

Kuchukov Viktor Andreevich, PhD student of the Department of Applied Mathematics and Mathematical Modeling, North Caucasian Federal University, Stavropol, Russian Federation, Tel.: +79097537700. E-mail: viktor-kuchukov@yandex.ru

Chervyakov Nikolay Ivanovich, Doctor of Technical Science, Professor, the Head of Department of Applied Mathematics and Mathematical Modeling, North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation. Tel.: +78652354861. E-mail: k-fmf-primath@stavsru

References

1. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Digital Image Processing*. 3rd Edition. Prentice-Hall, Inc., 2008. 954 p. (Russ. ed.: Gonsales R., Vuds R. *Cifrovaja obrabotka izobrazhenij*. Izdanie 3-e, ispravlennoe i dopolnennoe. Moscow, Tehnosfera, 2012. 1104 p.).
2. Rosenfeld A., Kak A. *Digital Picture Processing. Vol. 1*. Academic Press, Incorporated, 1982.
3. Chervyakov N.I. Realizacija vysokojeffektivnoj moduljarnoj cifrovoj obrabotki signalov na osnove programmiruemyh logicheskikh integral'nyh shem [Realization highly effective modular digital processing of signals on the basis of program logic integrated schemes]. *Nejrokomputery: razrabotka, primenenie*, 2006, no. 3, pp. 24-36.
4. Ammar A., Al Kabbany A., Youssef M., Amam A. A secure image coding scheme using residue number system. *Radio Science Conference, 2001. NRSC 2001. Proceedings of the Eighteenth National*. IEEE, 2001, vol. 2, pp. 399-405. doi: 10.1109/NRSC.2001.929397.
5. Omondi A., Premkumar B. *Residue number systems: theory and implementation*. Imperial College Press, 2007. 312 p.
6. Taleshmekeail D.K., Mousavi A. The use of residue number system for improving the digital image processing. *Signal Processing (ICSP)*, 2010, pp. 775-780. doi: 10.1109/ICOSP.2010.5655920.
7. Chervyakov N.I., Sahnyuk P.A., Shaposhnikov A.V., Makokha A.N. *Nejrokomputery v sisteme ostatochnyh klassov* [Neurocomputers in residue number system.]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2003. 272 p.
8. Chervyakov N.I., Averbukh V.M., Babenko M.G., Lyakhov P.A., Gladkov A.V., Gapochkin A.V. Priblizhennyj metod vypolnenija nemodul'nyh operacij v sisteme ostatochnyh klassov [An approximate method for performing non-modular operations in residue number system]. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2012, no. 6, pp. 189-193.
9. Chervyakov N.I., Babenko M.G., Lyakhov P.A., Lavrinenko I.N. Priblizhennyj metod opredelenija znaka chisla v sisteme ostatochnyh klassov i ego tehničeskaja realizacija [Approximate method for determining character number in the residue number system and its technical realization]. *Nauchno-tehničeskije vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikacii. Upravlenie*, 2013, no. 4, pp. 131-141.
10. Akushskii I.J., Yuditskii D.I. *Mashinnaja arifmetika v ostatochnyh klassah* [Machine arithmetic residual classes]. Moscow, Sov. radio Publ., 1968. 440 p.

Received 08.09.2015

УДК 621.371: 550.388

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОНИТОРИНГА ИНДЕКСА МЕРЦАНИЙ ИОНОСФЕРЫ

Шевченко В.А.¹, Чипига А.Ф.², Пашинцев В.П.², Топорков К.И.²

¹Контрактный военнотружсающий, Москва, РФ

²Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, РФ

E-mail: k-fmf-primath@stavsru

Разработана структурная схема комплекса прогнозирования помехоустойчивости систем спутниковой связи по результатам мониторинга мелкомасштабных вариаций полного электронного содержания ионосферы с помощью двухчастотного приемника спутниковой навигации и расчета индекса мерцаний принимаемого сигнала.

Ключевые слова: спутниковая связь, помехоустойчивость, полное электронное содержание ионосферы, мелкомасштабные неоднородности, индекс мерцаний, спутниковая радионавигация, двухчастотный приемник.

Введение

Известно [1-2], что помехоустойчивость систем спутниковой связи (ССС) может снижаться на несколько порядков при возникновении мерцаний (сцинтилляций, замираний) принимаемых сигналов. Они вызваны возмущениями ионосферы (обычно в районах полярных и экваториальных широт), которые проявляются в образовании интенсивных мелкомасштабных неоднородностей электронной концентрации. Эти мелкомасштабные неоднородности обуславливают рассеяние радиоволн и их многолучевое распространение в точку приема. Мерцания принимаемых в СССР сигналов обычно подчиняются m -распределению Накагами и могут быть очень глубокими. По экспериментальным данным [2], в области экватора индекс мерцаний S_4 может возрастать с обычных (для средних широт) значений $S_4 = 0 \dots 0,2$ до величины $S_4 = 1$.

Поэтому m -параметр Накагами, связанный с S_4 как $m = S_4^{-2}$, может достигать на экваторе значения $m = 1$, соответствующего релейским замираниям. Однако иногда достаточно глубокие мерцания принимаемых в СССР сигналов ($S_4 > 0,3$) могут наблюдаться и в средних широтах. В связи с этим возникает необходимость организации мониторинга возмущений ионосферы, вызванных ростом флуктуаций электронной концентрации в ее мелкомасштабных неоднородностях и индекса мерцаний принимаемых сигналов, в целях прогнозирования помехоустойчивости СССР.

Постановка задачи

Согласно [3] помехоустойчивость приема сигналов при передаче дискретных сообщений и распределении Накагами принимаемых сигналов определяется зависимостью $P_{\text{ош}} = \psi(\langle h^2 \rangle, m)$ вероятности ошибочного приема информационных символов $P_{\text{ош}}$ от среднего энергетического отношения «сигнал/шум» на входе приемника $\langle h^2 \rangle$ и m -параметра Накагами.

Индекс мерцаний S_4 в трансionoсферном (спутниковом) канале связи (определяющий параметр Накагами $m = S_4^{-2}$) проще всего можно определить путем непосредственных измерений с помощью двухчастотного приемника NovAtel GPStation – 6-спутниковой радионавигационной системы (СРНС) GPS / ГЛОНАСС [4]. Однако временные ряды измерений индекса мерцаний на выходе двухчастотного приемника GPStation – 6 формируются с недостаточной точностью.

Это обусловлено тем, что интервал дискретизации рядов $S_4(t)$ составляет 1 мин. [4], тогда

как для измерения параметров мелкомасштабных (с размерами порядка 100...1000 м) неоднородностей ионосферы необходима частота отсчетов не ниже 50 Гц (то есть через 0,02 с) [5]. Кроме того, в ряды измерений во времени индекса мерцаний принимаемых сигналов $S_4(t)$, помимо многолучевости из-за рассеяния на неоднородностях ионосферы, вносит свой вклад и многолучевость из-за отражения на неровностях рельефа местности.

Поэтому для повышения точности определения индекса мерцаний $S_4(t)$ принимаемого сигнала целесообразно использовать возможности [6] двухчастотного приемника GPStation-6 по проведению измерений временных рядов полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы $N_T(t)$ с последующим выделением из них рядов вариаций ПЭС, обусловленных мелкомасштабными неоднородностями $\Delta N_{TM}(t)$. Это позволит оценить влияние статистических характеристик (например, среднеквадратического отклонения) мелкомасштабных вариаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta TM}(t)$ на изменение во времени индекса мерцаний принимаемого в СССР сигнала $S_4(t) = \psi(\sigma_{\Delta TM}(t))$, параметра Накагами трансionoсферного канала связи $m(t) = S_4^{-2}(t)$ и на помехоустойчивость приема сигналов $P_{\text{ош}}(t) = \psi(\langle h^2 \rangle, m(t))$.

Целью статьи является разработка структуры построения комплекса прогнозирования помехоустойчивости системы спутниковой связи по результатам измерений статистических характеристик мелкомасштабных вариаций полного электронного содержания ионосферы на выходе двухчастотного приемника спутниковой радионавигационной системы и индекса мерцаний принимаемого сигнала.

Принцип построения и работы комплекса прогнозирования помехоустойчивости СССР

Схема на рис.1 иллюстрирует принцип построения и работы комплекса прогнозирования помехоустойчивости СССР по данным мониторинга ионосферы с помощью СРНС. В состав комплекса входит двухчастотный приемник СРНС типа GPStation – 6, блок определения среднеквадратического отклонения (СКО) мелкомасштабных вариаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_{TM}}$ и блок прогнозирования помехоустойчивости $P_{\text{ош}}$.

Суть работы двухчастотной СРНС состоит в следующем [5]. При прохождении через ионо-

сферу радиосигналов, излучаемых на двух несущих частотах: $f_1 \approx 1,6$ ГГц и $f_2 \approx 1,2$ ГГц с космических аппаратов (КА) СРНС, они испытывают разные задержки $\Delta\tau_1$ и $\Delta\tau_2$, а также изменения фаз $\Delta\varphi_1$ и $\Delta\varphi_2$. Это позволяет непрерывно опре-

делять по навигационным измерениям двухчастотного приемника СРНС значение ПЭС ионосферы $N_T \sim (\Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1)$ вдоль радиотрассы «КА СРНС – приемник СРНС» в любой момент t на выходе приемника.

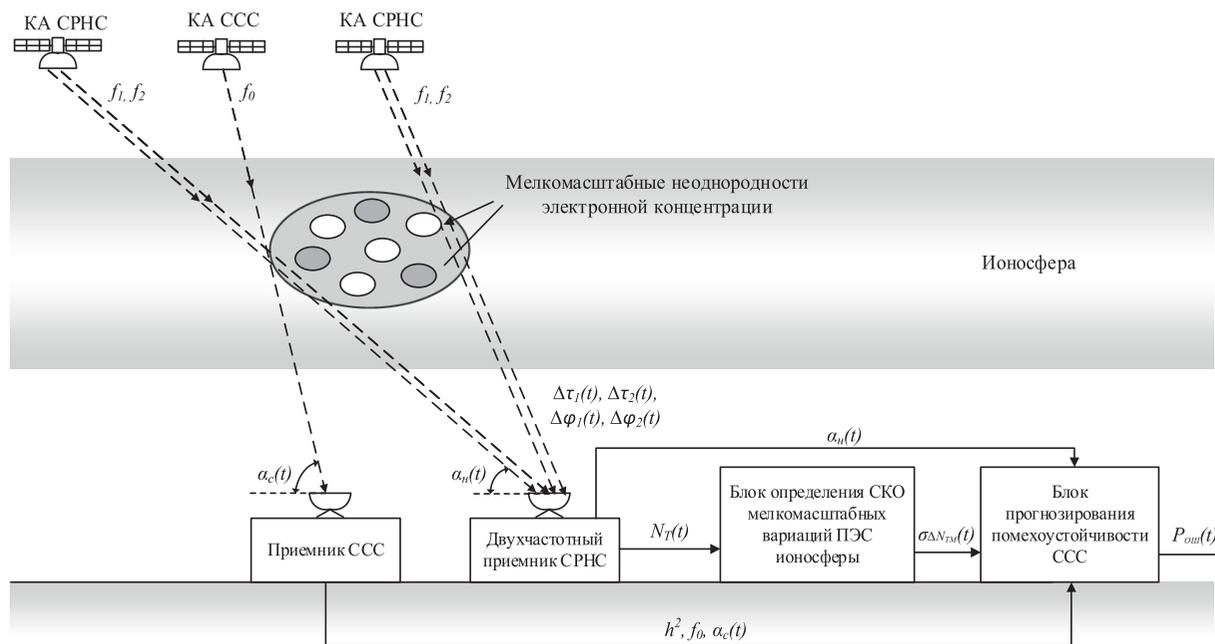


Рис. 1. Принцип построения и работы комплекса прогнозирования помехоустойчивости ССС по данным мониторинга ионосферы

Следует отметить, что временные задержки $\Delta\tau_{1;2}$ и изменения фаз $\Delta\varphi_{1;2}$ навигационных сигналов измеряются двухчастотным приемником NovAtel GPStation-6 непрерывно с интервалом дискретизации $\Delta t_d = 0,02$ с, а величина ПЭС (N_T) – с интервалом 1 с [4]. Однако представляется возможным использовать протокол RANGE в составе платформы NovAtel GPStation-6 так, чтобы и величина ПЭС ионосферы $N_T(t)$ определялась непрерывно во времени с минимальным интервалом дискретизации $\Delta t_d = 0,02$ с, достаточным для измерения вариаций мелкомасштабных неоднородностей $\Delta N_{TM}(t)$.

На рис. 1 показаны положения перемещающегося КА СРНС в моменты времени t_1 и t_2 , соответствующие пересечению радиотрассой области возмущений ионосферы с интенсивными мелкомасштабными неоднородностями электронной концентрации ΔN_{TM} в слое F. Исходными данными для блока определения СКО мелкомасштабных вариаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_{TM}}(t)$ является временной ряд ПЭС ионосферы $N_T(t)$, формируемый на выходе двухчастотного при-

емника СРНС. Изменения $\sigma_{\Delta N_{TM}}$ составляют основу для вычисления изменений во времени индекса мерцаний $S_4(t) = \psi(\sigma_{\Delta TM}(t))$ и параметра Накагами в радиоканале спутниковой навигации $m(t) = S_4^{-2}(t)$. В блоке прогнозирования помехоустойчивости временные изменения $m(t)$ и результаты расчета среднего отношения «сигнал/шум» на входе приемника ССС $\langle h^2 \rangle$ используются для получения искомой зависимости $P_{ош}(t) = \psi(\langle h^2 \rangle, m(t))$.

От приемника ССС к блоку прогнозирования помехоустойчивости поступают сведения о среднем энергетическом отношении «сигнал/шум» на входе приемника $\langle h^2 \rangle$, несущей частоте f_0 и угле прихода сигналов в текущий момент времени $\alpha_c(t)$. Потребность в этих сведениях будет обоснована ниже.

Определение СКО мелкомасштабных вариаций ПЭС в ионосфере

В общем случае временной ряд ПЭС на выходе двухчастотного приемника GPStation-6 будет представлять собой аддитивную смесь несколь-

ких составляющих [5-6]. Известно [5], что в общем случае формируемый на выходе двухчастотного приемника СРНС временной ряд вариаций ПЭС представляет собой аддитивную смесь нескольких составляющих:

$$N_T(t) = N_{T0}(t) + \Delta N_{Tкр}(t) + \Delta N_{Tсп}(t) + \Delta N_{ТМ}(t) + \Delta N_{Тш}(t), \quad (1)$$

где $N_{T0}(t)$ – ПЭС однородной ионосферы (фона); $\Delta N_{Tкр}(t)$, $\Delta N_{Tсп}(t)$ и $\Delta N_{ТМ}(t)$ – вариации ПЭС, обусловленные ионосферными неоднородностями крупного (100...1000 км), среднего (10...100 км) и мелкого (100...1000 м) масштабов соответственно; $\Delta N_{Тш}(t)$ – вариации, обусловленные шумовой погрешностью измерений двухчастотного приемника.

В качестве примера на рис. 2 приведен отрезок временного ряда вариаций ПЭС $N_T(t)$ ионосферы (выраженных в единицах измерения TECU = 10^{16} м⁻²) за время наблюдения 1 ч (с 11:30 до 12:30), полученный 25.07.2015 г. на выходе двухчастотного приемника NovAtel GPStation-6. Этот приемник размещался на базе Северо-Кавказского федерального университета (г. Ставрополь) и принимал навигационные сигналы от КА № 25 СРНС GPS.

Анализ рис. 2 показывает, что в интервале с 11:50 до 12:05 наблюдаются значительные колебания ПЭС (единицей измерения ПЭС является TECU = 10^{16} м⁻²) с характерным периодом до 20-30 с. Такие колебания обусловлены мелкомасштабными неоднородностями электронной концентрации [5]. Подионосферная точка КА № 25 GPS в период времени 11:50 ... 12:05 перемещалась практически вдоль широты 47° по траектории г. Каховка – г. Бердянск (положения этого КА СРНС в моменты времени 11:50 и 12:05 показаны на рис. 1).

Согласно методике [6] на первом этапе обработки временного ряда вариаций ПЭС ионосферы (1) на трассе «КА СРНС – двухчастотный приемник СРНС» (полученного на выходе этого приемника) осуществляется сглаживание $N_T(t)$ скользящим временным окном с шириной равной $t_{сгл1} = 60$ с. Полученный в результате сглаживания тренд $\langle \Delta N_T \rangle = N_{T0}(t) + \Delta N_{Tкр}(t) + \Delta N_{Tсп}(t)$ вычитается из исходного ряда (1). В результате ряд ПЭС принимает вид комбинации мелкомасштабных вариаций и шумов: $N_T(t) = \Delta N_{ТМ}(t) + \Delta N_{Тш}(t)$. На втором этапе обработки полученный ряд вариаций ПЭС $N_T(t) = \Delta N_{ТМ}(t) + \Delta N_{Тш}(t)$ сглаживается простой скользящей средней с окном $t_{сгл2} = 0,1$ с, что обеспечивает удаление шумовой составляющей $\Delta N_{Тш}(t)$.

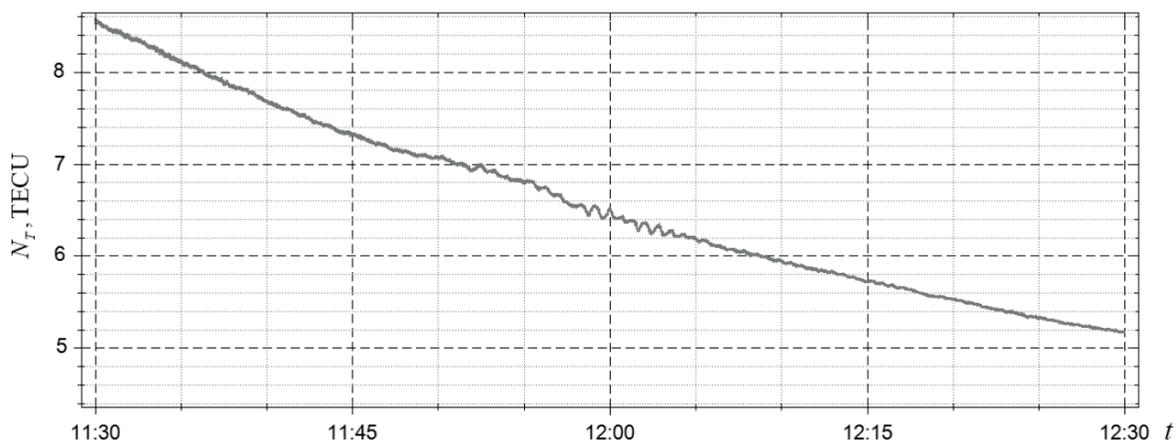


Рис. 2. Вариации полного электронного содержания ионосферы

В итоге после двух этапов обработки из ряда (1) формируется временной ряд вариаций ПЭС $N_T(t) = \Delta N_{ТМ}(t)$, обусловленных только мелкомасштабными неоднородностями ионосферы, представленный на рис. 3.

На третьем этапе обработки из этого ряда (см. рис.3) формируются результаты расчета СКО вариаций ПЭС в мелкомасштабных неоднородностях ионосферы $\sigma_{\Delta N_{ТМ}}(t)$, представленные на рис. 4. Из рис. 4 видно, что в период с 11:50 по

12:05 значение СКО мелкомасштабных вариаций ПЭС изменяется с 0,03 TECU до 0,18 TECU.

Прогнозирование помехоустойчивости ССС

В блоке прогнозирования помехоустойчивости ССС на основе полученных значений СКО мелкомасштабных вариаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_{ТМ}}(t)$ определяются изменения во времени вероятности ошибки $P_{ош}(t)$ при приеме инфор-

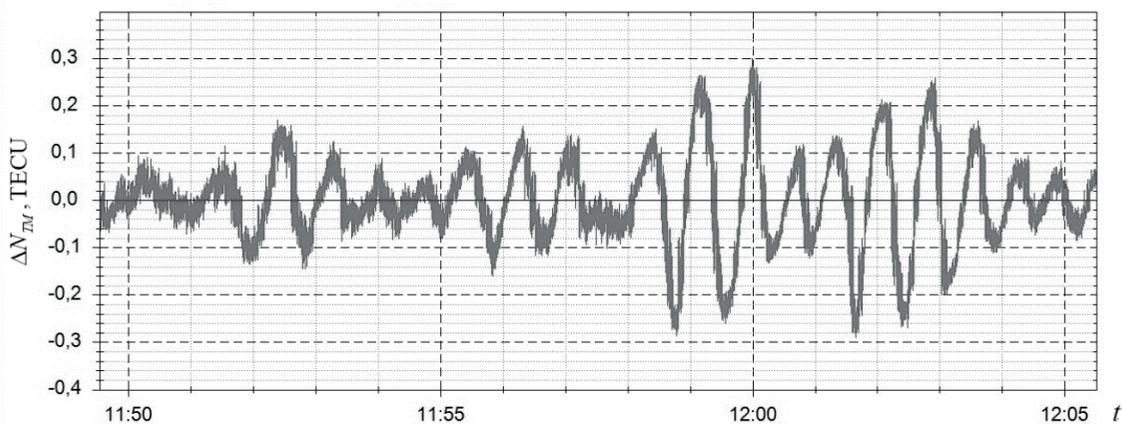


Рис. 3. Временной ряд мелкомасштабных вариаций полного электронного содержания ионосферы

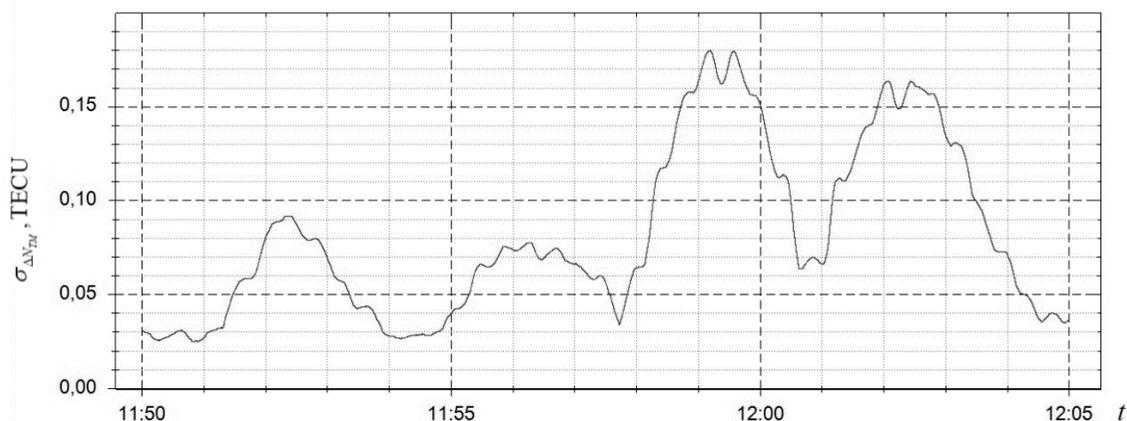


Рис. 4. Изменение среднеквадратического отклонения мелкомасштабных вариаций полного электронного содержания ионосферы

мационных символов навигационного сообщения (см. рис. 1). Заметим, что согласно рис.1 на трассах спутниковой навигации под углом $\alpha_n(t)$ и спутниковой связи под углом $\alpha_c(t)$ длина трансionoсферного участка распространения радиоволн (РРВ) будет различной. Зная СКО мелкомасштабных вариаций ПЭС ионосферы на трассе спутниковой навигации $\sigma_{\Delta T_{TM}}(t)$, можно определить СКО мелкомасштабных вариаций ПЭС ионосферы, в радианах, на трассах спутниковой связи $\sigma_{\Delta T_{TM(c)}}(t)$, проходящей через ту же область возмущенной ионосферы, как

$$\sigma_{\Delta T_{TM(c)}}(t) = \sigma_{\Delta T_{TM}}(t) \sqrt{\operatorname{cosec} \alpha_c(t) \operatorname{cosec} \alpha_n(t)}.$$

При одинаковых углах трансionoсферного РРВ на трассах спутниковой навигации и связи $\alpha_c(t) = \alpha_n(t)$ обеспечивается равенство и СКО мелкомасштабных вариаций ПЭС на этих трассах $\sigma_{\Delta T_{TM(c)}}(t) = \sigma_{\Delta T_{TM}}(t)$.

Известно [7-8], что для описания процесса распространения радиоволн через неоднородную ионосферу в ССС используется метод фазово-

го экрана, устанавливающий зависимость СКО флуктуаций фазового фронта волны на выходе неоднородной ионосферы σ_φ от СКО мелкомасштабных вариаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}$:

$$\sigma_{\Delta N_T} = 80,8\pi\sigma_{\Delta N_T} / cf_0, \quad (2)$$

где c – скорость света [м/с], f_0 – несущая частота [Гц], 80,8 – размерный коэффициент м³/с². На основе полученного временного ряда СКО мелкомасштабных вариаций ПЭС $\sigma_{\Delta N_{TM}}(t)$ можно получить временной ряд СКО флуктуаций фазового фронта волны на выходе неоднородной ионосферы (в радианах) как

$$\sigma_\varphi(t) = 80,8\pi\sigma_{\Delta N_{TM(c)}}(t) / cf_0. \quad (3)$$

На рис. 5 представлены результаты расчета согласно (3) изменений во времени СКО флуктуаций фазового фронта волны с несущей частотой $f_0 \approx 1$ ГГц (широко используемой в ССС) на основе данных об СКО мелкомасштабных вариаций ПЭС ионосферы, приведенных на рис. 4 (то есть при $\sigma_{\Delta N_{TM(c)}}(t) = \sigma_{\Delta N_{TM}}(t)$).

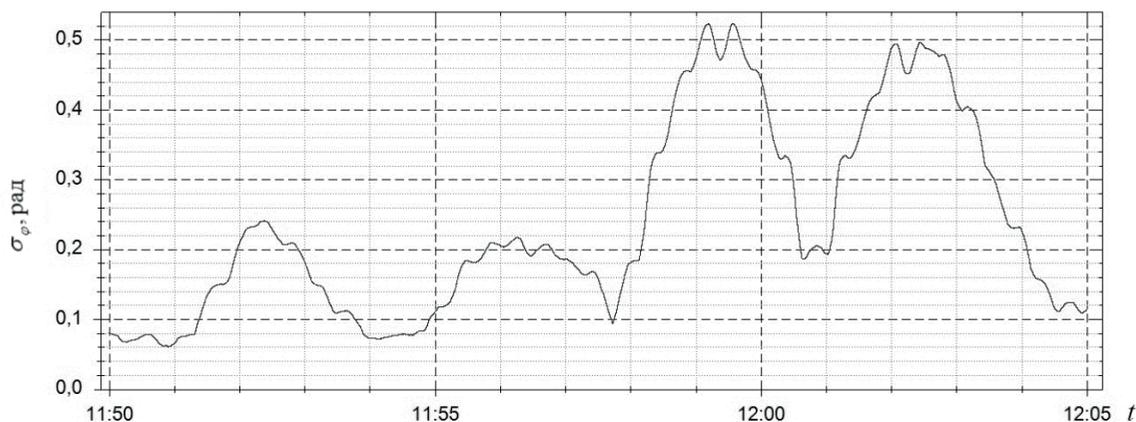


Рис. 5. Изменение во времени среднеквадратического отклонения флуктуаций фазового фронта волны на выходе неоднородной ионосферы

Согласно рис. 5 в период с 11:50 по 12:05 значение СКО мелкомасштабных вариаций ПЭС изменяется с 0,03 рад до 0,52 рад. Известно [7-8], что СКО флуктуаций фазового фронта волны на выходе неоднородной ионосферы σ_φ определяет глубину замираний принимаемого сигнала в транс-ионосферном радиоканале. Эти замирания характеризуются индексом мерцаний. Последний при выполнении условия дальней зоны связан с σ_φ зависимостью [9]

$$S_4 = [1 - \exp(-2\sigma_\varphi^2)]^{0,5}. \quad (4)$$

В соответствии с выражениями (4) и (3) можно получить зависимость от $\sigma_{\Delta T_{TM(c)}}(t)$ изменения во времени индекса мерцаний в транс-ионосферном радиоканале:

$$S_4 = [1 - \exp(-2\sigma_\varphi^2)]^{0,5} = \{1 - \exp[-161,6\pi\sigma_{\Delta T_{TM(c)}}(t)/cf_0]\}^{0,5}. \quad (5)$$

На рис. 6 приведен временной ряд значений индекса мерцаний, рассчитанных согласно (5) для несущей частоты $f_0 \approx 1$ ГГц по данным измерений СКО флуктуаций ПЭС (см. рис. 4).

Согласно рис. 5 в период с 11:50 по 12:05 значение СКО индекса мерцаний принимаемых сигналов в транс-ионосферном канале связи может достигать $S_4 \approx 0,6$; что свидетельствует о возникновении в спутниковом радиоканале достаточно глубоких замираний (когда $m = S_4^{-2} \approx 3$, то есть близких к релеевским).

В соответствии с выражением (5) можно получить зависимость от $\sigma_{\Delta T_{TM(c)}}(t)$ изменения параметра m во времени в транс-ионосферном радиоканале:

$$m(t) = S_4^{-2}(t) = [1 - \exp(-2\sigma_\varphi^2)]^{-1} = \{1 - \exp[-161,6\pi\sigma_{\Delta T_{TM(c)}}(t)/cf_0]\}^{-1}. \quad (6)$$

Величина m -параметра распределения Накагами, зависящая от индекса мерцаний S_4 в транс-ио-

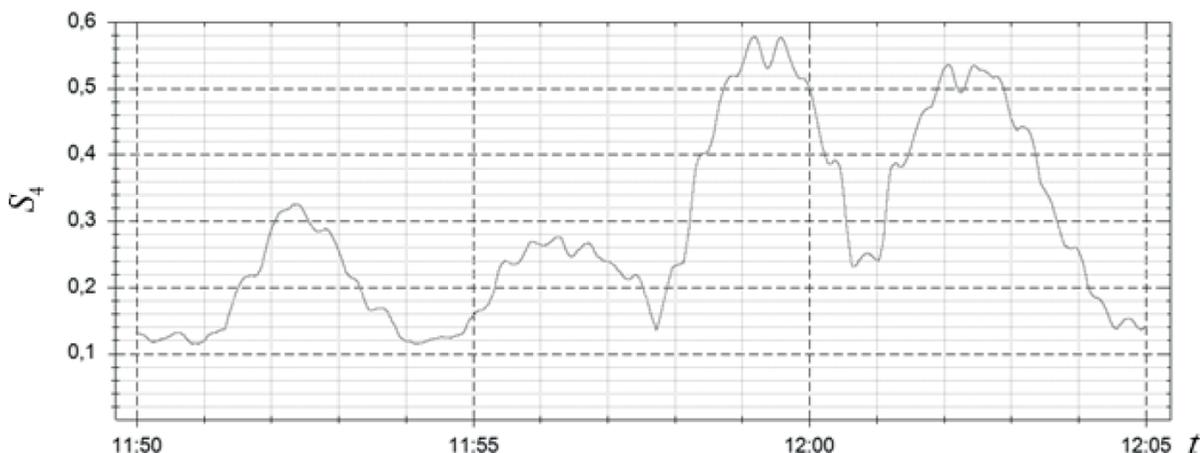


Рис. 6. Изменение во времени индекса мерцаний сигналов в транс-ионосферном канале связи

носферном канале связи, сильно влияет на помехоустойчивость ССС. Последняя при некогерентном оптимальном приеме ортогональных (в усиленном смысле) сигналов описывается выражением вида [3]

$$P_{\text{ош}} = \frac{1}{2} \exp\left(\frac{2m}{\langle h^2 \rangle + 2m}\right)^m, \quad (7)$$

где $\langle h^2 \rangle = \langle E \rangle / N_0 = h^2 = E / N_0$ – отношение средней энергии замирающего сигнала $\langle E \rangle$ к спектральной плотности мощности шума N_0 на входе приемника, равное соответствующему энергетическому отношению «сигнал/шум» $h^2 = E / N_0$ при отсутствии замираний.

В соответствии с выражениями (6)-(7) можно определить изменение во времени помехоустойчивости спутниковых систем связи и навигации как

$$P_{\text{ош}}(t) = \frac{1}{2} \exp\left(\frac{2S_4^{-2}(t)}{\langle h^2 \rangle + 2S_4^{-2}(t)}\right)^{S_4^{-2}(t)}. \quad (8)$$

В соответствии с изменением во времени индекса мерцаний S_4 в спутниковом канале связи (см. рис. 6) и выражением (8) на рис. 7 приведены результаты прогнозирования помехоустойчивости ССС, использующих несущую частоту $f_0 \approx 1$ ГГц, при достаточно большом отношении «сигнал/шум» (ОСШ) на входе приемника $\langle h^2 \rangle = 35$ дБ.

Анализ рис. 7 показывает, что в период возмущений ионосферы с 11:50 до 12:05, сопровождаемых ростом мелкомасштабных неоднородностей электронной концентрации и вариаций ПЭС (см. рис. 3-4), вероятность ошибочного приема информационных символов в ССС с несущей частотой $f_0 \approx 1$ ГГц может возрастать до величины

$P_{\text{ош}} \approx 2 \cdot 10^{-4}$, более чем на порядок превышающей допустимое значение $P_{\text{ош доп}} = 10^{-5}$.

На рис. 8, по аналогии с рис. 6 и в соответствии с выражениями (6)-(8), представлены результаты прогнозирования помехоустойчивости ССС, использующих более высокую несущую частоту $f_0 \approx 2$ ГГц при обычном (с учетом энергетического запаса спутниковой радиолонии) отношении «сигнал/шум» на входе приемника ССС $\langle h^2 \rangle = 20$ дБ.

Анализ рис. 8 показывает, что на интервале возмущений ионосферы с 11:50 до 12:05 вероятность ошибочного приема сигналов в ССС с несущей частотой $f_0 \approx 2$ ГГц и отношении «сигнал/шум» на входе приемника $\langle h^2 \rangle = 20$ дБ может возрасти до величины $P_{\text{ош}} \approx 5 \cdot 10^{-3}$ и превышать допустимое значение $P_{\text{ош доп}} = 10^{-5}$ в течение 13 мин.

На рис. 9 представлены результаты прогнозирования помехоустойчивости ССС, использующих несущую частоту $f_0 \approx 4$ ГГц при отношении «сигнал/шум» на входе приемника ССС $\langle h^2 \rangle = 20$ дБ.

Анализ рис. 9 показывает, что в период возмущений ионосферы с 11:50 до 12:05 вероятность ошибочного приема сигналов в ССС с несущей частотой $f_0 \approx 2$ ГГц при $\langle h^2 \rangle = 20$ дБ может возрасти до величины $P_{\text{ош}} \approx 10^{-3}$, превышающей допустимое значение $P_{\text{ош доп}} = 10^{-5}$ на два порядка.

Анализ приведенных на рис. 7-9 изменений во времени вероятности ошибочного приема сигналов в ССС при возмущениях ионосферы показывает, что $P_{\text{ош}}(t)$ слабо зависит от реализуемого значения $\langle h^2 \rangle$ на входе приемника и определяется индексом мерцаний $S_4^{-2}(t) = m(t)$, изменения которого зависят согласно (6) от отношения

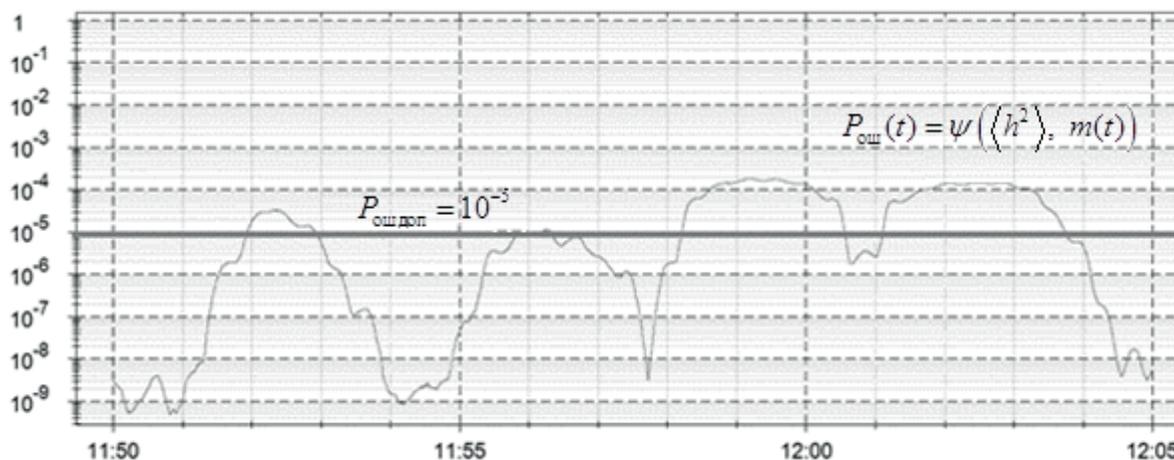


Рис. 7. Изменение во времени вероятности ошибки в ССС при несущей частоте $f_0 \approx 1$ ГГц и $\langle h^2 \rangle = 35$ дБ

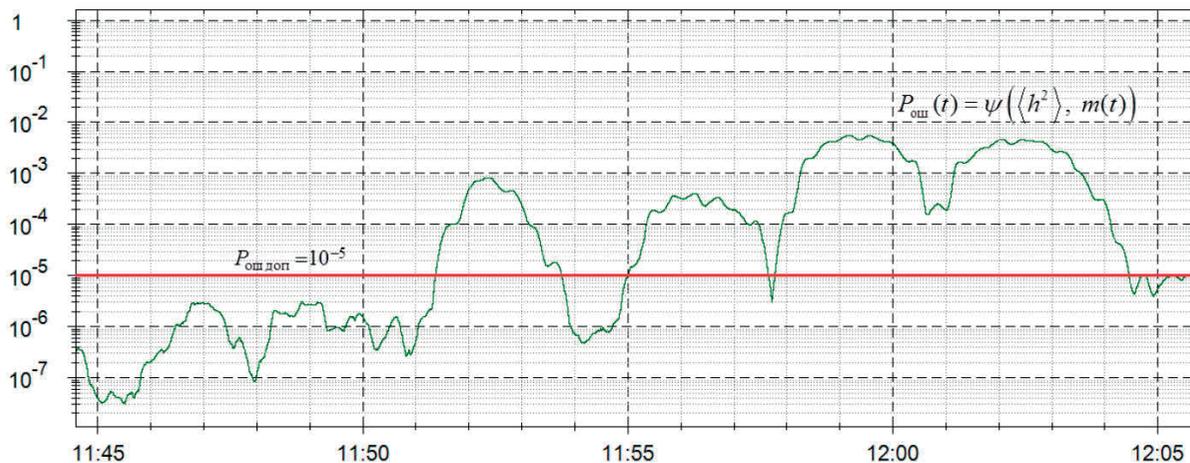


Рис. 8. Изменение во времени вероятности ошибки в ССС при несущей частоте $f_0 \approx 2$ ГГц и $\langle h^2 \rangle = 20$ дБ

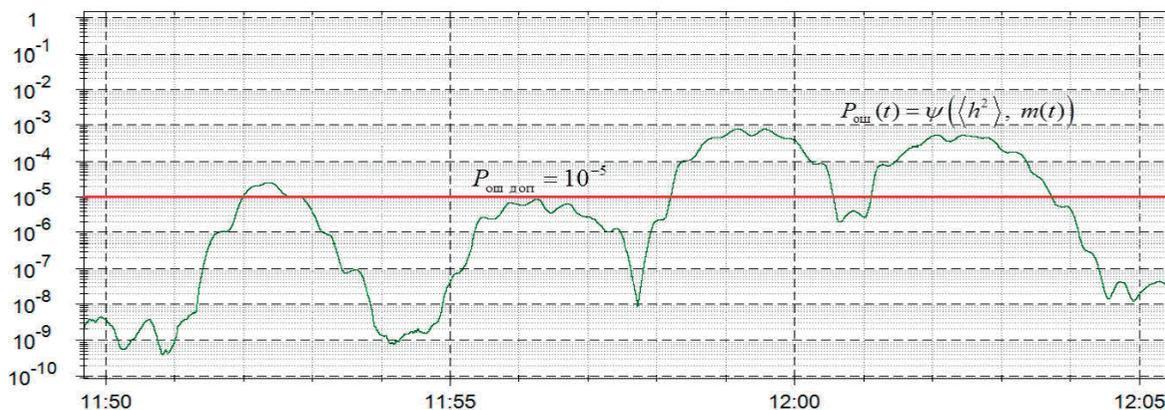


Рис. 9. Изменение во времени вероятности ошибки в ССС при несущей частоте $f_0 \approx 4$ ГГц и $\langle h^2 \rangle = 20$ дБ

СКО мелкомасштабных вариаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_{TM}(t)}$ к выбранной несущей частоте передаваемого сигнала f_0 .

Структура комплекса прогнозирования помехоустойчивости ССС

Алгоритм прогнозирования помехоустойчивости ССС по результатам измерения СКО мелкомасштабных вариаций ПЭС $\sigma_{\Delta N_{TM}}$ заключается в последовательности следующих операций.

1. Получение временного ряда вариаций ПЭС $N_T(t)$ – см. рис. 2, с помощью двухчастотного приемника СРНС.

2. Сглаживание ряда вариаций ПЭС $N_T(t)$ методом простой скользящей средней с окном $t_{сгл1} = 60$ с и удаление из исходного ряда (1) полученного в результате сглаживания тренда $\langle N_T(t) \rangle = \Delta N_{T0}(t) + \Delta N_{TKP}(t) + \Delta N_{TSP}(t)$.

3. Получение ряда мелкомасштабных вариаций ПЭС $\Delta N_{TM}(t)$ – см. рис. 3, путем сглаживания, полученного на предыдущем шаге ряда $N_T(t) = \Delta N_{TM}(t) + \Delta N_{TKP}(t)$ методом простой скользящей средней с окном $t_{сгл2} = 0,1$ с.

4. Вычисление элементов временного ряда СКО мелкомасштабных вариаций ПЭС $\sigma_{\Delta N_{TM}}(t)$ согласно рис. 4, на интервале $t_{CKO} = 60$ с.

5. Вычисление элементов временного ряда значений индекса мерцаний S_4 (см. рис.6);

6. Вычисление элементов временного ряда значений вероятности ошибки $P_{ош}(t)$ при приеме информационных символов (см. рис. 7-9).

Структурная схема комплекса, реализующего описанный алгоритм с учетом описанных выше операций, представлена на рис. 10.

Выводы

Таким образом, разработана структурная схема комплекса, позволяющего прогнозировать помехоустойчивость систем спутниковой связи в реальном масштабе времени по результатам мониторинга среднеквадратического отклонения мелкомасштабных вариаций полного электронного содержания ионосферы на выходе двухчастотного приемника СРНС. Практическая ценность полученных результатов состоит в том, что они базируются на экспериментальных данных мониторинга ионосферы с помощью двухчастотного приемника NovAtel GPStation-6 и указывают на возможность образования в

средних широтах областей с повышенным значением СКО мелкомасштабных вариаций электронной концентрации, которые могут вызывать глубокие мерцания принимаемых сигналов и недопустимое снижение помехоустойчивости систем спутниковой связи в течение 13 мин. Эти результаты могут быть использованы для адаптации частотно-временных параметров спутниковых систем связи к изменению условий транс-ионосферного распространения радиоволн с целью повышения помехоустойчивости в условиях ионосферных возмущений типа образования мелкомасштабных неоднородностей электронной концентрации.

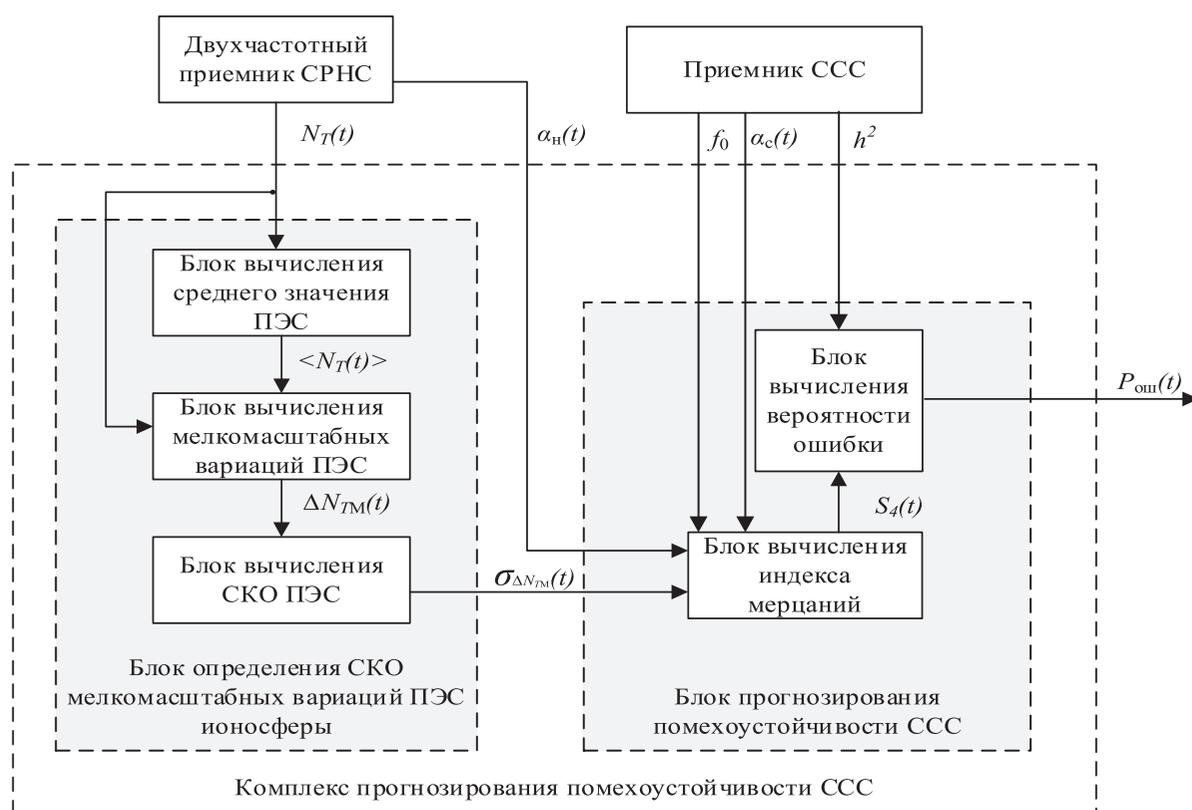


Рис. 10. Структурная схема комплекса прогнозирования помехоустойчивости ССС по данным транс-ионосферного зондирования

Литература

1. Богуш Р.Л., Джульяно Ф.У., Непп Д.Л. Частотно-селективные замирания и их коррекция методом решающей обратной связи в высокоскоростных цифровых спутниковых каналах связи // ТИИЭР. Т. 71. № 6, 1983. – С. 78-94.
2. Ааронс Дж. Глобальная морфология ионосферных мерцаний // ТИИЭР. Т. 70, № 4, 1980. – С. 45-66.
3. Кловский Д. Д. Передача дискретных сообщений по радиоканалам. М.: Связь, 1969. – 375 с.
4. OEM6® Family Firmware Reference Manual (OM-20000129), Rev. 7, 2014 – 754 с.
5. Афраимович Э.Л., Первалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: Изд. ГУ НЦ ВСНЦ СО РАМН, 2006. – 480 с.
6. Пашинцев В.П., Султанов А.С., Песков М.В., Топорков К.И. Методика селекции мелкомасштабных ионосферных возмущений в рядах вариаций полного электронного содержания // Вестник СКФУ. №3 (48), 2015. – С. 28-35.

7. Маслов О.Н., Пашинцев В.П. Модели транс-ионосферных радиоканалов и помехоустойчивость систем космической связи // Приложение к ИКТ. Вып. 4, 2006. – 357 с.
8. Пашинцев В.П., Солчатов М.Э., Гахов Р.П. Влияние ионосферы на характеристики космических систем передачи информации. М.: Физматлит, 2006. – 184 с.
9. Рытов С.М. Кравцов Ю.Н., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2. М.: Наука, 1978. – 464 с.

Получено 12.10.2015

Шевченко Вячеслав Анатольевич, к.т.н., с.н.с., контрактный военнослужащий. Тел. (8-495) 519-98-02. E-mail: shevv67@maul.ru

Чипига Александр Федорович, к.т.н., профессор, директор Института информационных технологий и телекоммуникаций Северо-Кавказского федерального университета (СКФУ). Тел. (8-8652) 295-69-97; 8-962-400-76-63. chipiga.alexander@gmail.com

Пашинцев Владимир Петрович, д.т.н., профессор Кафедры информационной безопасности автоматизированных систем (ИБАС) СКФУ. Тел. (8-865) 295-69-97; 229-10-49; 8-918-741-33-16. E-mail: pashintsevp@mail.ru

Топорков Кирилл Игоревич, старший преподаватель Кафедры ИБАС СКФУ. Тел. (8-865) 295-69-97; 8-918-779-70-94.

PREDICTION OF SATELLITE COMMUNICATION NOISE IMMUNITY BY RESULTS OF IONOSPHERE SCINTILLATION MONITORING

Shevchenko V.A.¹, Chipiga A.F.², Pashintsev V.P.², Toporkov K.I.²

¹Military unit, Moscow, Russian Federation

²North Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation

E-mail: k-fmf-primath@stavsru.ru

We present block scheme of complex that provides real-time prediction of satellite communication noise immunity by results of monitoring of mean square small-scale nonhomogeneities deviation of total electron content of ionosphere. Here the output of dual-frequency receiver NovAtel GPStation-6 of satellite radio-navigation system is monitored. According to measured results, we found that regions with unacceptable mean square nonhomogeneities deviation of total electron content are able in mean latitude. Mentioned deviations can lead to great scintillation of receiving signals and unacceptable noise immunity reducing of satellite communication during the 13 minutes. These results can be used for satellite communication system frequency and time parameters adaptation to variations of radio wave transionospheric propagation conditions for noise immunity improvement under ionosphere perturbations like small-scale nonhomogeneities deviation of total electron content.

Keywords: *satellite communication, noise immunity, total electron content of ionosphere, small-scale nonhomogeneities, scintillation index, satellite radio navigation, dual-frequency receiver*

DOI: 10.18469/ikt.2015.13.4.02

Shevchenko Vjacheslav Anatolievich, PhD in Technical Science, Military Unit, Moscow, Russian Federation. Tel. +79161388796. E-mail: shevv67@mail.ru

Chipiga Alexander Fedorovich, PhD in Technical Science, Professor, Director of the Institute of Information Technology and Telecommunications, North Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation. Tel.: +79624007663. E-mail: chipiga.alexander@gmail.com

Pashintsev Vladimir Petrovich, Doctor of Technical Science, Professor, Professor of the Department of Information Security Automated Systems, North Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation. Tel.: +79187413316. E-mail: pashintsevp@mail.ru

Toporkov Kirill Igorevich, Senior Lecture, Department of the Information security of automated systems, North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation. Tel. +79187797094

References

1. Bogush R.L., Dzhul'jano F.U., Nepp D.L. Chastotno-selektivnye zamiraniya i ih korrekciya metodom reshajushhej obratnoj svyazi v vysokoskorostnyh cifrovyyh sputnikovyyh kanalakh svyazi [Frequency-selective fading and their correction by the method decision feedback in high-speed digital satellite links]. *TIIJeR*, 1983, vol. 71, no. 6, pp. 78-94.
2. Aarons Dzh. Global'naja morfologiya ionosfernykh mercanij [Global morphology of ionospheric scintillation]. *TIIJeR*, 1980, vol. 70, no. 4, pp. 45-66.
3. Klovsij D. D. *Peredacha diskretnykh soobshhenij po radiokanalam* [Sending digital messages over radio channels]. Moscow, Svjaz Publ., 1969. 375 p.
4. *OEM6® Family Firmware Reference Manual (OM-20000129), Rev. 7*. 2014, 754 p.
5. Afrajmovich Je.L., Perevalova N.P. *GPS-monitoring verhnej atmosfery Zemli* [GPS-monitoring of Earth's upper atmosphere]. Irkutsk, GU NC VSNC SO RAMN Publ., 2006. 480 p.
6. Pashincev V.P., Sultanov A.S., Peskov M.V., Toporkov K.I. Metodika selekcii melkomasshtabnykh ionosfernykh vozmushhenij v rjadakh variacij polnogo jelektronnogo sodержaniya [Method of selection of small-scale ionospheric disturbances in the variations of the total electron content]. *Vestnik SKFU*, 2015, no. 3 pp. 28-35.
7. Maslov O.N., Pashincev V.P. Modeli transionosfernykh radiokanalov i pomehoustojchivost' sistem kosmicheskoy svyazi [Models of transionospheric radio channels and noise immunity of space communication systems]. *Prilozhenie k IKT*, 2006, vol. 4. 357 p.
8. Pashincev V.P., Solchatov M.Je., Gahov R.P. *Vlijanie ionosfery na harakteristiki kosmicheskikh sistem peredachi informacii: monografija* [Impact of the ionosphere on the characteristics of cosmic information transmission systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006. 184 p.
9. Rytov S.M. Kravcov Ju.N., Tatarskij V.I. *Vvedenie v statisticheskiju radiofiziku. Ch. 2* [Introduction to Statistical Radiophysics. Volume 2]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 464 p.

Received 12.10.2015

УДК 519.612

МНОГОКРАТНОЕ ВЫЧИСЛЕНИЕ ЕМКОСТНОЙ МАТРИЦЫ СИСТЕМЫ ПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ С ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ ПАРАМЕТРАМИ С ПОМОЩЬЮ БЛОЧНОГО LU-РАЗЛОЖЕНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ СЛАУ

Суровцев Р.С., Куксенко С.П., Газизов Т.Р.

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, РФ

E-mail: talgat.tu@tusur.ru

Рассмотрен комплекс вопросов, связанных с многократным решением систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) за счет использования блочного LU-разложения. Выявлена специфика матриц, возможная для использования. Проанализирована роль перенумерации как нового этапа, позволяющего, при малых вычислительных затратах, значительное повышение эффективности решения и расширение круга анализируемых структур. Усовершенствован алгоритм вычисления ряда емкостных матриц системы проводников и диэлектриков. Выведены выражения для аналитических оценок арифметических затрат, позволяющие априорную оценку эффективности использования блочного LU-разложения. Выполнены аналитические и вычислительные оценки ускорения усовершенствованным алгоритмом в зависимости от различных параметров. Получено максимальное ускорение 23 раза.

Ключевые слова: моделирование в диапазоне параметров, оптимизация, емкостная матрица, система линейных алгебраических уравнений, блочное LU-разложение.

Введение

В настоящее время имитационное моделирование различных процессов (механических, тепловых, электрических и пр.) получило широкое распространение в различных областях практической деятельности. Это моделирование

часто основано на численных методах, сводящих задачу к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Поэтому от умения быстро решать СЛАУ зависит эффективность моделирования в целом. Особая необходимость в этом возникает при моделировании в диапазоне