



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 2006120208/09, 08.06.2006

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
08.06.2006

(45) Опубликовано: 20.12.2007 Бюл. № 35

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: ШЕБШАЕВИЧ В.С. и др. Сетевые
спутниковые радионавигационные системы. - М.:
Радио и связь, 1993, с.83. RU 2208809 C1,
20.07.2003. RU 2251713 C1, 10.05.2005. RU
809019 A1, 28.02.1981. EP 0242115 A2,
21.10.1987. US 5276451 A, 04.01.1994. US
5867411 A, 02.02.1999.

Адрес для переписки:

660074, г.Красноярск, ул. Киренского, 26,
КГТУ, ПИО

(72) Автор(ы):

Сушкин Игорь Николаевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Красноярский государственный технический
университет (КГТУ) (RU)(54) СПОСОБ ОДНОЧАСТОТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАДЕРЖКИ СИГНАЛОВ НАВИГАЦИОННОЙ
СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ В ИОНОСФЕРЕ

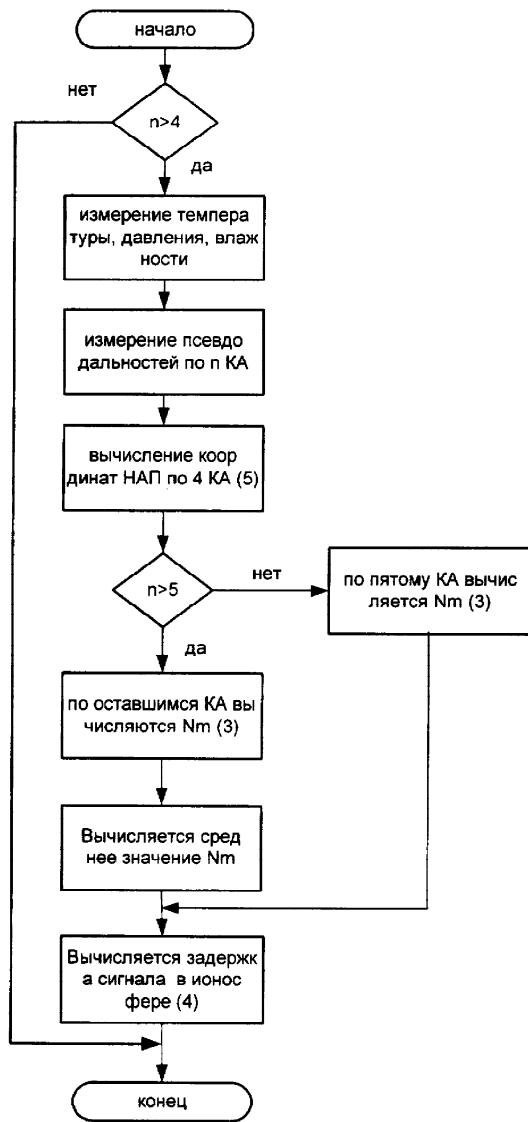
(57) Реферат:

Предлагаемое изобретение относится к области
спутниковой навигации и может быть использовано
для определения ионосферной задержки
распространения сигналов глобальных
навигационных спутниковых систем с помощью
навигационной аппаратуры потребителя,
работающей на одной частоте, и позволяет за счет

оценки электронной концентрации в ионосфере
определить задержку сигналов спутниковой
навигационной системы. Достижимым техническим
результатом является обеспечение оценки
электронной концентрации в режиме реального
времени, с высокой точностью и с малым объемом
вычислительных операций. 1 ил.

RU 2 313 103 C1

RU 2 313 103 C1





FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY,
PATENTS AND TRADEMARKS

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21), (22) Application: **2006120208/09, 08.06.2006**

(24) Effective date for property rights: **08.06.2006**

(45) Date of publication: **20.12.2007 Bull. 35**

Mail address:
**660074, g.Krasnojarsk, ul. Kirenskogo, 26,
KGTU, PIO**

(72) Inventor(s):
Sushkin Igor' Nikolaevich (RU)

(73) Proprietor(s):
**Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie
vysshego professional'nogo obrazovaniya
Krasnojarskij gosudarstvennyj tekhnicheskij
universitet (KGTU) (RU)**

(54) **METHOD FOR SINGLE-FREQUENCY DETERMINATION OF DELAY OF SATELLITE NAVIGATION SYSTEM SIGNALS IN IONOSPHERE**

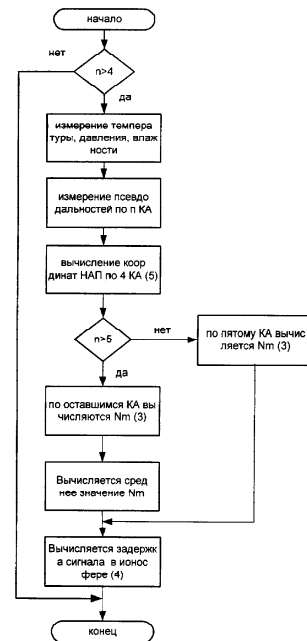
(57) Abstract:

FIELD: satellite navigation.

SUBSTANCE: the invention can be used for determination of ionosphere delay of propagation of signals of global satellite navigation systems with the aid of the user's navigation equipment operating on a single frequency, and makes it possible to determine the delay of signals of the satellite navigation system due to evaluation of the electric concentration in the ionosphere.

EFFECT: provided evaluation of the electron concentration in the real time conditions with a high precision and low extent of computations.

1 dwg



RU 2 313 103 C1

RU 2 313 103 C1

Предлагаемое изобретение относится к области спутниковой навигации и может быть использовано для определения ионосферной задержки распространения сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) с помощью навигационной аппаратуры потребителя, работающей на одной частоте.

5 Все связи между приземными потребителями и навигационными космическими аппаратами (НКА) осуществляются через атмосферу Земли, включая тропосферу и ионосферу. Атмосфера имеет ярко выраженную частотную избирательность. Неоднородное по высоте распределение диэлектрической проницаемости вызывает искривление траектории распространения радиоволн - рефракцию. Вследствие этого, на
10 рабочей частоте НКА (1,6 ГГц) погрешность определения псевдодальности составляет от 5 до 50 метров. Основное влияние на задержку радиосигнала в ионосфере вносит электронная концентрация, которая постоянно изменяется в зависимости от времени (часа суток, сезона, фазы цикла солнечной активности), географических координат, высоты над уровнем моря, от солнечной активности.

15 Известен способ определения задержки сигналов в ионосфере на одной частоте [1], заключающийся в измерении разности между псевдодальностями, измеренными по дальномерному коду и по фазе несущей частоты, основан на том, что в ионосфере скорость распространения модулирующего сигнала меньше скорости света. Разность измерений псевдодальности по задержке кода и по фазе несущей частоты равна
20 удвоенной ионосферной задержке сигнала и может быть использована для ее определения.

Оценка величины задержки сигналов и начальной неоднозначности фазовых измерений в данном способе производится при помощи фильтра Калмана. Размерность вектора состояния, используемого в фильтре, зависит от числа навигационных космических
25 аппаратов и аппроксимирующего полинома.

Недостатком данного метода является большая размерность вектора состояния, что влечет за собой большой объем вычислений и, как следствие, увеличение времени расчета. При устранении фазовой неоднозначности значительно увеличивается время первого отсчета и снижается устойчивость системы.

30 Известен способ определения задержки сигналов ГНСС в ионосфере на одной частоте [2, с.83], взятый в качестве прототипа, основанный на применении упрощенной модели интегральной электронной концентрации ионосферы. В алгоритме используется аппроксимация вариации электронной концентрации положительной полуволной в дневные часы и постоянной величиной - в ночные. Исходными данными для расчета ионосферных
35 поправок являются приближенные значения координат навигационной аппаратуры потребителя (НАП), угол места, азимут навигационных космических аппаратов, время и коэффициенты модели. Коэффициенты модели передаются в навигационном сообщении системы GPS (Global Position System) и обновляются каждые 6 дней [3].

Недостатком данного способа является низкая точность определения задержки сигналов
40 в ионосфере, обусловленная устареванием информации, невозможность оценки локального изменения электронной концентрации. Кроме того, алгоритм плохо воспроизводит поведение ионосферы на экваториальных широтах ввиду ограниченной возможности кубической аппроксимации. Использовать алгоритм на высоких широтах не целесообразно, т.к. интегральная электронная концентрация меньше, чем на средних и
45 низких широтах, а ее вариации во времени значительны. Коэффициенты модели не передаются в составе Российской системы ГНСС ГЛОНАСС. Вышеперечисленные недостатки значительно сужают применимость данной системы, особенно для российских пользователей.

В основу изобретения положена задача обеспечения возможности оценки электронной
50 концентрации в ионосфере в режиме реального времени, с высокой точностью и с малым объемом вычислительных операций, как для потребителей отечественной, так и для потребителей зарубежной систем.

Поставленная задача решается тем, что в способе одночастотного определения

задержки сигналов навигационной спутниковой системы в ионосфере, основанном на оценке электронной концентрации в ионосфере, согласно изобретению в навигационной аппаратуре потребителя измеряют температуру, влажность и давление окружающей среды, рассчитывают интегральный показатель коэффициента преломления сигнала в тропосфере по формуле:

$$\nu_i = \frac{\nu_n}{b} (e^{-bh_1} - e^{-bh_2})$$

где: $i=1...N$ число сигналов, принимаемых навигационной аппаратурой потребителя от навигационных космических аппаратов;

$$\nu_n = \nu_0 e^{-b/h};$$

$$\nu_0 = 77,6P / T + 3,73 \cdot 10^5 e / T^2; \quad (1)$$

$b=136$ м; $h=8$ км; $h_1=25$ км; $h_2=3$ км;

P - давление воздуха;

T - температура воздуха;

e - давление водяного пара в миллибарах, рассчитанное по формуле

$$e = J P_n(T) \quad (2)$$

где: J - относительная влажность;

$P_n(T)$ - давление насыщенного пара в миллибарах,

и оценивают электронную концентрацию в реальном масштабе времени по формуле:

$$N_m = \frac{\tau_{ci} c - R_i - \left(\frac{4 \cdot 10^3 \nu_i}{\sin \alpha_i} \right) (1 - \exp\{-z_m/h\})}{\frac{4,03 \cdot 10^7}{f_i^2} \gamma \frac{1}{\sin \alpha_i} \sum_{j=1}^{j=2} (-1)^{j+1} H_j \left[1 - \exp\left(-\frac{z_m - H_0}{H_j}\right) \right]}, \quad (3)$$

где: $H_0=200$ км;

$H_1=325$ км;

$H_2=32,5$ км;

$$z_m = \sqrt{R_e^2 + 2R_e R_i \sin \alpha_i + R_i^2} - R_e, \quad \text{высота источника излучения;}$$

R_e - радиус Земли;

α_i - угол места i -го НКА относительно НАП;

R_i - расстояние от i -го НКА до приемника излучения;

$$\gamma^{-1} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{\frac{h_2}{h_1 - h_2}} - \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{\frac{h_1}{h_1 - h_2}} = 1,435$$

c - скорость света в вакууме;

f_i - частота сигнала i -го НКА;

τ_{ci} - измеренное время распространения сигнала от i -го НКА до НАП;

$$R_i = \sqrt{(x_{ci} - x)^2 + (y_{ci} - y)^2 + (z_{ci} - z)^2}$$

$$\sin(\alpha_i) = \frac{x(x_{ci} - x) + y(y_{ci} - y) + z(z_{ci} - z)}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2 R_i}},$$

где: x, y, z - координаты НАП;

x_{ci}, y_{ci}, z_{ci} - координаты i -го НКА,

на последующие моменты времени рассчитывается задержка распространения сигнала в ионосфере по формуле:

$$S_i = \frac{4,03 \cdot 10^7}{f_i^2} \gamma N_m \frac{1}{\sin \alpha_i} \sum_{j=1}^{j=2} (-1)^{j+1} H_j \left[1 - \exp\left(-\frac{z_m - H_0}{H_j}\right) \right], \quad (4)$$

для i -го НКА.

Для описания высотного профиля концентрации применяются различные модельные зависимости, передающие наиболее характерные особенности строения ионосферы. В

настоящее время наиболее часто используют параболически-экспоненциальную модель и биэкспоненциальную модель. Из сопоставления графиков этих моделей, представленных в [4], можно сделать вывод, что обе модели приводят примерно к одинаковым результатам. Для примера рассмотрим биэкспоненциальную модель. Поправка к групповому пути для биэкспоненциальной модели профиля электронной концентрации при произвольном угле места [4] равна

$$S_i = \frac{4,03 \cdot 10^7}{f^2} \gamma N_m \frac{1}{\sin \alpha_i} \sum_{j=1}^{j-2} (-1)^{j+1} H_j \left[1 - \exp \left(-\frac{z_i - H_0}{H_i} \right) \right].$$

Расстояние от НКА до приемника можно определить по формуле

$$R_i = \sqrt{(x_{ci} - x)^2 + (y_{ci} - y)^2 + (z_{ci} - z)^2}$$

Поскольку опорный генератор, находящийся на навигационной аппаратуре потребителя, не синхронен с опорным генератором, находящимся на навигационном космическом аппарате, то существует расхождение временной шкалы между НАП и НКА, соответственно дальность между i-м НКА и НАП определяется по формуле

$$\tau_{ci} c = \sqrt{(x_{ci} - x)^2 + (y_{ci} - y)^2 + (z_{ci} - z)^2} + c \Delta t \quad (5)$$

где τ_{ci} - время распространения сигнала от i-го НКА до НАП;

c - скорость света;

Δt - расхождения временных шкал между НАП и навигационной системой.

Угол места НКА относительно НАП можно определить по формуле

$$\sin(\alpha) = \frac{x(x_{ci} - x) + x(z_{ci} - z) + z(z_{ci} - z)}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} R_i}$$

Задержка распространения сигнала от НКА до НАП зависит от геометрической дальности, от задержки распространения сигнала в ионосфере и тропосфере. Уравнение для определения задержки будет иметь вид

$$\tau_{ci} = \frac{R_i + S_i + \tilde{S}_i}{c},$$

где: \tilde{S}_i - задержка распространения сигнала от i-го НКА до НАП в тропосфере.

Рассмотрим влияние тропосферы на рефракцию излучаемого сигнала с НКА. В диапазоне радиочастот индекс преломления зависит от параметров тропосферы [4]

$$v_0 = 77,6P/T + 3,73 \cdot 10^5 e/T^2.$$

Это соотношение дает ошибку менее 0,5% для частот до 100 ГГц [4]. Зависимость давления водяного пара от температуры является табличным значением и можно взять, например, в [5]. При расчете радиофизических характеристик распространяющегося в тропосфере сигнала будем использовать экспоненциальную модель высотного профиля коэффициента преломления, так что

$$v_n = v_0 e^{-b/h},$$

Из этого выражения можно оценить v_n и рассчитать интегральный показатель коэффициента преломления [4] для i-го НКА

$$v_i = \int_{h_1}^{h_2} v_n e^{-bh} dh = \frac{v_n}{b} (e^{-bh_1} - e^{-bh_2}).$$

В приближении плоской Земли для i-го НКА задержку распространения сигнала можно определить

$$\tilde{S}_i = \left(\frac{4 \cdot 10^3 v_i}{\sin \alpha_i} \right) (1 - \exp\{-z_n/h\}). \quad (6)$$

Окончательно выражение для расчета времени распространения сигнала от i-го НКА до НАП определяется

$$\tau_{ci} = \frac{R_i + S_i + \left(\frac{4 \cdot 10^3 \nu_i}{\sin \alpha_i} \right) (1 - \exp\{-z_i/h\})}{c} \quad (7)$$

5 Тогда выражение для определения задержки распространения сигнала от i-го НКА до НАП в ионосфере будет иметь вид

$$S_i = \tau_{ci}c - R_i - \left(\frac{4 \cdot 10^3 \nu_i}{\sin \alpha_i} \right) (1 - \exp\{-z_i/h\}) \quad (8)$$

10 Выражение для определения электронной концентрации в ионосфере можно определить по формуле

$$N_m = \frac{\tau_{ci}c - R_i - \left(\frac{4 \cdot 10^3 \nu_i}{\sin \alpha_i} \right) (1 - \exp\{-z_i/h\})}{\frac{4,03 \cdot 10^7}{f_i^2} \gamma \frac{1}{\sin \alpha_i} \sum_{j=1}^{j=2} (-1)^{j+1} H_j \left[1 - \exp\left\{ -\frac{z_i - H_0}{H_j} \right\} \right]}$$

Для вычисления задержки времени распространения сигнала в ионосфере достаточно проводить одновременное измерение навигационных параметров по 5 НКА.

20 Как показывают экспериментальные данные [2] вариация ионосферы в течение суток может составлять до пяти раз. Если не учитывать мелкие неоднородности, то на некотором интервале времени электронную концентрацию можно считать постоянной и одинаковой для всех НКА, что позволяет в дальнейшем, на некотором интервале времени, считать величину N_m константой.

25 Оценивая электронную концентрацию по одному из НКА, можно скорректировать измеренные псевдодальности и получить более точные координаты навигационной аппаратуры потребителя по алгоритму, изложенному в [2].

30 Алгоритм вычисления задержки сигналов в навигационной спутниковой системе представлен на фиг.1. В начале алгоритма проводится проверка количества радиовидимых космических аппаратов (N), если число радиовидимых НКА не менее четырех, тогда производится измерение температуры, влажности и давления окружающей среды, а также время распространения сигнала от i-го НКА до НАП (τ_{ci}). По четырем НКА производится оценка координат НАП (5). По измеренным параметрам окружающей среды определяют задержку распространения сигнала от i-го НКА до НАП в тропосфере (6). Расчет электронной концентрации проводится, если $N > 4$, при этом по оставшимся
35 измеренным τ_{ci} , не участвовавшим в расчете координат НАП, определяют электронную концентрацию (3). Если $N > 5$, тогда находят среднее значение электронной концентрации. По полученному значению электронной концентрации вычисляется задержка распространения сигнала в ионосфере. Данный алгоритм можно реализовать на программном уровне с применением стандартного вычислительного модуля, например FC-
40 303 фирмы FASTWEL, или на аналогичном вычислителе, применяемом в ПЭВМ.

Таким образом, предлагаемый способ оценки электронной концентрации в ионосфере позволяет в режиме реального времени, с высокой точностью и с малым объемом вычислительных операций определить задержку сигналов спутниковой навигационной системы в ионосфере.

45 Источники информации

1. Nisner P., Trethewey V. GPS Ionospheric Determinations Using LI Only // Proceeding of the 5th International conference on «Differential Satellite Navigation System». Additional Volume, St. Peterburg, Russia, May, 1996.

50 2. В.С.Шебшаевич, П.П.Дмитриев и др. Сетевые спутниковые радионавигационные системы. - М.: «Радио и связь», 1993. - 408 с.

3. ICD-GPS-200, Revision C, U.S. Government, October 10, 1993.

4. Р.В.Бакитко, М.Б.Васильев, А.С.Виницкий. Радиосистемы межпланетных космических аппаратов. - М.: «Радио и связь», 1993 г.

5. С.З.Сапожников, Э.Л.Китанин. Техническая термодинамика и теплопередача. Санкт-Петербург, издательство СПбГПУ, 2003 г.

Формула изобретения

5 Способ одночастотного определения задержки сигналов навигационной спутниковой системы в ионосфере, основанный на оценке электронной концентрации в ионосфере, отличающийся тем, что в навигационной аппаратуре потребителя измеряют температуру, влажность и давление окружающей среды, рассчитывают интегральный показатель коэффициента преломления сигнала в тропосфере по формуле

$$10 \quad v_i = \frac{v_n}{b} (e^{-bh_1} - e^{-bh_2}),$$

где $i=1...N$ число сигналов, принимаемых навигационной аппаратурой потребителя от навигационных космических аппаратов;

$$v_n = v_0 e^{-b/h},$$

$$15 \quad v_0 = 77,6P/T + 3,73 \cdot 10^5 e/T^2;$$

$$b = 136 \text{ м}; h = 8 \text{ км}; h_1 = 25 \text{ км}; h_2 = 3 \text{ км};$$

P - давление воздуха;

T - температура воздуха;

20 e - давление водяного пара в миллибарах, рассчитанное по формуле $e = JP_{\text{п}}(T)$, где J - относительная влажность;

$P_{\text{п}}(T)$ - давление насыщенного пара в миллибарах, и оценивают электронную концентрацию в реальном масштабе времени по формуле

$$25 \quad N_m = \frac{\tau_{ci} c - R_i - \left(\frac{4 \cdot 10^3 v_i}{\sin \alpha_i} \right) (1 - \exp\{-z_i/h\})}{\frac{4,03 \cdot 10^7}{f_i^2} \gamma \frac{1}{\sin \alpha_i} \sum_{j=1}^{j=2} (-1)^{j+1} H_j \left[1 - \exp\left(-\frac{z_i - H_0}{H_j} \right) \right]},$$

где $H_0 = 200 \text{ км};$

30 $H_1 = 325 \text{ км};$

$H_2 = 32,5 \text{ км};$

$$z_i = \sqrt{R_e^2 + 2R_e R_i \sin \alpha_i + R_i^2} - R_e \quad \text{- высота источника излучения;}$$

R_e - радиус Земли;

35 α_i - угол места i -го навигационного космического аппарата (НКА) относительно навигационной аппаратуры потребителя (НАП);

R_i - расстояние от i -го НКА до приемника излучения;

$$40 \quad \gamma^{-1} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{\frac{h_2}{h_1 - h_2}} - \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{\frac{h_1}{h_1 - h_2}} = 1,435;$$

c - скорость света в вакууме;

f_i - частота сигнала i -го НКА;

τ_{ci} - измеренное время распространения сигнала от i -го НКА до НАП;

$$45 \quad R_i = \sqrt{(x_{ci} - x)^2 + (y_{ci} - y)^2 + (z_{ci} - z)^2}$$

$$\cos(90^\circ - \alpha_i) = \frac{x(x_{ci} - x) + x(z_{ci} - z) + z(z_{ci} - z)}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2 R_i}},$$

где x, y, z - координаты НАП;

50 x_{ci}, y_{ci}, z_{ci} - координаты i -го НКА,

и на последующие моменты времени рассчитывают задержку распространения сигнала в ионосфере по формуле

$$S_i = \frac{4,03 \cdot 10^7}{f_i^2} \gamma N_m \frac{1}{\sin \alpha_1} \sum_{j=1}^{j=2} (-1)^{j+1} H_j \left[1 - \exp\left(-\frac{z_i - H_0}{H_j}\right) \right].$$

для i -го НКА.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50