

04.3

Определение статистических параметров флуктуаций коэффициента преломления ионосферы по данным радиопередачи информации космос—Земля

© О.В. Горячкин, И.В. Маслов

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия
E-mail: oleg.goryachkin@gmail.com

Поступило в Редакцию 11 июля 2022 г.

В окончательной редакции 29 августа 2022 г.

Принято к публикации 15 сентября 2022 г.

Рассматривается задача восстановления ковариационной функции флуктуаций коэффициента преломления ионосферы на основе анализа случайных изменений частоты радиосигнала. Для решения задачи используется трансionoсферный сигнал радиопередачи информации, излучаемый с борта низкоорбитального космического аппарата и принимаемый стационарным пунктом приема. Описывается методика оценки параметров ионосферы по данным одного типового сеанса связи.

Ключевые слова: ионосфера, флуктуации коэффициента преломления, R-диапазон, масштаб неоднородностей.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.21.53710.19303

Как известно ионосферой называют ионизированную часть атмосферы Земли, существенно влияющую на распространение радиоволн. Ионосфера имеет сложную структуру по высоте и пространству. Обычно выделяют три основных слоя, расположенных на различных высотах: D , E и F ; последний в свою очередь делится на $F1$ и $F2$. Концентрация электронов, температура, высоты слоев и другие параметры ионосферы характеризуются значительными вариациями во времени и пространстве.

Развитие многих современных технологий радиолокации, навигации и связи требует знания текущих характеристик ионосферы и магнитосферы Земли. Кроме того, ионосфера взаимодействует с другими слоями атмосферы, а также с гидросферой, литосферой, криосферой, контроль состояния которых важен для многих направлений человеческой деятельности [1–3].

Создание системы глобального мониторинга параметров ионосферы — одна из актуальных задач современности. При этом вопрос определения размеров и концентрации ионосферных неоднородностей, особенно средне- и мелкомасштабных, является одним из наиболее трудных [3].

Начиная с 20-х годов прошлого века для изучения ионосферы было разработано большое число весьма эффективных методов: вертикальное, наклонное и возвратно-наклонное зондирование; метод измерения доплеровского сдвига частоты; метод некогерентного рассеяния радиоволн, трансionoсферное зондирование. Сравнительные характеристики данных методов широко освещались в литературе (см., например, [3]).

В частности, для проведения ионосферного зондирования с помощью космических аппаратов в России и за ру-

бежом пройден путь от одиночных космических аппаратов до космических систем комплексного мониторинга геофизических параметров околоземного пространства. Например, в ближайшем будущем планируется начало развертывания российской космической системы „Ионозонд“ в составе пяти специализированных космических аппаратов для наблюдений ионосферы и активности Солнца [4].

Для решения подобных задач могут быть использованы не только ионозонды, но и любые другие радиотехнические системы, использующие трансionoсферный радиосигнал. Наиболее эффективным на сегодня инструментом для попутного зондирования ионосферы являются космические системы радионавигации второго поколения, такие как GPS, ГЛОНАСС, Beidou, Galileo [4–6]. Помимо навигационных систем для трансionoсферного зондирования могут быть использованы сигналы космических радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли [7], систем связи борт—Земля [8]. Актуальность использования для мониторинга параметров ионосферы сигналов телекоммуникационных систем растет в последние годы в связи с ростом числа малых космических аппаратов (МКА) и наноспутников, а также с расширением географии наземных приемных пунктов.

Цель исследования — разработать методику определения статистических параметров флуктуаций коэффициента преломления ионосферы по данным информационного сеанса связи радиопередачи информации космос—Земля, расположенной на борту космического аппарата, а также провести апробацию методики на математических моделях и в натурном эксперименте.

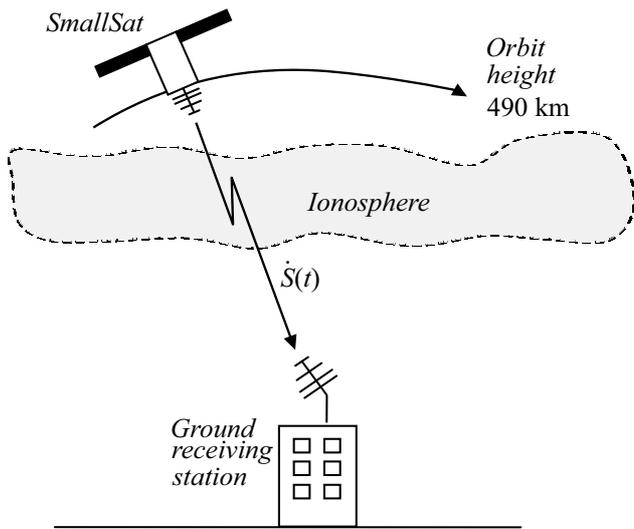


Рис. 1. Схема регистрации трансionoсферного сигнала радиолинии МКА.

В процессе сеанса связи бортовая аппаратура радиолинии излучает модулированный данными сигнал, который может быть принят в наземном пункте приема (НПП). На рис. 1 представлена соответствующая схема.

Предположим, что среда распространения сигнала изотропна, а сигнал радиолинии узкополосный. Тогда принимаемый квадратурный сигнал в приближении геометрической оптики может быть записан в виде

$$\dot{S}(t) = \dot{E}_0 \exp\left(j \frac{2\pi f_c}{c} \int_0^{R(t)} n(r, f_c) dr + \varphi_i(t)\right). \quad (1)$$

Здесь $n(r, f_c)$ — показатель преломления среды на трассе распространения, заданной вектором расстояния между НПП и космическим аппаратом $\mathbf{R}(t)$ и $|\mathbf{R}(t)| = R(t)$, $\varphi_i(t)$ — информационная составляющая при использовании фазовой модуляции, f_c — несущая частота, c — скорость света. Запишем коэффициент преломления атмосферы в виде суммы детерминированной (регулярной) и случайной (флуктуационной) компонент в предположении, что $\mathbf{M}\{n(r, f)\} = n_{reg}(r, f)$:

$$n(r, f) = n_{reg}(r, f) + n_\varphi(r, f). \quad (2)$$

Систему принятых допущений можно описать следующим образом. В общем случае $n(r, f)$ зависит от времени, что связано с динамикой турбулентных слоев. Однако на временных интервалах работы космических систем связи (не более нескольких минут) случайное поле коэффициента преломления будем считать „замерзшим“. Кроме того, будем считать, что флуктуации коэффициента преломления на рассматриваемых интервалах времени регистрации трансionoсферных сигналов определяются в основном средне- и мелкомасштабными вариациями электронной плотности вдоль трассы

полета космического аппарата, при этом влияние тропосферных флуктуаций в рассматриваемых диапазонах частот (метровых и нижней части дециметровых волн) несущественно. Количественный анализ показывает, что в этих диапазонах вклад флуктуаций фазы, вызванных тропосферой, не превосходит 1 и 1.5% соответственно. Таким образом, принимаемый сигнал можно записать в виде

$$\dot{s}(t) = \dot{E}_0 \exp\left(j 2\pi f_c \left(t - \frac{1}{c} R(t)\right) + \varphi(t) + \varphi_i(t)\right), \quad (3)$$

где $\varphi(t)$ — случайная фаза, обусловленная флуктуациями электронной плотности. Зная $R(t)$, можно записать изменение фазы в зависимости от расстояния МКА–НПП $\phi_b(t) = 2\pi f_c R(t)/c$, опорный сигнал $\dot{s}_b(t) = \exp[j(2\pi f_c t - \phi_b(t))]$, тогда сигнал на выходе синхронного детектора $\Delta \dot{s}(t)$ имеет вид

$$\Delta \dot{s}(t) = \dot{s}(t)(\dot{s}_b(t))^* = \dot{E}_0 \exp\left(j \left(\frac{\partial}{\partial t} \varphi(t)\right) t + \varphi_i(t)\right). \quad (4)$$

Далее из зарегистрированного цифрового сигнала $\Delta \dot{s}(t)$, используя скользящее дискретное преобразование Фурье, можно найти зависимость разностной частоты от времени и затем восстановить фазовые флуктуации, обусловленные ионосферой. При этом заметим, что флуктуации частоты, связанные с информационной составляющей мгновенной фазы, на несколько порядков выше ионосферных, поэтому не влияют на полученную оценку разностной частоты.

Функцию автокорреляции фазовых флуктуаций, обусловленных ионосферой, можно записать в виде

$$B_\varphi(t_1, t_2) = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \int_{R_{\max}(t_1)}^{R_{\min}(t_1)} \int_{R_{\max}(t_2)}^{R_{\min}(t_2)} B_0(|\mathbf{R}_1(r_1, t_1) - \mathbf{R}_2(r_2, t_2)|) dr_1 dr_2, \quad (5)$$

где $B_0(r)$ — корреляционная функция флуктуаций коэффициента преломления ионосферы, $\mathbf{R}_1(r_1, t_1)$, $\mathbf{R}_2(r_2, t_2)$ — векторы положения трассы распространения луча в ионосфере, $R_{\min}(t_1)$, $R_{\max}(t_1)$, $R_{\min}(t_2)$, $R_{\max}(t_2)$ — пределы изменения параметров r_1 и r_2 соответственно.

Если известны дисперсия флуктуаций фазы $\sigma_\varphi^2 = B_\varphi(0, 0)$ и интервал корреляции флуктуаций фазы τ_{cor} , определенный в виде

$$\tau_{cor} = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{+\infty} t^2 B_\varphi(0, t) dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} B_\varphi(0, t) dt}}, \quad (6)$$

то параметры модели, например, колоколообразной функции корреляции электронной плотности $B_0(r)$ могут быть определены по зависимостям дисперсии фазы

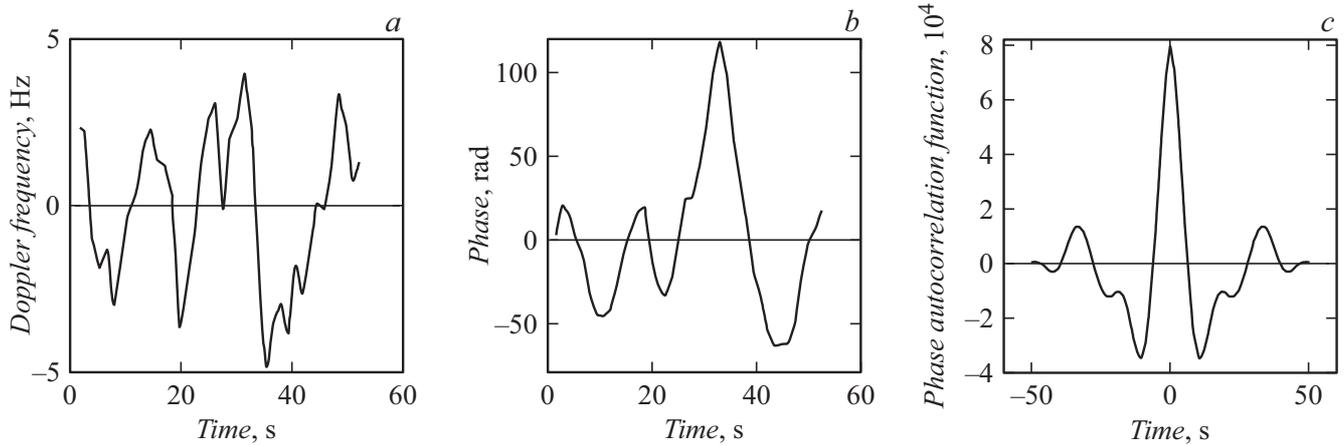


Рис. 2. Разностная доплеровская частота (a), фаза, полученная интегрированием разностной доплеровской частоты (b), и вид корреляционной функции (c).

от концентрации электронов и времени корреляции от масштаба неоднородностей.

Для проведения натурного эксперимента был использован сигнал, излучаемый передающим блоком аппаратуры радиоканала дециметрового диапазона из состава бортовой системы контроля и управления МКА „Аист-2Д“ [9]. Сигнал был принят НПП из состава бистатического радиолокационного комплекса МКА „Аист-2Д“ на частоте 435.34 МГц, записан и оцифрован на нулевой несущей с частотой дискретизации 100 кГц.

На рис. 2, a представлен фрагмент разностной доплеровской частоты, полученный путем вычитания опорного сигнала с использованием оценочных данных о траектории движения МКА. На рис. 2, b показана фаза, полученная путем интегрирования разностной доплеровской частоты, а на рис. 2, c — полученная функция автокорреляции фазы сигнала на несущей частоте 435.365 МГц.

По данным рис. 2, c можно определить ширину функции корреляции (6.07 s). По значениям интервалов корреляции может быть определен масштаб неоднородностей (70 km) и концентрация электронов в ионосфере ($3.2 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-3}$), что находится в диапазоне допустимых значений для данного региона (Самара, 53°11'N, 50°07'E) и времени эксперимента 5 h 42 min в формате UTC (световая часть витка). Следует отметить, что точность предлагаемого метода определяется точностью знания следующих параметров: положение движения центра масс космического аппарата, отношение сигнал/шум, тропосферная составляющая, объем записанных данных (длительность сеанса связи) и точность используемой модели функции корреляции электронной плотности $B_0(r)$.

Полученные данные могут быть использованы при обработке радиолокационных изображений для умень-

шения деструктивного влияния ионосферы на получаемые информационные продукты в длинноволновой части радиоспектра. В отличие от большинства известных методов предлагаемая методика не использует априорное знание структуры излучаемого сигнала, что позволяет проводить исследование характеристик ионосферы параллельно с передачей целевой информации. В контексте создания системы глобального мониторинга ионосферы интеграция информации, полученной в рамках предлагаемого подхода и других методов, представляется крайне актуальной.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] O.V. Goryachkin, I.V. Maslov, IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., **17** (11), 1919 (2020). DOI: 10.1109/LGRS.2019.2960441
- [2] Ю.В. Ясюкевич, И.В. Живетьев, А.С. Ясюкевич, С.В. Воейков, В.И. Захаров, Н.П. Перевалова, Н.Н. Титков, Современ. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, **14** (1), 88 (2017).
- [3] Системный мониторинг ионосферы, сб. науч. тр., под ред. Н.Г. Котонаевой (Физматлит, М., 2019).
- [4] Л.А. Макриденко, С.Н. Волков, А.В. Горбунов, В.П. Ходненко, Вopr. электромеханики. Тр. ВНИИЭМ, **170** (3), 40 (2019).
- [5] N. Cheng, S. Song, G. Jiao, X. Jin, W. Li, Radio Sci., **56** (2), e2020RS007074 (2021). DOI: 10.1029/2020RS007074
- [6] V.V. Demyanov, Y.V. Yasyukevich, S. Jin, M.A. Sergeeva, Pure Appl. Geophys., **176** (10), 4555 (2019). DOI: 10.1007/s00024-019-02281-6
- [7] Y. Zhu, Y. Wei, P. Tong, in 2016 IEEE Int. Conf. on acoustics, speech and signal processing (ICASSP) (IEEE, 2016), p. 2209. DOI: 10.1109/ICASSP.2016.7472069

- [8] L.E. Nazarov, V.V. Batanov, in *2020 7th All-Russian Microwave Conf. (RMC)* (IEEE, 2020), p. 233.
DOI: 10.1109/RMC50626.2020.9312332
- [9] А.Н. Кирилин, Р.Н. Ахметов, Е.В. Шахматов, С.И. Ткаченко, А.И. Бакланов, В.В. Салмин, Н.Д. Семкин, И.С. Ткаченко, О.В. Горячкин, *Опытно-технологический малый космический аппарат „АИСТ-2Д“* (Изд-во СамНЦ РАН, Самара, 2017).