994.- P.1323-1332.
- [9] GPS and Ionosphere / A.J. Mannucci et al. //The Review of Radio Science. 1996-1999.- URSI, ed. by W. Ross Stone.- 1999.- P.625-665.
- [10] Исследование электронной концентрации ионосферы при помощи наземного приема радиосигналов, излучаемых с космических аппаратов / Г.Г. Гетманцев и др. // Радиофизика.- 1968.-Т.ii.- №5.-С.649.
- [11] Митяков, Н.А. Результаты наблюдений ИСЗ «Космос-1» и «Космос-2» в Крыму / Н.А. Митяков, Э.Е. Митякова, В.А. Череповецкий //Геомагнетизм и аэронавигация.- 1963.- Т.3.- №5.- С.816.
- [12] Carriott, O.K. The determination of ionospheric electron content and distribution from satellite observations / O.K. Carriott //J. Geophys. Res.-1960.-V.65.-№.4- P. 1139.

*57-я Научная Конференция Аспирантов, Магистрантов и Студентов БГУИР, 2021 г.*

*[13] Солодовников, Г.К. Дистанционное зондирование ионосферы Земли с использованием радиомаяков космических аппаратов / Г.К. Солодовников, В.М. Синельников, Е.Б. Крохмальников. М.: Наука, 1988.- 191 с.*

*[14] Wilson, B.D. Instrumental biases in ionospheric measurements derived from GPS data / B.D. Wilson, A.J. Mannucci //Proc. of ION GPS 93.- Ins. of Navigation, 1993.-P.1341.*

*[15] Davies, K. Recent progress in satellite radio beacon studies with particular emphasis on the ATS-6 radio beacon experiment / K. Davies // Space Sci. Rev.- 1980.- V.25.-P.357.*

*[16] Смирнов, В.М. Вариации ионосферы в период солнечного затмения по данным спутниковой навигационной системы GPS / В.М. Смирнов //Радиотехника. -2004.-№ 1 .-С.3 8-41.*