

В. И. Бабуров¹, Н. В. Васильева¹, Н. В. Иванцевич^{1, 2}

¹ АО «Навигатор», ² БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ЭКВИВАЛЕНТЫ ИОНОСФЕРНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ НАВИГАЦИОННЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ ПО ГЛОНАСС

В статье анализируются статистические характеристики ионосферных погрешностей радионавигационных параметров в спутниковой радионавигационной системе (СРНС), их изменчивость в пространстве и времени, устанавливаются пространственно-временные эквиваленты. Указанные характеристики полезны при решении таких задач, как выбор типа контрольно-корректирующей станции (ККС), расчет рабочей зоны ККС, оценка эффективности применения дифференциального режима в аппаратуре потребителей СРНС, а также при исследовании других вариантов относительных местоопределений в СРНС. Для получения статистических характеристик влияния ионосферы на точность навигационных определений было проведено имитационное моделирование, в ходе которого потребитель помещался в случайную точку на поверхности Земли. Моменты времени и характеристики солнечной активности также выбирались случайным образом из интервалов их вероятных значений. Рассчитывались погрешности дальномерных измерений, первых и вторых разностей дальномерных измерений, сформированных определенным образом. Полученные данные представлены в виде вероятностных распределений ионосферных погрешностей и их статистических характеристик – средних и среднеквадратических значений. Определены пространственно-временные эквиваленты ионосферных погрешностей.

Ключевые слова: вероятностные распределения, спутниковая радионавигационная система, дальномерные измерения

Введение

Один из основных источников погрешностей при местоопределениях в спутниковой радионавигационной системе (СРНС) связан с распространением радиосигналов в атмосфере Земли [1–3]. Неоднородность электрических параметров земной атмосферы, обусловленная наличием в ней нейтральных газов, осадков, свободных зарядов, приводит к преломлению (рефракции) радиоволн, следствием чего является искривление их траекторий, поглощение электромагнитной энергии в осадках и ионизированных областях атмосферы, переизлучение электромагнитной энергии неоднородностями в тропосфере и ионосфере.

Различают ионосферную и тропосферную рефракции. Обычно предполагается [1, 2], что общая атмосферная рефракционная погрешность есть сумма ионосферной и тропосферной. Рассмотрим ионосферную погрешность измерений псевдодальностей в спутниковой радионавигационной системе, ее изменчивость в пространстве и времени, определим пространственно-временные эквиваленты. Эти характеристики полезны при выборе типа контрольно-корректирующей станции (ККС),

расчете рабочей зоны ККС, оценке эффективности применения дифференциального режима в аппаратуре потребителей СРНС, исследовании других вариантов относительных местоопределений в СРНС.

Статистические модели ионосферных дальномерных погрешностей

Наиболее полными вероятностными характеристиками ионосферных погрешностей квазидальномерных измерений ΔR_{ion} являются законы распределений вероятностей $P(\Delta R_{ion})$. Для их построения требуется либо большой объем многолетних экспериментальных данных, полученных в разных районах земного шара, либо глобальная модель ионосферы – протоносфера, достаточно хорошо согласующаяся с экспериментальными данными, а также статистические характеристики ее параметров.

На практике в аналитических расчетах получили распространение двумерная модель сферически-слоистой ионосферы [4] и более точная трехмерная модель [5, 6 и др.], отражающая глобальное распределение широкомасштабных вариаций плотности электронов в ионосфере, которые обусловлены

сезонными и дневными циклами и изменениями солнечной активности.

При построении законов распределения ионосферных дальномерных погрешностей была использована трехмерная модель ионосферы – про-тоносфера [7–9]:

$$\Delta R_{ion} = \Delta R_{ion}\{\varphi_{\Pi}, \lambda_{\Pi}, H_{\Pi}; \varphi_c, \lambda_c, H_c; t_1, t_2; K_p, w\},$$

где входными параметрами являются широта, дол-гота, высота потребителя ($\varphi_{\Pi}, \lambda_{\Pi}, H_{\Pi}$) и спутника ($\varphi_c, \lambda_c, H_c$), местное время потребителя (Π) t_1 , номер ме-сяца t_2 в году и среднемесячное число солнечных пятен w (число Вольфа).

Для получения статистических характеристик влияния ионосферы на точность навигационных определений было проведено имитационное мо-делирование, в ходе которого Π помещался в слу-чайную точку на поверхности Земли [10]. Моменты времени, на которые рассчитывалось рабочее созвездие (РС) для выбранного положения Π , выби-рались случайными из интервала длительностью один год. Характеристика солнечной активности w также выбиралась случайным образом из интер-вала наиболее вероятного изменения, $w \in [20; 100]$.

Результаты моделирования показали [5], что значения ионосферных дальномерных погрешно-стей, рассчитанные по двумерной и трехмерной моделям, различаются в среднем приблизительно на 35%, в то время как среднеквадратические от-клонения отличаются более чем в 3 раза. Поэтому для дальнейших исследований использовалась трехмерная модель ионосферы [7–9].

Статистические модели ионосферных по-грешностей разностей дальностей

Для практических применений представляют интерес статистические характеристики погреш-ностей измерений первых и вторых разностей от-счетов квазидальностей, образуемых различными способами. Ионосферные погрешности таких раз-ностных отсчетов $\Delta(\Delta R_{ion})$ могут быть сведены к следующим разностям первого ($\Delta_r(\Delta R_{ion}), \Delta_{\tau}(\Delta R_{ion})$) и второго ($\Delta_{r\tau}(\Delta R_{ion})$) порядков, а также к их линей-ным комбинациям [1]:

$$\Delta_r(\Delta R_{ion}) = \Delta R_{ion}(t_i; \Pi_1; N_j) - \Delta R_{ion}(t_i; \Pi_2; N_j), \quad (1)$$

$$\Delta_{\tau}(\Delta R_{ion}) = \Delta R_{ion}(t_1; \Pi_i; N_j) - \Delta R_{ion}(t_2; \Pi_i; N_j), \quad (2)$$

$$\Delta_{r\tau}(\Delta R_{ion}) = \Delta R_{ion}(t_1; \Pi_1; N_j) - \Delta R_{ion}(t_2; \Pi_2; N_j), \quad (3)$$

$$i = 1, 2; j = 1, \dots, n, n \leq n_B.$$

Индексы r и τ означают соответственно про-странственный и временной разносы пар от-счетов, образующих разность. Входящие в фор-мулы (1)–(3) ионосферные погрешности ΔR_{ion} измерения квазидальностей от потребителей

$\Pi \in [\Pi_1, \Pi_2]$ до навигационных ИСЗ (НИСЗ) с номе-рами $N_j, j \in [1, \dots, n], n \leq n_B$, где n_B – число видимых НИСЗ на момент времени $t \in [t_1, t_2]$, зависят как от взаимного расположения Π и НИСЗ, местного времени, так и от гео- и гелиофизических условий, причем последние за срок эксплуатации спутнико-вой РНС могут существенно изменяться.

В силу глобальности и непрерывности СРНС взаимное расположение Π – НИСЗ также пере-менно. Поэтому величины $\Delta(\Delta R_{ion})$ могут принимать различные значения. Для их описания удобно поль-зоваться законами распределения $P\{\Delta(\Delta R_{ion})\}$, по-строенными с учетом возможных интервалов изме-нения всех определяющих погрешности факторов.

Для построения распределений $P\{\Delta(\Delta R_{ion})\}$ было проведено имитационное моделирование, анало-гичное описанному выше, при следующих усло-виях: один потребитель располагался случайным образом на поверхности Земли; конфигурация сети спутников соответствовала системе ГЛОНАСС; момент времени t_1 выбирался равновероятным из интервала длительностью 1 год; рассчитыва-лись координаты всех НИСЗ системы на момент времени t_1 ; определялись НИСЗ N_{j1} , входящие в зону радиовидимости (ЗРВ) первого потребителя (n_{B1}); минимально допустимым углом α возвыше-ния НИСЗ над горизонтом Π принимался $\alpha = 10^\circ$. При построении двумерного закона распределения $P\{\Delta_{r\tau}(\Delta R_{ion})\}$ второй потребитель (Π_2) располагался на заданном удалении r от первого в произвольном направлении; момент времени t_2 смещался относи-тельно t_1 на заданную величину $\Delta t, t_2 = t_1 + \Delta t$. Да-лее рассчитывались координаты спутников $N_{j1} \in [1, \dots, n_1]$ на момент времени t_2 и производилась про-верка их принадлежности к ЗРВ второго потреби-теля. Для дальнейшей работы отбирались только НИСЗ, входящие в совместную ЗРВ обоих потре-бителей. Отдельно строились одномерные распре-деления $P\{\Delta_r(\Delta R_{ion})\}$ и $P\{\Delta_{\tau}(\Delta R_{ion})\}$. В первом случае оба измерения соответствовали одному и тому же моменту времени ($t_2 = t_1$), а во втором – оба потре-бителя располагались в одной и той же точке про-странства ($r = 0$).

Результаты моделирования навигационных определений по первым разностям одномоментных измерений квазидальностей с двух разнесенных в пространстве пунктов до одного и того же НИСЗ представлены на рис. 1 и в табл. 1. На рис. 1 даны вероятностные кривые P_1 распределения разностей ионосферных задержек $\Delta_r(\Delta R_{ion})$ при различных зна-чениях территориального разноса r между пунктами ($r = 10; 40; 50; 100; 200; 500; 1000$ км), а на рис. 2 – кривые вероятностей P_2 непревышения разностью ионосферных задержек $\Delta_r(\Delta R_{ion})$ заданной величины ($\Delta_r(\Delta R_{ion})_0 = 0,1; 0,5; 1; 1,5$ м), в зависимости от тер-риториального разноса пунктов r . Средние значения

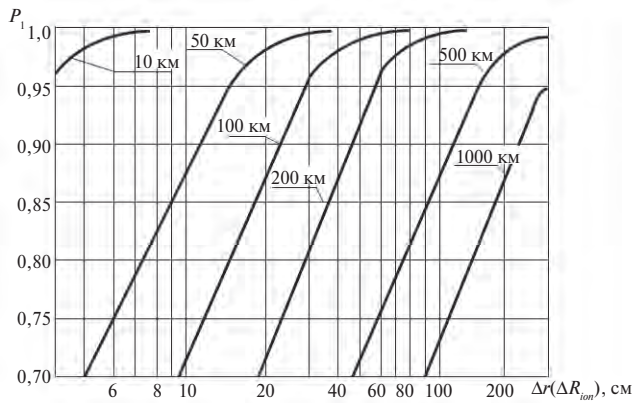


Рисунок 1. Распределение ионосферных погрешностей первых разностей измерений дальностей до одного и того же НИСЗ с двух разнесенных в пространстве пунктов: P_1 – вероятность; $\Delta_r(\Delta R_{ion})$ – ионосферная погрешность первых разностей измерений дальностей до одного и того же НИСЗ с двух пунктов, разнесенных в пространстве на расстояние r , равное 10, 50, 100, 200, 500, 1000 км

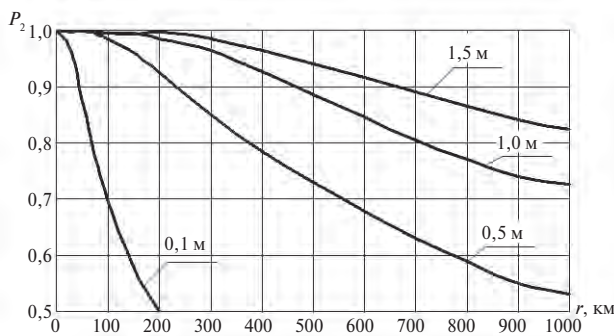


Рисунок 2. Вероятности неперевышения первыми разностями ионосферных погрешностей заданной величины при одномоментных измерениях в зависимости от территориального разнеса пунктов: P_2 – вероятность; r – территориальный разнос приемных пунктов; $\Delta_r(\Delta R_{ion})_0$, равное 0,1, 0,5, 1, 1,5 м, допустимые значения ионосферных погрешностей

M разностей ионосферных задержек и среднеквадратические отклонения σ этих величин при различных значениях r представлены в табл. 1.

С помощью приведенных данных можно оценить, с какой вероятностью разностная ионосферная погрешность не превысит заданную величину, и допустимый территориальный разнос между пунктами Π_1 и Π_2 , при котором с заданной вероятностью P_2 остаточная ионосферная погрешность измерения не превысит заданную величину. В табл. 2 приведены значения r , соответствующие вероятности

Таблица 1. Статистические характеристики распределений P_1

r , км	$M\{\Delta(\Delta R_{ion})\}$, см	$\sigma\{\Delta(\Delta R_{ion})\}$, см
10	0,93	1,78
40	3,50	4,60
50	4,52	6,10
100	8,78	10,98
200	17,62	21,62
500	43,68	53,50
1000	84,06	104,01

Таблица 2. Допустимый территориальный разнос пунктов с вероятностью $P_2 = 0,9$

$\Delta_r(\Delta R_{ion})_0$, м	0,1	0,5	1,0	1,5
r , км	45	230	460	665

$P_2 = 0,9$, при нескольких значениях допустимой остаточной ионосферной погрешности $\Delta_r(\Delta R_{ion})_0$.

Результаты моделирования навигационных определений по первым разностям при разновременных измерениях квазидальностей с одного и того же пункта до одного и того же НИСЗ представлены на рис. 3, 4 и в табл. 3.

На рис. 3 даны вероятностные кривые P_3 распределения разностей ионосферных задержек $\Delta_\tau(\Delta R_{ion})$ при различных значениях временного интервала Δt между соседними отсчетами квазидальностей (Δt , равный 1, 4, 5, 10, 12,5 мин); рис. 4 содержит кривые вероятностей P_4 неперевышения остаточными погрешностями $\Delta_\tau(\Delta R_{ion})$ тех же значений $\Delta_\tau(\Delta R_{ion})_0$, что и на рис. 2, в зависимости от временного интервала Δt . Средние значения разностей ионосферных задержек и среднеквадратические отклонения этих величин при различных Δt представлены в табл. 3.

Данные, содержащиеся на рис. 3 и 4, позволяют оценивать вероятность неперевышения остаточной ионосферной погрешностью $\Delta_\tau(\Delta R_{ion})$ заданной величины, а также установить допустимый интервал неодновременности отсчетов Δt при заданной вероятности P_4 . Величины Δt_0 при $P_4 = 0,9$ приведены в табл. 4.

Анализ приведенных данных об остаточных ионосферных погрешностях первых разностей $\Delta_r(\Delta R_{ion})$ и $\Delta_\tau(\Delta R_{ion})$ показал, что характер вероятностных кривых, приведенных на рис. 1 и 3, а также на рис. 2 и 4, одинаков. Более детальный расчет позволил установить существование пространственно-временного эквивалента

$$\tau_0 \leftrightarrow R_0,$$

такого, что

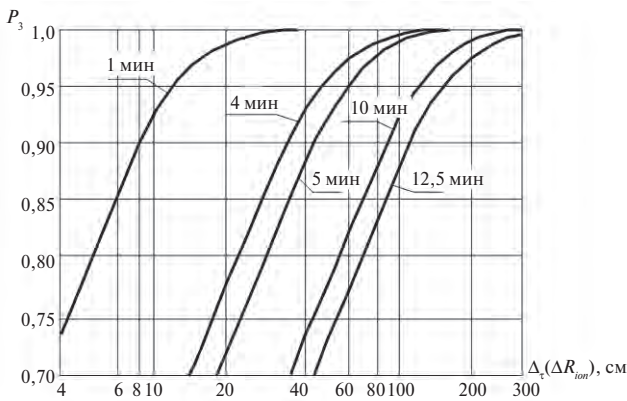


Рисунок 3. Распределение ионосферных погрешностей разностей одновременных измерений дальностей до одного и того же НИСЗ с одного пункта: P_3 – вероятность; $\Delta_{\tau}(\Delta R_{ion})$ – ионосферная погрешность разности измерений дальности; Δt – временной интервал между соседними измерениями; Δt , равный 1, 4, 5, 10, 12,5 мин

$$P_1(kR_0) \approx P_3(k\tau_0), P_2(kR_0) \approx P_4(k\tau_0).$$

В рассмотренном диапазоне значений $\{\tau, r\}$ величины τ_0 и R_0 имеют следующие значения:

$$\tau_0 = 1 \text{ мин}, R_0 = 40 \text{ км}.$$

Для некоторых случаев могут оказаться полезными не статистические характеристики остаточных ионосферных погрешностей, а их максимальные значения. В данной работе не ставилась задача определения таких величин, поскольку использованная при расчетах модель ионосферы – протоносфера, как и любая имитационная модель, не может в полной мере отражать все возможные ситуации. Однако некоторое представление о таких значениях дают максимальные из полученных при моделировании величин $\max\{\Delta(\Delta R_{ion})\}$. Некоторые из них приведены в табл. 5.

Сопоставив данные из табл. 5 и 3, убеждаемся, что максимальные значения остаточной ионосферной погрешности больше среднеквадратического отклонения в 8–16 раз. Это свидетельствует о существенном отличии законов распределения этих погрешностей от нормального.

Кривые распределений остаточных ионосферных погрешностей P_5 при навигационных определениях по вторым разностям представлены на рис. 5 для ряда значений пространственно-временного разноса $\{r; \Delta t\}$. Соответствующие им средние значения и среднеквадратические отклонения приведены в табл. 6.

Характер кривых P_5 аналогичен распределениям P_1 и P_3 , поэтому была предпринята попытка представить двухпараметрическое распределение P_5 однопараметрическим с эквивалентным параме-

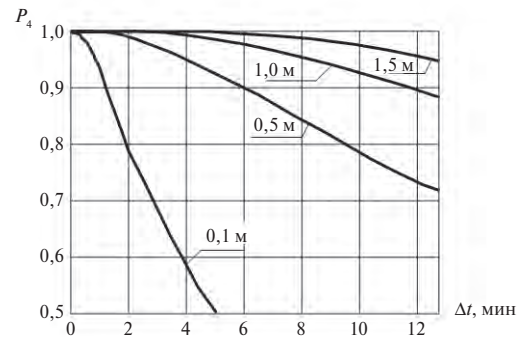


Рисунок 4. Вероятности не превышения первыми разностями ионосферных погрешностей заданной величины при одновременных измерениях в зависимости от временного интервала между соседними измерениями: P_4 – вероятность; Δt – временной интервал между соседними отсчетами квазидальностей с одного и того же пункта до одного и того же НИСЗ; $\Delta_{\tau}(\Delta R_{ion})_0$ – допустимое значение ионосферных погрешностей, равное 0,1, 0,5, 1,0, 1,5 м

Таблица 3. Статистические характеристики распределений P_3

Δt , мин	$M\{\Delta_{\tau}(\Delta R_{ion})\}$, см	$\sigma\{\Delta_{\tau}(\Delta R_{ion})\}$, см
1	3,53	4,49
4	14,1	18,1
5	17,5	22,2
10	34,4	43,2
12,5	42,8	53,6

Таблица 4. Допустимый интервал неодновременности отсчетов с вероятностью $P_4 = 0,9$

$\Delta_{\tau}(\Delta R_{ion})_0$, м	0,1	0,5	1,0	1,5
Δt_0 , мин	1,2	5,4	11,4	>12,5

Таблица 5. Максимальные значения ионосферных погрешностей

Δt , мин	4	5	12,5
$\max\{\Delta_{\tau}(\Delta R_{ion})\}$, см	281,4	289,6	461,7

тром r_3 или Δt_3 . В результате проведенного сопоставительного анализа удалось установить существование для двухпараметрического распределения $P_5\{r; \Delta t\}$ пространственно-временного эквивалента

$$\{r; \Delta t\} \leftrightarrow \{r_3; \Delta t_3\},$$

такого, что

$$P_5\{r; \Delta t\} \approx P_1\{r_3\} = P_3\{\Delta t_3\},$$

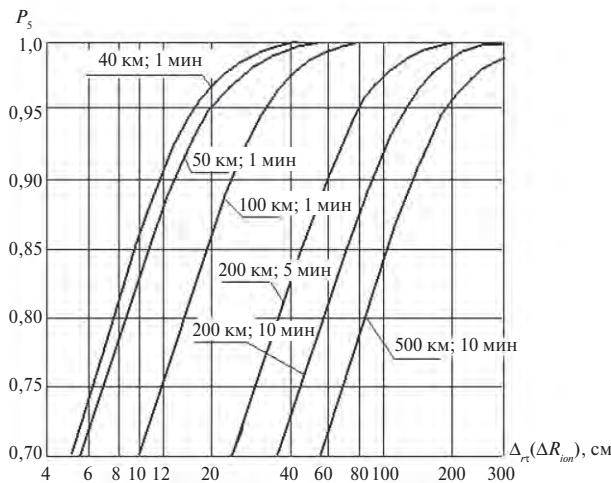


Рисунок 5. Распределение ионосферных погрешностей вторых разностей неодновременных измерений дальностей до одного и того же НИСЗ с двух разнесенных в пространстве пунктов: P_5 – вероятность; $\Delta_{r,t}(\Delta R_{ion})$ – ионосферная погрешность вторых разностей неодновременных измерений дальностей до одного и того же НИСЗ с двух разнесенных в пространстве пунктов; $\{r; \Delta t\}$ – принятый при моделировании пространственно-временной разнос измерений: $\{40 \text{ км}; 1 \text{ мин}\}$, $\{50 \text{ км}; 1 \text{ мин}\}$, $\{100 \text{ км}; 1 \text{ мин}\}$, $\{200 \text{ км}; 1 \text{ мин}\}$, $\{200 \text{ км}; 10 \text{ мин}\}$, $\{500 \text{ км}; 10 \text{ мин}\}$

причем

$$r_3 = fR_0, \Delta t_3 = f\tau_0, f = [(r/R_0)^2 + (\Delta t/\tau_0)^2]^{0.5}.$$

Величины R_0 и τ_0 имеют те же значения, что и ранее: $\tau_0 = 1 \text{ мин}$; $R_0 = 40 \text{ км}$.

Относительная погрешность, возникающая при такой замене двухпараметрического распределения однопараметрическим, составляет менее 5%.

Выводы

В результате проведенного численного имитационного моделирования были получены распре-

Таблица 6. Статистические характеристики распределений P_5

r , км	Δt , мин	$M\{\Delta_{r,t}(\Delta R_{ion})\}$, см	$\sigma\{\Delta_{r,t}(\Delta R_{ion})\}$, см
40	1	4,77	6,24
50	1	5,42	7,03
100	1	9,15	11,7
200	5	23,2	29,3
200	10	35,4	44,2
500	10	51,9	65,6

деления вероятностей ионосферных погрешностей измерений квазидальномерных в СРНС, первых и вторых их разностей, рассчитаны средние и среднеквадратические значения распределений.

Характер кривых однопараметрических распределений при пространственном и временном разносах квазидальномерных отсчетов одинаков; установлен пространственно-временной эквивалент, применение которого позволяет производить замену одного однопараметрического распределения остаточных ионосферных погрешностей разностных измерений другим распределением.

Максимальные среди полученных при моделировании значения остаточных ионосферных погрешностей разностных измерений существенно, в 8–16 раз, отличаются от среднеквадратических отклонений, что свидетельствует о значительных отличиях распределения остаточных ионосферных погрешностей разностных измерений от нормального при высоких значениях вероятностей.

Характер кривых двухпараметрических распределений, соответствующих пространственно-временному разносу квазидальномерных отсчетов, тот же, что и однопараметрических; установлен пространственно-временной эквивалент, применение которого позволяет производить замену двухпараметрического распределения однопараметрическим.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриев П. П., Шебшаевич В. С., Иванцевич Н. В. и др. Сетевые спутниковые радионавигационные системы. М.: Радио и связь, 1993. 408 с.
2. Соловьев Ю. А. Системы спутниковой навигации. М.: Эко-Трендз, 2000. 270 с.
3. Авиационная радионавигация: справочник / А. А. Сосновский, И. А. Хаймович, Э. А. Лутин, И. Б. Максимов; под ред. А. А. Сосновского. М.: Транспорт, 1990. 264 с.
4. Колосов М. А., Арманд Н. А., Яковлев О. И. Распространение радиоволн при космической связи. М.: Связь, 1969. 156 с.
5. Авиационная электросвязь. Приложение 10 к Конвенции о международной гражданской авиации. Радионавигационные средства. 6-е изд. Т. 1. Международная организация гражданской авиации, 2006. 636 с.
6. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. 4-е изд. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
7. Саенко Ю. С., Нацвалян Н. С., Шагимурагов И. И. Аналитическая модель распределения заряженных частиц в плазмосфере Земли // Моделирование ионосферных процессов и распространение радиоволн. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1982. С. 45–52.

8. Нацвалян Н. С., Саенко Ю. С., Тепеницына Н. Ю. Планетарная структура протоносферы в спокойных условиях // Ионосферные исследования. 1988. № 44. С. 56–60.
9. Нацвалян Н. С., Саенко Ю. С., Тепеницына Н. Ю. Планетарная структура F2-слоя ионосферы в спокойных условиях и характер ее влияния на распространение радиоволн // Ионосферные исследования. 1988. № 44. С. 61–65.
10. Совместное использование навигационных полей спутниковых радионавигационных систем и сетей псевдоспутников / В. И. Бабуров, Н. В. Иванцевич, Н. В. Васильева, Э. А. Панов. СПб.: Агентство «РДК-Принт», 2005. 264 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бабуров Владимир Иванович, д.т.н., генеральный директор, АО «Навигатор», Российская Федерация, 199106, Санкт-Петербург, Шкиперский проток, 14, лит. 3, корп. 19, офис 325, e-mail: baburov@navigat.ru.

Васильева Наталья Валентиновна, к.т.н., старший научный сотрудник, АО «Навигатор», Российская Федерация, 199106, Санкт-Петербург, Шкиперский проток, 14, лит. 3, корп. 19, офис 325, e-mail: vasileva@navigat.ru.

Иванцевич Наталия Вячеславовна, д.т.н., главный научный сотрудник, АО «Навигатор», Российская Федерация, 199106, Санкт-Петербург, Шкиперский проток, 14, лит. 3, корп. 19, офис 325; профессор, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1, тел.: 8 (812) 495-77-58, e-mail: ivantsevich@navigat.ru, bgty_e6@mail.ru.

For citation: Baburov V. I., Vasileva N. V., Ivantsevich N. V. Space-time equivalents of ionospheric errors on GLONASS positioning. Voprosy radioelektroniki, 2019, no. 6, pp. 6–12. DOI 10.21778/2218-5453-2019-6-6-12

V. I. Baburov, N. V. Vasileva, N. V. Ivantsevich

SPACE-TIME EQUIVALENTS OF IONOSPHERIC ERRORS ON GLONASS POSITIONING

The article analyzes statistical characteristics of the ionospheric errors of pseudorange on GLONASS positioning their variability in space and time and establishes space-time equivalents. These characteristics are useful to solve problems such as the choice of the fixed ground-based reference station type, the calculation of the working area of the reference station, the effectiveness evaluation of the differential mode using in the GLONASS receivers and in the study of other options for relative GNSS positioning. To obtain the statistical characteristics of the ionosphere influence on the GLONASS positioning accuracy were conducted, simulation modeling, in which the user was located on the Earth's surface at a point with random coordinates. Moments of time and characteristics of solar activity were also chosen randomly from the intervals of their possible change. The positioning errors, the single and double differences of pseudorange formed in a certain way were calculated. The results are presented in the form of probability distributions of ionospheric errors and their statistical characteristics – mean and standard deviation. Space-time equivalents are determined.

Keywords: probability distribution, satellite radio navigation system, distance measuring

REFERENCES

1. Dmitriev P. P., Shebshaevich B. C., Ivantsevich N. V., et al. *Setevye sputnikovye radionavigatsionnye sistemy* [Network satellite radio navigation systems]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1993, 408 p. (In Russian).
2. Solovov Yu. A. *Sistemy sputnikovoj navigatsii* [Satellite navigation systems]. Moscow, Eko-Trendz Publ., 2000, 270 p. (In Russian).
3. Sosnovskii A. A., Khaimovich I. A., Lutin E. A., Maksimov I. B. *Aviacionnaya radionavigaciya: spravochnik* [Aviation radio navigation: a reference book]. Sosnovskiy A. A., editor. Moscow, Transport Publ., 1990, 264 p. (In Russian).
4. Kolosov M. A., Armand N. A., Yakovlev O. I. *Rasprostranenie radiovoln pri kosmicheskoy svyazi* [Propagation of radio waves at cosmic communication]. Moscow, Svyaz Publ., 1969, 156 p. (In Russian).
5. *Air electric communication. Application 10 to the Convention on international civil aviation. Radio navigational resorts*. 6th ed. Vol. 1. International Civil Aviation Organization, 2006, 636 p.
6. Perov A. I., Harisov V. N., editors. *GLONASS. Principy postroeniya i funkcionirovaniya* [GLONASS. Principles of construction and functioning]. 4th ed. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010, 800 p. (In Russian).
7. Saenko Yu. S., Natsvalyan N. S., Shagimuratov I. I. Analytical model of the distribution of charged particles in the Earth's plasmosphere. In: *Modelirovanie ionosfernykh protsessov i rasprostranenie radiovoln*. Irkutsk, Irkutsk university's Publ., 1982, pp. 45–52. (In Russian).
8. Natsvalyan N. S., Saenko Yu. S., Tepenitsyna N. Yu. Planetary structure of the protonosphere in calm conditions. *Ionosfernye issledovaniya*, 1988, no. 44, pp. 56–60. (In Russian).
9. Natsvalyan N. S., Saenko Yu. S., Tepenitsyna N. Yu. Planetary structure of the F2-layer of the ionosphere in calm conditions and the nature of its influence on the propagation of radio waves. *Ionosfernye issledovaniya*, 1988, no. 44, pp. 61–65. (In Russian).
10. Baburov V. I., Ivantsevich N. V., Vasileva N. V., Panov E. A. *Sovmestnoe ispolzovanie navigacionnyh polej sputnikovyh radionavigacionnyh sistem i setej psevdosputnikov* [Shared use of navigation fields of satellite radionavigation systems and pseudolite networks]. Saint-Petersburg, RDK-Print Publ., 2005, 264 p. (In Russian).

AUTHORS

Baburov Vladimir, D. Sc., head of research centre, Navigator SC, 14/9, Shkiperskiy protok, Saint-Petersburg, 199106, Russian Federation, e-mail: baburov@navigat.ru.

Vasileva Natalya, Ph. D., senior researcher, Navigator SC, 14/9, Shkiperskiy protok, Saint-Petersburg, 199106, Russian Federation, e-mail: vasileva@navigat.ru.

Ivantsevich Nataliya, D. Sc., chief researcher, Navigator SC, 14/9, Shkiperskiy protok, Saint-Petersburg, 199106, Russian Federation; assistant professor, Ustinov Baltic State Technical University «VOENMEH», 1, 1st Krasnoarmejskaja St., Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation, tel.: +7 (812) 316-24-77, e-mail: ivantsevich@navigat.ru, bgty_e6@mail.ru.