

УДК 551.510.535

ИССЛЕДОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ ПРИЕМНИКОВ КОГЕРЕНТНЫХ СИГНАЛОВ, УСТАНОВЛИВАЕМЫХ НА БОРТУ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А.В. Новиков, А.А. Романов, С.В. Трусов

INVESTIGATION INTO THE IONOSPHERE USING COHERENT SIGNAL RECEIVERS MOUNTED ABOARD LOW-ORBITING SPACECRAFTS

A.V. Novikov, A.A. Romanov, S.V. Trusov

В докладе предлагается оригинальный четырехчастотный метод радиопросвечивания ионосферы, позволяющий определить с высокой точностью абсолютное значение полного электронного содержания вдоль луча визирования. Приводятся требования к приемопередающей радиоаппаратуре как наземного, так и космического базирования.

An original four-frequency sounding method is presented. This method allows us to determine the precise absolute value of the total electron content along the line of sight. Requirements for ground- and satellite-based radio sets are also presented.

Введение

Исследования ионосферы Земли сильно затруднены из-за недостаточного количества специализированной аппаратуры, предназначенной для определения вертикального распределения электронной концентрации. В последнее время инструментом для исследования процессов, протекающих в ионосферной плазме, становятся когерентные радиосигналы, излучаемые искусственными спутниками Земли.

Навигационные системы являются мощным инструментом для изучения процессов, протекающих в верхней атмосфере – ионосфере и магнитосфере Земли. Системы первого поколения излучают узкополосные когерентные сигналы на двух частотах 150 и 400 МГц [1]. Современные глобальные спутниковые навигационные системы второго поколения используют два диапазона с центральными частотами около 1.2 и 1.6 ГГц [2]. На основе анализа разности фаз принимаемых на двух частотах сигналов при использовании метода фазоразностной томографии можно восстановить распределение полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере Земли с точностью до неизвестной константы [3].

Поскольку из непосредственных измерений можно определить только относительное ПЭС, на последующих этапах обработки информации необходимо определить количество полных циклов фазы сигнала или дифференцировать сигнал, исключив таким образом константу [3].

Подобный подход позволяет восстанавливать градиенты электронной концентрации в ионосфере, но не позволяет получать фоновое распределение. Следовательно, при использовании разностных методов возникает необходимость в начальном приближении [3, 4]. Схема измерений, позволяющая получить абсолютные значения ПЭС с точностью, приемлемой для решения обратной задачи реконструкции вертикального распределения электронной концентрации, позволила бы отказаться от использования априорных данных.

В [5] приведено описание метода расчета ПЭС на основе трехчастотной комбинации когерентных сигналов, использующихся спутниковой системой FORMOSAT-3/COSMIC. Авторами предложен механизм обработки трехчастотных фазовых данных, позволяющий увеличить величину минимальной неоднозначности определения ПЭС до четверти фи-

зически возможного диапазона значений. Таким образом, для интерпретации данных нужно выбрать одно из четырех разнесенных по диапазону значений.

В данной работе рассмотрен метод обработки многочастотных немодулированных когерентных радиосигналов, позволяющий довести величину неоднозначности до значений, превосходящих ширину диапазона. Такой метод дает возможность однозначной интерпретации измерений абсолютного значения ПЭС вдоль луча, соединяющего передатчик и приемник. Использование четырехчастотных измерений может существенно расширить возможности томографического подхода восстановления распределения ПЭС, в особенности при установке приемопередающей аппаратуры на борту низкоорбитальных искусственных спутников Земли (НО ИСЗ).

Метод определения ПЭС из многочастотных фазовых измерений

Приведем расчет оптимального метода обработки четырехчастотного немодулированного сигнала, дающий наилучшее разрешение при максимальной величине неопределенности.

Набег фазы радиосигнала, прошедшего через ионосферу, можно описать формулой [6]

$$P = \left(S - \frac{\varepsilon}{f^2} \int N ds \right) \frac{f}{c}, \quad (1)$$

где S – геометрический путь, пройденный лучом; $\varepsilon = 40.3$; f – частота несущей сигнала; $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света; ds – элемент пути луча; $\int N ds$ – полное электронное содержание.

В этой формуле за единицу измерения фазы принято число циклов периодического процесса с частотой f . Целая часть числа соответствует числу полных циклов, прошедших с момента начала отсчетов, дробная часть – отношение времени, прошедшего от момента начала последнего цикла, к периоду рассматриваемого процесса.

В физическом эксперименте непосредственному измерению поддается только дробная часть приведенной выше величины, следовательно, значение P может быть определено с точностью до произвольной целой константы.

Разность фаз для сигналов частот несущих f_a и f_b с учетом формулы (1) имеет вид

$$\Delta P_{ab} = P_a - P_b \frac{f_a}{f_b} = \frac{(f_b - f_a)(f_b + f_a)\varepsilon}{cf_b^2 f_a} \int N ds. \quad (2)$$

Рассмотрим случай четырех когерентных частот, причем соседние частоты отличаются в n_2/n_1 раз, где n_2 и n_1 – целые числа. Частоты, соответствующие этому случаю, можно выразить через основную частоту f_0 :

$$\begin{aligned} f_1 &= n_1^3 f_0, \\ f_2 &= n_1^2 n_2 f_0, \\ f_3 &= n_1 n_2^2 f_0, \\ f_4 &= n_2^3 f_0. \end{aligned} \quad (3)$$

Тогда разность фаз для каждой пары частот можно записать так:

$$\begin{aligned} \Delta P_{12} &= \frac{(n_2^2 - n_1^2)\varepsilon}{n_1^3 n_2^2 c f_0} \int N ds, \\ \Delta P_{13} &= \frac{(n_2^4 - n_1^4)\varepsilon}{n_1^3 n_2^4 c f_0} \int N ds, \\ \Delta P_{14} &= \frac{(n_2^6 - n_1^6)\varepsilon}{n_1^3 n_2^6 c f_0} \int N ds, \\ \Delta P_{23} &= \frac{(n_2^2 - n_1^2)\varepsilon}{n_1^2 n_2^3 c f_0} \int N ds, \\ \Delta P_{24} &= \frac{(n_2^4 - n_1^4)\varepsilon}{n_1^2 n_2^5 c f_0} \int N ds, \\ \Delta P_{34} &= \frac{(n_2^2 - n_1^2)\varepsilon}{n_1 n_2^4 c f_0} \int N ds. \end{aligned} \quad (4)$$

Так как фаза всегда определена с точностью до константы, разность фаз можно представить в виде неизвестной целой и измеряемой дробной частей:

$$\Delta P_{ab} = K_{ab} + \Delta\varphi_{ab}, \quad (5)$$

где K_{ab} – целое, $0 \leq \Delta\varphi_{ab} < 1$.

При записи этой формулы и далее будем считать, что разность фаз измеряется в долях цикла с частотой f_a . Целая часть разности фаз может быть определена путем разрешения фазовой неоднозначности. При двухчастотных измерениях неоднозначность ПЭС соответствует целому числу полных циклов фазы, т. е. шаг неоднозначности соответствует $\Delta P=1$ (углу поворота фазы в 2π радиан). Величины неоднозначностей имеют вид

$$\begin{aligned} \Delta_{12} &= \frac{n_1^3 n_2^2 c f_0}{(n_2^2 - n_1^2)\varepsilon} = 7.44 \cdot 10^6 f_0 \frac{n_1^3 n_2^2}{(n_2^2 - n_1^2)} m^{-2} = \\ &= 7.44 \cdot 10^{-10} f_0 \frac{n_1^3 n_2^2}{(n_2^2 - n_1^2)} \text{TECU}; \\ \Delta_{13} &= \frac{n_1^3 n_2^4 c f_0}{(n_2^4 - n_1^4)\varepsilon} = 7.44 \cdot 10^6 f_0 \frac{n_1^3 n_2^4}{(n_2^4 - n_1^4)} m^{-2} = \\ &= 7.44 \cdot 10^{-10} f_0 \frac{n_1^3 n_2^4}{(n_2^4 - n_1^4)} \text{TECU}; \\ \Delta_{14} &= \frac{n_1^3 n_2^6 c f_0}{(n_2^6 - n_1^6)\varepsilon} = 7.44 \cdot 10^6 f_0 \frac{n_1^3 n_2^6}{(n_2^6 - n_1^6)} m^{-2} = \\ &= 7.44 \cdot 10^{-10} f_0 \frac{n_1^3 n_2^6}{(n_2^6 - n_1^6)} \text{TECU}; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta_{23} &= \frac{n_1^2 n_2^5 c f_0}{(n_2^2 - n_1^2)\varepsilon} = 7.44 \cdot 10^6 f_0 \frac{n_1^2 n_2^5}{(n_2^2 - n_1^2)} m^{-2} = \\ &= 7.44 \cdot 10^{-10} f_0 \frac{n_1^2 n_2^5}{(n_2^2 - n_1^2)} \text{TECU}; \\ \Delta_{24} &= \frac{n_1^2 n_2^5 c f_0}{(n_2^4 - n_1^4)\varepsilon} = 7.44 \cdot 10^6 f_0 \frac{n_1^2 n_2^5}{(n_2^4 - n_1^4)} m^{-2} = \\ &= 7.44 \cdot 10^{-10} f_0 \frac{n_1^2 n_2^5}{(n_2^4 - n_1^4)} \text{TECU}; \\ \Delta_{34} &= \frac{n_1 n_2^4 c f_0}{(n_2^2 - n_1^2)\varepsilon} = 7.44 \cdot 10^6 f_0 \frac{n_1 n_2^4}{(n_2^2 - n_1^2)} m^{-2} = \\ &= 7.44 \cdot 10^{-10} f_0 \frac{n_1 n_2^4}{(n_2^2 - n_1^2)} \text{TECU}, \end{aligned}$$

где TECU (Total Electron Content Unit) – единица измерения ПЭС, равная 10^{16} м^{-2} , Δ_{ij} ($i, j=1, 2, 3, 4$) – величина неоднозначности определения ПЭС.

Для простоты будем считать точность определения разности набегов фаз одинаковой для каждой пары каналов и равной $\delta\varphi$. При этом из формул (4) нетрудно заметить, что разрешение будет пропорционально $\delta\varphi$ и минимальной неопределенности, т. е.

$$\delta_{ij} = \Delta_{ij} \delta\varphi, \quad (7)$$

где δ_{ij} – оценка точности определения разности набегов фаз.

Поскольку измерения на всех частотах производят в один момент времени, то значения ПЭС для всех трех случаев должны быть одинаковы. Следовательно, формулы (4) можно преобразовать в пропорцию:

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon}{c f_0} \int N ds &= \Delta P_{12} : \frac{n_2^2 - n_1^2}{n_1^3 n_2^2} = \\ &= \Delta P_{13} : \frac{n_2^4 - n_1^4}{n_1^3 n_2^4} = \Delta P_{14} : \frac{n_2^6 - n_1^6}{n_1^3 n_2^6} = \\ &= \Delta P_{23} : \frac{n_2^2 - n_1^2}{n_1^2 n_2^3} = \Delta P_{24} : \frac{n_2^4 - n_1^4}{n_1^2 n_2^5} = \Delta P_{34} : \frac{n_2^2 - n_1^2}{n_1 n_2^4}. \end{aligned} \quad (8)$$

Вынесем общий для всех членов множитель из знаменателей. Для этого умножим все части на $\frac{n_2^2 - n_1^2}{n_1^3 n_2^6}$:

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon}{c f_0} \frac{n_2^2 - n_1^2}{n_1^3 n_2^6} \int N ds &= \frac{\Delta P_{12}}{n_2^4} = \frac{\Delta P_{13}}{n_2^2 (n_2^2 + n_1^2)} = \\ &= \frac{\Delta P_{14}}{n_2^4 + n_1^2 n_2^2 + n_1^4} = \frac{\Delta P_{23}}{n_1 n_2^3} = \frac{\Delta P_{24}}{n_1 n_2 (n_2^2 + n_1^2)} = \frac{\Delta P_{34}}{n_1^2 n_2^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Из приведенных равенств можно составить 15 различных комбинаций. Выведем общий для этих комбинаций алгоритм разрешения неоднозначностей и записи формулы для ПЭС. Выберем два члена пропорции, участвующих в рассматриваемой комбинации – ΔP_{ij} и ΔP_{kl} . Они могут быть представлены в виде

$$\frac{\varepsilon}{c f_0} \frac{n_2^2 - n_1^2}{n_1^3 n_2^6} \int N ds = \frac{\Delta P_{ij}}{N_{ij} M_{ijkl}} = \frac{\Delta P_{kl}}{N_{kl} M_{ijkl}}. \quad (10)$$

Здесь N_{ij} , N_{kl} и M_{ijkl} – натуральные числа. Умножим все три части пропорции на M_{ijkl} :

$$\frac{\varepsilon}{c f_0} \frac{n_2^2 - n_1^2}{n_1^3 n_2^6} M_{ijkl} \int N ds = \frac{\Delta P_{ij}}{N_{ij}} = \frac{\Delta P_{kl}}{N_{kl}}. \quad (11)$$

Перепишем правое равенство в виде

$$\Delta P_{ij} N_{kl} = \Delta P_{kl} N_{ij}. \quad (12)$$

С учетом формулы (5) получаем:

$$(K_{ij} + \Delta \varphi_{ij}) N_{kl} = (K_{kl} + \Delta \varphi_{kl}) N_{ij}, \quad (13)$$

$$K_{ij} N_{kl} - K_{kl} N_{ij} = \Delta \varphi_{kl} N_{ij} - \Delta \varphi_{ij} N_{kl}. \quad (14)$$

Заметим, что правая часть уравнения (14) – целое число, значит, левая часть тоже должна быть целой. Определим два новых неизвестных целых числа x_{ij} и x_{kl} как минимальные по модулю решения целочисленного уравнения

$$x_{ij} N_{kl} - x_{kl} N_{ij} = 1. \quad (15)$$

Теперь можно выразить K_{12} и K_{13} :

$$K_{ij} = [\Delta \varphi_{kl} N_{ij} - \Delta \varphi_{ij} N_{kl}] x_{ij} + k N_{ij}, \quad (16)$$

$$K_{kl} = [\Delta \varphi_{kl} N_{ij} - \Delta \varphi_{ij} N_{kl}] x_{kl} + k N_{kl},$$

где k – произвольное целое число.

Запишем значения абсолютных фаз с учетом уравнений (16):

$$\Delta P_{ij} = K_{ij} + \Delta \varphi_{ij} = [\Delta \varphi_{kl} N_{ij} - \Delta \varphi_{ij} N_{kl}] x_{ij} + k N_{ij} + \Delta \varphi_{ij}, \quad (17)$$

$$\Delta P_{kl} = K_{kl} + \Delta \varphi_{kl} = [\Delta \varphi_{kl} N_{ij} - \Delta \varphi_{ij} N_{kl}] x_{kl} + k N_{kl} + \Delta \varphi_{kl}.$$

Заменим множитель 1 при последних членах уравнений (17) на выражение $x_{ij} N_{kl} - x_{kl} N_{ij}$:

$$\Delta P_{ij} = [\Delta \varphi_{kl} N_{ij} - \Delta \varphi_{ij} N_{kl}] x_{ij} + k N_{ij} + [x_{ij} N_{kl} - x_{kl} N_{ij}] \Delta \varphi_{ij}, \quad (18)$$

$$\Delta P_{kl} = [\Delta \varphi_{kl} N_{ij} - \Delta \varphi_{ij} N_{kl}] x_{kl} + k N_{kl} + [x_{ij} N_{kl} - x_{kl} N_{ij}] \Delta \varphi_{kl}.$$

Упростим выражения (18). Тогда получим

$$\Delta P_{ij} = [x_{ij} \Delta \varphi_{kl} - x_{kl} \Delta \varphi_{ij} + k] N_{ij}, \quad (19)$$

$$\Delta P_{kl} = [x_{ij} \Delta \varphi_{kl} - x_{kl} \Delta \varphi_{ij} + k] N_{kl}.$$

Выразим ПЭС из формулы (11):

$$\begin{aligned} \int N ds &= \frac{c f_0}{\varepsilon} \frac{n_1^3 n_2^6}{n_2^2 - n_1^2} \frac{\Delta P_{ij}}{N_{ij} M_{ijkl}} = \\ &= \frac{c f_0}{\varepsilon} \frac{n_1^3 n_2^6}{n_2^2 - n_1^2} \frac{\Delta P_{kl}}{N_{kl} M_{ijkl}} = \\ &= \frac{c f_0}{\varepsilon} \frac{n_1^3 n_2^6}{n_2^2 - n_1^2} \frac{1}{M_{ijkl}} [x_{ij} \Delta \varphi_{kl} - x_{kl} \Delta \varphi_{ij} + k]. \end{aligned} \quad (20)$$

Множитель перед скобками в формуле (20) представляет собой величину минимальной неоднозначности, так как является множителем, стоящим перед произвольной константой k .

$$\Delta_{ijkl} = \frac{c f_0}{\varepsilon} \frac{n_1^3 n_2^6}{n_2^2 - n_1^2} \frac{1}{M_{ijkl}}, \quad (21)$$

где Δ_{ijkl} – величина неоднозначности измерения ПЭС при использовании комбинации частот $ijkl$.

Если предположить, что точность измерения разности фаз для любых пар частот одинакова и равна $\delta\varphi$, то точность измерения ПЭС будет пропорциональна $\delta\varphi$, т. е.

$$\delta_{ijkl} = \frac{c f_0}{\varepsilon} \frac{n_1^3 n_2^6}{n_2^2 - n_1^2} \frac{1}{M_{ijkl}} \sqrt{x_{ij}^2 + x_{kl}^2} \delta\varphi. \quad (22)$$

где δ_{ijkl} – оценка точности измерения ПЭС при использовании комбинации частот $ijkl$.

Численный расчет характеристик

Для спутниковых передатчиков, предназначенных для исследований ионосферы, выделены частоты 150 и 400 МГц, т. е. частоты, кратные 50 МГц, с коэффициентами $n_1=3$ и $n_2=8$. Рассмотрим случай четырехчастотного передатчика, расчетные формулы для которого были выведены выше. Выразим из первой формулы (3) значение f_0 и приведем значения других несущих:

$$\begin{aligned} f_0 &= f_1 / n_1^3 = 5, (5) \text{ МГц}, \\ f_1 &= 150 \text{ МГц}, \\ f_2 &= n_1^2 n_2 f_0 = 400 \text{ МГц}, \\ f_3 &= n_1 n_2^2 f_0 = 1066, (6) \text{ МГц}, \\ f_4 &= n_2^3 f_0 = 2844, (4) \text{ МГц}. \end{aligned} \quad (23)$$

Рассчитаем минимальные неопределенности для всех пар частот по формулам (6):

$$\begin{aligned} \Delta_{12} \int N ds &= \frac{n_1^3 n_2^2 c f_0}{(n_2^2 - n_1^2) \varepsilon} \approx 0.13 \text{ TECU}, \\ \Delta_{13} \int N ds &= \frac{n_1^3 n_2^4 c f_0}{(n_2^4 - n_1^4) \varepsilon} \approx 0.11 \text{ TECU}, \\ \Delta_{14} \int N ds &= \frac{n_1^3 n_2^6 c f_0}{(n_2^6 - n_1^6) \varepsilon} \approx 0.11 \text{ TECU}, \\ \Delta_{23} \int N ds &= \frac{n_1^2 n_2^3 c f_0}{(n_2^2 - n_1^2) \varepsilon} \approx 0.35 \text{ TECU}, \\ \Delta_{24} \int N ds &= \frac{n_1^2 n_2^5 c f_0}{(n_2^4 - n_1^4) \varepsilon} \approx 0.30 \text{ TECU}, \\ \Delta_{34} \int N ds &= \frac{n_1 n_2^4 c f_0}{(n_2^2 - n_1^2) \varepsilon} \approx 0.92 \text{ TECU}. \end{aligned} \quad (24)$$

Проведем численный расчет по формулам (9)–(22) для всех 15 частотных комбинаций и результаты сведем в таблицу.

Для получения точного абсолютного значения ПЭС необходимо максимизировать неоднозначность и минимизировать ошибку определения ПЭС. Максимальная неоднозначность в 532 TECU достижима при использовании нескольких комбинаций частот, наименьшую ошибку из них дает комбинация 1214, однако эти комбинации накладывают высокие требования на значения $\delta\varphi$, т. е. на разрешающую способность приемной аппаратуры. Комбинация 1324 дает неоднозначность 66.6 TECU, что перекрывает практически весь физически обоснованный диапазон значений ПЭС для средних широт [6]. С другой стороны, требования к точности все еще высоки, например, для

Значения величин неоднозначностей и точностей определения ПЭС

i, j	k, l	x_{ij}	x_{kl}	$\Delta_{\text{пол}} \int Nds,$ TECU	$\delta_{\text{пол}} \int Nds / \delta\varphi,$ TECU/1°
1, 2	1, 3	-7	-8	8.31	0.25
	1, 4	-399	-463	532	903
	2, 3	-21	-1	1.04	0.014
	2, 4	-173	-74	66.56	34.7
	3, 4	-7	-1	8.31	0.16
1, 3	1, 4	-1615	-1643	532	3389
	2, 3	-3	-1	8.31	0.073
	2, 4	3	1	66.56	0.58
	3, 4	-8	-1	8.31	0.19
1, 4	2, 3	-1934	-625	532	3000
	2, 4	-1956	-721	532	3083
	3, 4	1180	143	532	1756
2, 3	2, 4	-7	-8	22.2	0.66
	3, 4	3	1	2.77	0.024
2, 4	3, 4	-3	-1	22.2	0.19

обеспечения разрешения в 1 TECU точность определения разности фазы должна составлять 1.7°.

Требования к точности разрешения фазы можно ослабить при последовательном использовании комбинаций, дающих грубые измерения, для разрешения неоднозначностей более точных. Так при разрешении неоднозначности в 22.2 TECU комбинации 2434 с помощью измерений по комбинации 1324 достаточно разрешения по фазе в 38°. Этого же разрешения достаточно для последующего перехода к комбинации 1323 (неоднозначность 8.31 TECU), затем 2334 (неоднозначность 2.77 TECU), затем 1223 (неоднозначность 1.04 TECU). Далее возможно использование простых двухчастотных комбинаций. Наибольшую (следовательно, легко разрешимую) неоднозначность дает комбинация 34, с помощью нее может быть разрешена неоднозначность самой точной комбинации 14. При фазовом разрешении в 38° разрешение этой комбинации составит около 0.01 TECU.

Таким образом, использование описанной выше последовательности измерений позволяет достичь неоднозначности в 66.6 TECU при точности не хуже 0.01 TECU, не предъявляя завышенных требований к приемной аппаратуре.

Размещение приемопередающей аппаратуры на борту НО ИСЗ

Традиционно радиопередатчики просветного зондирования ионосферы размещаются на борту НО ИСЗ, в то время как приемники размещаются на поверхности Земли [3]. При такой геометрии задачи отсутствуют проекции распределения ПЭС, касательные (и близкие к касательным) к поверхности геоида. Этот набор данных является недостаточным для однозначного решения томографической задачи даже при наличии абсолютных значений ПЭС.

Для получения недостающих проекций приемная аппаратура может размещаться на борту космических аппаратов. При этом будет реализована схема просветного зондирования. Для получения наилучшего набора данных желательно, чтобы принимающий и передающий аппарат имели различные типы орбит.

Интегральные значения ПЭС при затменном методе зондирования ионосферы могут превышать полученное выше значение в 66.6 TECU, дос-

тигая сотен единиц TECU. Из анализа таблицы следует, что наибольшее значение величины неоднозначности измерений ПЭС (532 TECU) достигается при использовании комбинаций 1214, 1314, 1423, 1424, 1434; наилучшим разрешением обладает комбинация 1214 (903 TECU/1°). Для разрешения неоднозначности комбинации 1324 требуется точность измерения разности набега фаз не менее 4.4', при этом точность определения абсолютного значения ПЭС после проведения полной цепочки вычислений, описанной выше, составит около 0.001 TECU. К сожалению, требуемая точность не достижима для существующей аппаратуры, однако, по мнению авторов, фундаментальных ограничений для ее достижения при разработке новой аппаратуры на современной элементной базе не существует.

Заключение

В работе предложен эффективный метод определения абсолютного ПЭС ионосферы Земли на основе просвечивания когерентными сигналами на частотах 150, 400, 1067 и 2844 МГц.

Рассмотрены несколько вариантов комбинирования частотных диапазонов, использование которых приводит к определению ПЭС с высокой точностью на основе измерения фазовых характеристик сигнала. Показана возможность определения абсолютного значения ПЭС для наземных станций при использовании достаточно грубой измерительной аппаратуры (необходима точность определения разности набега фаз порядка 10°).

Описаны перспективы использования приемной аппаратуры на платформе космических аппаратов. При этом также возможны непосредственные измерения абсолютного значения ПЭС, однако требования к точности приемной аппаратуры существенно возрастают (до единиц угловых минут).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 08-07-12014-офи).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданов В.А., Сорочинский В.А., Якшевич Е.В. Спутниковые системы морской навигации. М.: Транспорт, 1987. 200 с.
2. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС / Под ред. В.Н. Харисова, А.И. Перова, В.А. Болдина. М.: ИПРЖР, 1998. 400 с.
3. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. М.: Физматлит, 2007. 336 с.
4. Романов А.А., Трусов С.В., Романов А.А., Крючков В.Г. // Исследование Земли из космоса. 2008. № 2. С. 14.
5. Bernhardt P., Seifring C. Improved Ambiguity and Resolution for Total Electron Content Measured with the Three Transmitted Frequencies from the COSMIC TBB Instrument // Joint Geosciences Assembly, Taiwan. 2004. <http://www.cgu.org.tw/2004jga/dach/paper/9/09-O-021.doc>.
6. Колосов М.А., Арманд Н.А., Яковлев О.И. Распространение радиоволн при космической связи. М.: Связь, 1969. 155 с.

Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения, Москва