

ВЛИЯНИЕ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ НА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ Р-ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

В.П. Пашинцев, М.В. Песков, Д.А. Михайлов

Северо-Кавказский федеральный университет, 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1

E-mail: mypeskov@hotmail.com

Аннотация. Разработан аппаратно-программный комплекс прогнозирования помехоустойчивости систем спутниковой связи *P*-диапазона частот в условиях мелкомасштабных возмущений ионосферы на основе результатов ее GPS-мониторинга. Установлено, что в нормальной среднеширотной ионосфере в течение 20 секунд возможно возрастание мелкомасштабных флюктуаций полного электронного содержания на трассе распространения радиоволн до значений, при которых вероятность ошибочного приема сигналов в 30 раз превышает допустимую величину (10^{-3}).

Ключевые слова: системы спутниковой связи, *P*-диапазон, помехоустойчивость, индекс мерцаний, GPS-мониторинг, ионосфера, полное электронное содержание, мелкомасштабные флюктуации

THE EFFECT OF SMALL-SCALE FLUCTUATIONS IN THE TOTAL ELECTRON CONTENT OF THE IONOSPHERE ON NOISE IMMUNITY SATELLITE COMMUNICATIONS OF THE P-BAND OF FREQUENCIES

В.П. Пашинцев, М.В. Песков, Д.А. Михайлов

Abstract. A hardware and software package has been developed for predicting the noise immunity of *P*-band satellite communications systems in conditions of small-scale ionospheric disturbances based on the results of its GPS monitoring. It has been established that in the normal mid-latitude ionosphere, small-scale fluctuations in the total electronic content along the radio wave propagation path can increase within 20 seconds to values at which the probability of erroneous reception of signals is 30 times higher than the permissible value (10^{-3}).

Keywords: satellite communication systems, *P*-band, noise immunity, flicker index, GPS monitoring, ionosphere, small-scale fluctuations

Введение

Известно [1, 2], что среди систем спутниковой связи (ССС) важную роль играют спутниковые системы узкополосной мобильной связи (ССУМС), которые имеют ряд особенностей. К их числу относятся: работа в *P*-диапазоне несущих частот ($f_0 = 225 \dots 400$ МГц); передача данных (электронная почта, двусторонний пейджинг, дистанционный контроль) с низкой скоростью (от единиц бод до десятков кбод); небольшие размеры, малый вес, надежность, простота, низкая стоимость абонентских терминалов (АТ) и антенн; возможность использования АТ на кораблях, автомобилях, самолетах, ранцах, портативных устройствах; хорошие условия распространения радиоволн (PPB) через гидрометеообразования (дождь, град, туман и т.п.) и листву деревьев.

Недостатком ССУМС, помимо низкой скорости передачи, является влияние возмущений ионосферы на появление мерцаний принимаемых сигналов и снижение помехоустойчивости (ПУ) приема сигналов. Наличие этого недостатка подтверждается экспериментами, проведенными в ИРЭ РАН [3]. Установлено, что в спутниковой системе поиска и слежения Коспас-Сарсат (ССК-С), работающей в *P*-диапазоне частот ($f_0 \approx 406$ МГц), в условиях возмущений ионосферы, сопровождаемых образованием мелкомасштабных ($0,1 \dots 1$ км) неоднородностей, наблюдались: 1) замирания (мерцания) принимаемых сигналов с индексом ионосферных мерцаний от $S_4 = 0,3 \dots 0,5$ до $S_4 = 0,7$; 2) возрастание вероятности ошибочного приема сигналов ($P_{\text{ош}}$) выше допустимого значения ($P_{\text{ош доп}} = 10^{-3}$).

Недостатком известного метода [3] является то, что возрастание индекса мерцаний (S_4) отражает лишь последствия влияния возмущений ионосферы на PPB, а не их первопричину – возрастание мелкомасштабных флюктуаций полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы ΔN_T на трассе PPB в ССК-С P -диапазона частот ($f_0 \approx 225 \dots 400$ МГц). Отсюда можно сделать вывод, что в ССК, работающих в P -диапазоне частот, в условиях мелкомасштабных возмущений ионосферы может наблюдаться существенное возрастание вероятности ошибки $P_{\text{ош}} = \psi(\bar{h}^2, S_4)$, обусловленное возрастанием индекса мерцаний $S_4 = \psi(\Delta N_T, f_0)$ принимаемых сигналов при увеличении мелкомасштабных флюктуаций ПЭС ионосферы ΔN_T на трассе PPB. При этом известны [7] методы измерения мелкомасштабных флюктуаций ПЭС ΔN_T и их статистических характеристик с помощью приемника глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) типа GPStation-6.

Поэтому целью доклада является разработка аппаратно-программного комплекса (АПК) прогнозирования помехоустойчивости систем спутниковой системы P -диапазона частот в условиях мелкомасштабных возмущений ионосферы на основе результатов GPS-мониторинга мелкомасштабных флюктуаций ПЭС ионосферы с помощью приемника ГНСС типа GPStation-6.

Для достижения цели статьи необходимо решить задачу получения зависимости вероятности ошибочного приема сигналов ССК P -диапазона частот ($f_0 \approx 225 \dots 400$ МГц) от мелкомасштабных флюктуаций ПЭС ионосферы ΔN_T на трассе PPB под произвольным углом α_c с помощью приемника GPStation-6, измеряющего ΔN_T под другим углом $\alpha_h \neq \alpha_c$:

$$P_{\text{ош}}(\alpha_c) = \psi(\bar{h}^2, S_4(\alpha_c)) = \psi(\bar{h}^2, \Delta N_T(\alpha_h), f_0). \quad (1)$$

АПК прогнозирования ПУ ССК в P -диапазоне на основе GPS-мониторинга флюктуаций ПЭС при произвольных углах трасс ССК и ГНСС

Для получения искомой зависимости (1) разработана (рис. 1) структура построения АПК прогнозирования помехоустойчивости ССК на основе GPS-мониторинга флюктуаций ПЭС ионосферы при произвольных углах возвышения трасс ССК и ГНСС ($\alpha_c \neq \alpha_h$).

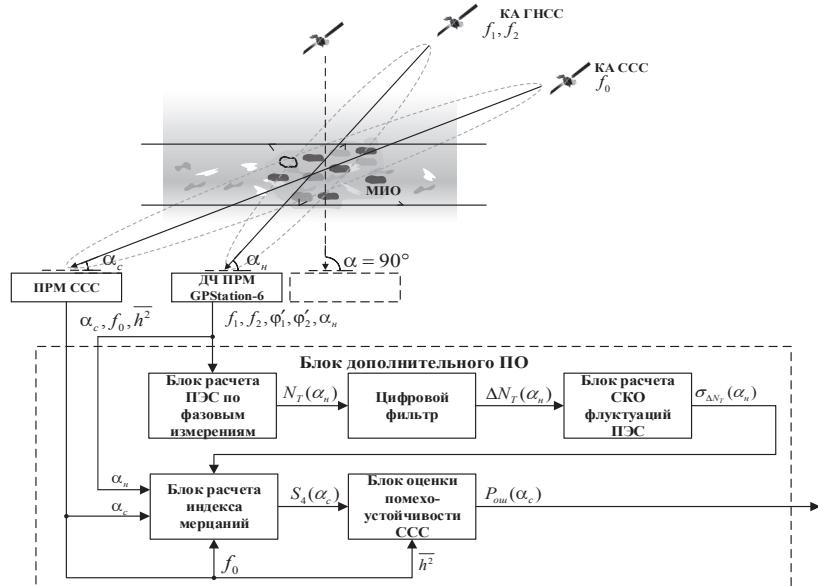


Рис. 1. Структурная схема АПК прогнозирования помехоустойчивости ССК на основе GPS-мониторинга флюктуаций ПЭС ионосферы при произвольных углах возвышения трасс ССК и ГНСС ($\alpha_c \neq \alpha_h$)

Она базируется на известной [4] схеме построения АПК измерения индекса ионосферных мерцаний сигналов $S_4(\alpha_h) = \psi(\Delta N_T(\alpha_h), f_0)$ приемником GPStation-6 на трассе PPB в ГНСС с другой несущей частотой $f_{0h} \approx 1,6$ ГГц и другим углом $\alpha_h \neq \alpha_c$.

Алгоритм работы АПК прогноза помехоустойчивости ССС при мелкомасштабных возмущениях ионосферы (рис. 1) состоит в следующем: 1) двухчастотным (ДЧ) приемником (ПРМ) ГНСС типа GPStation-6 измеряется ПЭС $N_T(\alpha_n)$ на трассе PPB с несущими частотами f_1 и f_2 под углом α_n ; 2) оцениваются мелкомасштабные флюктуации ПЭС $\Delta N_T(\alpha_n)$; 3) рассчитывается их среднеквадратическое отклонение (СКО) $\sigma_{\Delta N_T}(\alpha_n)$; 4) определяется индекс ионосферных мерцаний сигналов на трассе PPB ССС под углом α_c согласно выражению

$$S_4(\alpha_c) = \sqrt{1 - \exp(-2(80,8\pi\sigma_{\Delta N_T}(\alpha_n) \sin \alpha_n / cf_0 \sin \alpha_c)^2)}. \quad (2)$$

Достоверность полученного выражения (2) подтверждается тем, что в частном случае вертикального PPB на трассах ССС и ГНСС ($\alpha_c = \alpha_n = 90^\circ$) выражение 2 сводится к известному [4] виду $S_4(\alpha_n) = \sqrt{1 - \exp(-2(80,8\pi\sigma_{\Delta N_T}(\alpha_n) / cf_0)^2)}$.

5) определяется вероятность ошибочного приема в ССС сигналов в условиях мелкомасштабных возмущений ионосферы. Например, при некогерентном приеме сигналов с относительной фазовой модуляцией, подверженных замираниям Накагами- m , зависимость $P_{\text{ош}} = \psi(\bar{h}^2, S_4)$ с учетом известной [5] взаимосвязи $m = S_4^{-2}$ будет иметь вид [6]

$$P_{\text{ош}}(\alpha_c) = \frac{1}{2} \left(\frac{S_4(\alpha_c)^{-2}}{S_4(\alpha_c)^{-2} + \bar{h}^2} \right)^{S_4(\alpha_c)^{-2}} = \psi(\bar{h}^2, \sigma_{\Delta N_T}(\alpha_n), \alpha_c, \alpha_n, f_0), \quad (3)$$

где индекс мерцаний принимаемых сигналов ССС (2) при известных углах возвышения трасс спутниковой связи (α_c) и навигации (α_n) определяется по результатам GPS-мониторинга СКО мелкомасштабных флюктуаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}(\alpha_n)$ на навигационной трассе PPB.

Таким образом, искомая зависимость (1) получена в виде аналитических выражений (2, 3).

Экспериментальные результаты работы АПК прогнозирования помехоустойчивости ССС при мелкомасштабных возмущениях ионосферы

На рис. 3 представлены временные диаграммы изменения во времени СКО мелкомасштабных флюктуаций ПЭС ионосферы при PPB на трассе ГНСС, индекса мерцаний S_4 принимаемых сигналов ССС в P -диапазоне частот ($f_0 \approx 406$ МГц) и вероятности их ошибочного приема при отношении С/Ш 10 дБ.

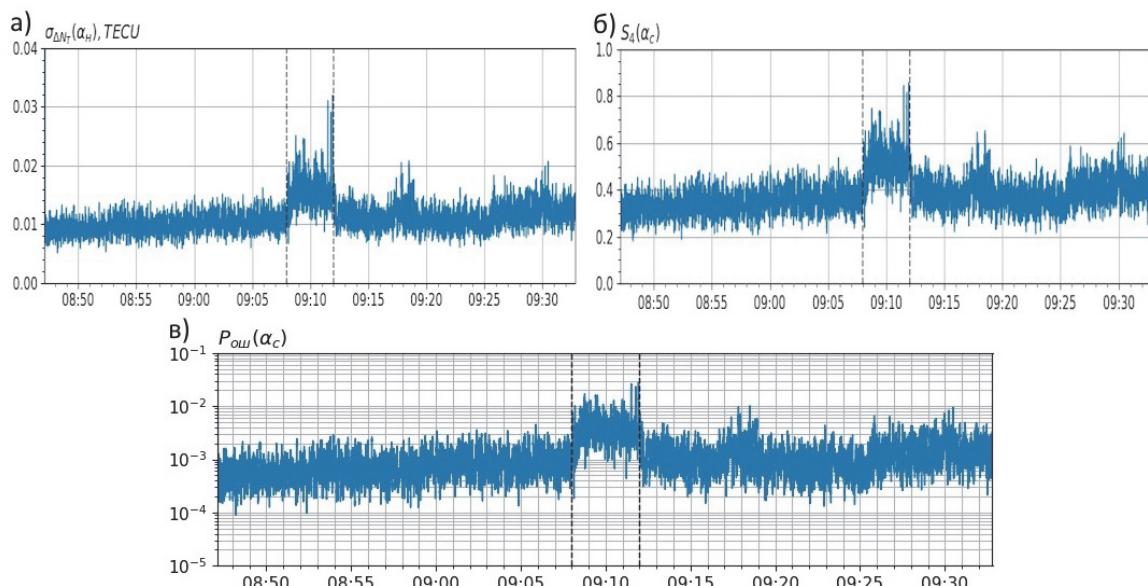


Рис. 3. Изменение во времени: а) СКО мелкомасштабных флюктуаций ПЭС ионосферы при PPB на трассе ГНСС; б) индекса мерцаний S_4 сигнала ССС в P -диапазоне частот ($f_0 \approx 406$ МГц); в) вероятности ошибочного приема в ССС при отношении С/Ш 10 дБ

Анализ экспериментальных результатов (рис. 2) показывает, что в нормальной среднеширотной ионосфере возможно:

1) на 4-минутном интервале возрастание СКО мелкомасштабных флюктуаций ПЭС ионосферы до $\sigma_{\Delta N_T}(\alpha_n) \approx 0,015$ TECU, что обуславливает увеличение индекса мерцаний сигнала на входе ПРМ ССС до $S_4(\alpha_c) \approx 0,55$, а вероятности ошибки – до недопустимого значения $P_{\text{ош}}(\alpha_c(t)) \approx 3 \cdot 10^{-3} > P_{\text{ош доп}} \approx 10^{-3}$;

2) в течение 20 секунд, когда достигается максимальное значение СКО мелкомасштабных флюктуаций ПЭС ионосферы $\sigma_{\Delta N_T}(\alpha_n) \approx 0,03$ TECU и индекса мерцаний $S_4(\alpha_c) \approx 0,85$, вероятность ошибочного приема сигналов может в 30 раз превышать допустимую величину: $P_{\text{ош}}(\alpha_c(t)) \approx 3 \cdot 10^{-2} \gg P_{\text{ош доп}} \approx 10^{-3}$.

Заключение

Разработан АПК комплекс прогнозирования помехоустойчивости систем спутниковой связи P -диапазона частот ($f_0 \approx 406$ МГц) в условиях возмущений ионосферы на основе результатов GPS-мониторинга мелкомасштабных флюктуаций ПЭС ионосферы при произвольных углах возвышения трасс спутниковой связи и навигации ($\alpha_c \neq \alpha_n$).

Установлено, что в нормальной среднеширотной ионосфере возможно возрастание СКО мелкомасштабных флюктуаций ПЭС ионосферы в течение 4 минут до значений, при которых вероятность ошибки в ССС P -диапазона частот превышает допустимое значение. Причем в течение 20 секунд вероятность ошибочного приема сигналов может в 30 раз превышать допустимую величину $P_{\text{ош доп}} \approx 10^{-3}$.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00295 (<https://rscf.ru/project/24-21-00295/>).

Список литературы

1. Немировский М.С., Локшин Б.А., Аронов Д.А. Основы построения систем спутниковой связи / под редакцией М.С. Немировского. – М.: Горячая линия-Телеком, 2017. – 432 с.
2. Невдяев Л. М., Смирнов А.А. Персональная спутниковая связь. – М. : Эко-Трендз, 1998. – 215 с.
3. Назаров Л. Е., Антонов Д. В., Батанов В. В., Зудилин А. С., Смирнов В. М. Модели сцинтиляции сигналов при распространении по ионосферным спутниковым радиолиниям // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. – 2019. – № 1. – С. 57–64.
4. Pashintsev V.P., Peskov M.V., Senokosov M.A., Mikhailov D.A., Skorik A.D. A system for measuring the scintillation index based on the results of monitoring of small-scale fluctuations in the total electron content of the ionosphere // GPS Solutions. – 2024. – Vol. 28. – Iss. 1. – URL: <https://doi.org/10.1007/s10291-023-01550-1>
5. Гундзе Е., Чжаохань Лю. Мерцания радиоволн в ионосфере // ТИИЭР. – 1982. – Т. 70. – № 4. – С. 5–45.
6. Simon M.K., Alouini M-S. Digital communication over fading channels: a unified approach to performance Analysis. John Wiley & Sons, Inc., 2000. – 546 p.