УДК 621.396.94 DOI: 10.62955/0135-3748-2024-268

СЕНСОРНАЯ ДИАГНОСТИКА ПРЕДЕЛЬНОЙ ПОЛОСЫ ЧАСТОТ ТРАНСИОНОСФЕРНОГО КАНАЛА В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ ИОНОСФЕРЫ

М.А. Кислицына, А.А. Кислицын

Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия,
KislitsinAA@volgatech.net

SENSORY DIAGNOSTICS OF THE LIMITING FREQUENCY BAND OF TRANSIONOSPHERIC CHANNEL UNDER THE INFLUENCE OF DESTABILIZING FACTORS OF THE IONOSPHERE

M.A. Kislitsina, A.A. Kislitsin

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia,
KislitsinAA@volgatech.net

Аннотация. Решается задача сенсорной диагностики предельной полосы частот трансионосферного канала в условиях изменчивой внутримодовой дисперсии групповой задержки, приводящей к сложным дисперсионным искажениям волновых пакетов. Математическое обеспечение технических средств основано на применении методов интеллектуального анализа данных экспериментальной диагностики трансионосферной линии связи. Установлено, что без адаптации удается создать радиоканалы неискаженной передачи с полосой 70 МГц. Адаптация к изменчивости дисперсии позволяет увеличить полосу канала в среднем до 2.5 раза.

Ключевые слова: трансионосферный радиоканал, полоса когерентности, полное электронное содержание, сенсорная диагностика, внутримодовая дисперсия.

Abstract. The problem of sensor diagnostics for the limiting frequency band of a transionospheric channel is addressed under conditions of variable intra-mode group delay dispersion, which causes complex dispersion distortions in wave packets. The technical approach is supported by intelligent data analysis methods from experimental diagnostics of a transionospheric communication line. It has been established that, without adaptation, it is possible to create radio channels with an undistorted transmission bandwidth of 70 MHz. Adapting to dispersion variability can increase the channel bandwidth by an average of 2.5 times.

Keywords: transionospheric radio channel, coherence band, total electron content, sensor diagnostics, intramode dispersion.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время спутниковая связь является приоритетной широкополосный технологией для обеспечения территорий мультимедийной связью и создания корпоративных высокоскоростных интернет-сетей [Пантелеймонов и др., 2022]. Распространение радиосигналов осуществляется по трансионосферным радиоканалом (ТРК), обеспечивающих передачу или приём информации между промежуточным спутниковым ретранслятором и наземными инфокоммуникационными системами через всю толщу ионосферы на рабочих частотах из диапазона 0,1…30 ГГц.

Так как большая часть канала находится в ионосфере, то существенное влияние на прохождение радиосигнала оказывают факторы, сказывающиеся на возмущенные процессы в ней [Armand, 2003]. Значительным является ограничение полосы частот каналов, не позволяющее осуществлять передачу информации по каналам с высокой пропускной способностью. С ростом полосы после некоторого её значения, называемого полосой когерентности, возникают искажения, связанные с изменчивой дисперсией групповой задержки в ТРК [Иванов и др., 2021]. При этом ключевым параметром, отвечающим за искажение радиосигнала, является полное электронное содержание (ПЭС) ионосферы [Yasyukevich et al., 2020]. Таким образом, актуальной является проблема диагностики предельно возможной полосы канала, для решения которой существует необходимость в использовании интеллектуального анализа большого объёма данных от радиосенсоров сети ГНСС.

Цель работы – развитие интеллектуального метода и комплекса средств для сенсорной диагностики предельной полосы частот в трансионосферных радиоканалах связи.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И СРЕДСТВА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПОЛОСЫ ЧАСТОТ

Для трансионосферных систем рабочие частоты значительно превышают критическую частоту глобального максимума ионосферы $\bar{f}/f_0F2 = \bar{\omega}/\omega_0F2 > 10$ (f_0F2 — критическая частота $F2$-слоя), что согласно [Иванов и др., 2023] позволяет для физической модели канала распространения установить связь между ПЭС, полосой когерентности и коэффициентом дисперсии групповой задержки *GDD*.

Так, физическая модель дает следующие выражения для набега фазы и задержки группы частот [Кислицын, 2019]:

$$\phi(\omega,t)=\frac{1}{c}\int_S[\omega\cdot n(\omega,t,z)]\,dz\approx\omega\int_S\frac{dz}{c}-\frac{1}{f}\overbrace{\frac{\pi k}{c}\int_S N_e(z,t)dz}^{\alpha_1}=\omega\int_S\frac{dz}{c}-\frac{\alpha_1(t)}{f},\quad(1)$$

$$\tau_g(f,t)=\frac{d\phi}{d\omega}(f,t)=\frac{1}{2\pi}\left[2\pi\int_S\frac{dz}{c}+\frac{\alpha_1(t)}{f^2}+\ldots\right].\quad(2)$$

где $n(\omega,t,z)$ — показатель преломления, $\alpha_1(t)=8{,}43\cdot10^{-7}\cdot\int_S N_e(t,z)dz$,$N_t(t)=\int_S N_e\,(z,t)dz$ — TEC ионосферы (при больших значениях z).

Если группу частот компактно расположить вокруг частоты $\overline{\omega}$, то набег фазы и задержку группы можно разложить в ряд Тейлора по разностным частотам $\Omega=\omega-\overline{\omega}$:

$$\varphi(\overline{\omega}+\Omega,t)=\varphi(\overline{\omega},t)+\varphi'_\omega(\overline{\omega},t)\cdot\Omega+\frac{\varphi''_\omega(\overline{\omega},t)}{2}\cdot\Omega^2+\ldots,\quad(3)$$

$$\tau_g(\overline{\omega}+\Omega,t)=d\varphi(\overline{\omega}+\Omega,t)/d\omega\approx\tau_g(\overline{\omega},t)+\varphi''_\omega(\overline{\omega},t)\cdot\Omega+\ldots,\quad(4)$$

где φ''_ω — дисперсия групповой задержки.

Известно [Кислицын и др., 2019], что огибающая группы начинает испытывать искажения, если ее полоса частот превысит некоторую предельную полосу частот, называемую полосой когерентного распространения B_k . Тогда для дисперсии второго порядка характерно следующее выражение:

$$\frac{\varphi''_\omega(\overline{\omega},t)}{2}\cdot\left(\frac{\Omega_k}{2}\right)^2=\frac{GDD}{2}\cdot\left(\frac{\Omega_k}{2}\right)^2=1.\quad(5)$$

С учётом (5) для трансионосферного распространения получим выражение полосы когерентности через геофизические характеристики среды в виде:

$$B_k=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{8}{GDD}}=\sqrt{(c\cdot\bar{f}^3)/(\pi kN_t)}=\frac{\bar{f}^{1,5}}{\sqrt{\alpha_1}}=\frac{f_r^{1,5}}{\sqrt{\alpha_1}}\hat{f}^{1,5}=B_{kr}\cdot\hat{f}^{1,5}.\quad(6)$$

где $\hat{f}=\bar{f}/f_r$ — относительная частота; f_r — опорная частота; B_{kr} — полоса когерентности для группы на опорной частоте.

Диагностика предельной полосы частот по полученной математической модели основывается на данных ГНСС-радиосенсоров (рис. 1). Радиосенсоры обеспечивают приёмный терминал информацией со спутников в формате *RINEX*. Программная часть сенсорной системы позволяет обрабатывать большой объём данных формата *RINEX* с целью получения для выбранного времени наблюдений суточных вариаций ПЭС ионосферы по результатам фазовых и кодовых измерений, с дальнейшим пересчётом на значения полос когерентности.

Представленный комплекс позволяет проводить сенсорную диагностику для трёх случаев: 1) определение предельной полосы канала при условии отсутствия ее адаптации к суточным изменениям ПЭС; 2) нахождение предельной полосы с учётом адаптации к вариациям параметра дисперсии; 3) оценка предельной широкополосности при адаптивной коррекции дисперсии методом инверсной фильтрации.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СУТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПОЛОСЫ ЧАСТОТ РАДИОКАНАЛА

Для верификации достижения поставленной цели в Поволжском государственном технологическом университете, ПГТУ (г. Йошкар-Ола) в декабре, марте, июне и сентябре 2022 г. в условиях невозмущенной среднеширотной ионосферы были проведены соответствующие эксперименты. На рис. 2 представлен суточный ход диапазонов изменения предельной полосы частот ТРК с опорной частотой 1 ГГц для различных сезонов года.

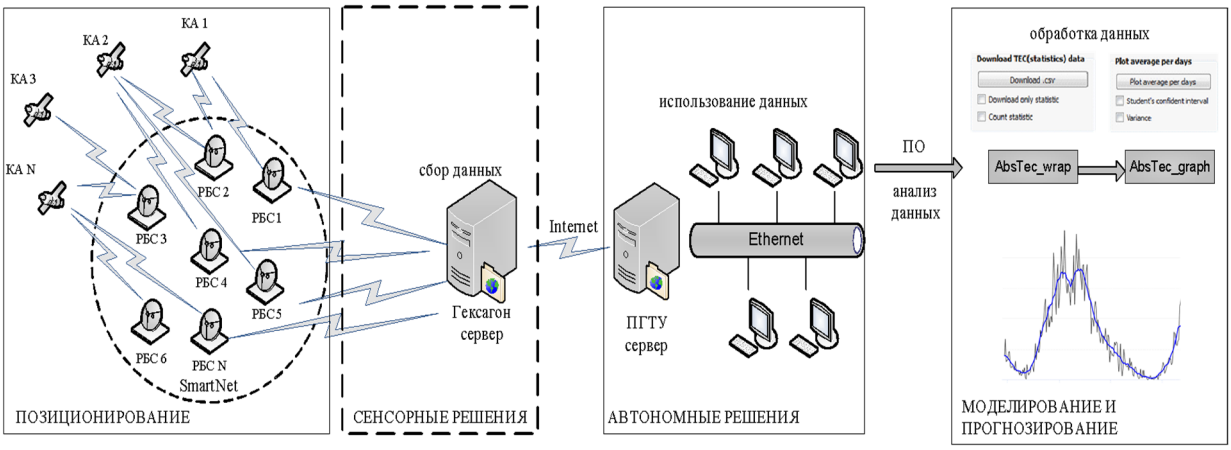

Рис. 1. Структурная схема аппаратно-программного комплекса сенсорной диагностики: КА — космический аппарат систем ГНСС; РБС — референцная базовая станции сети

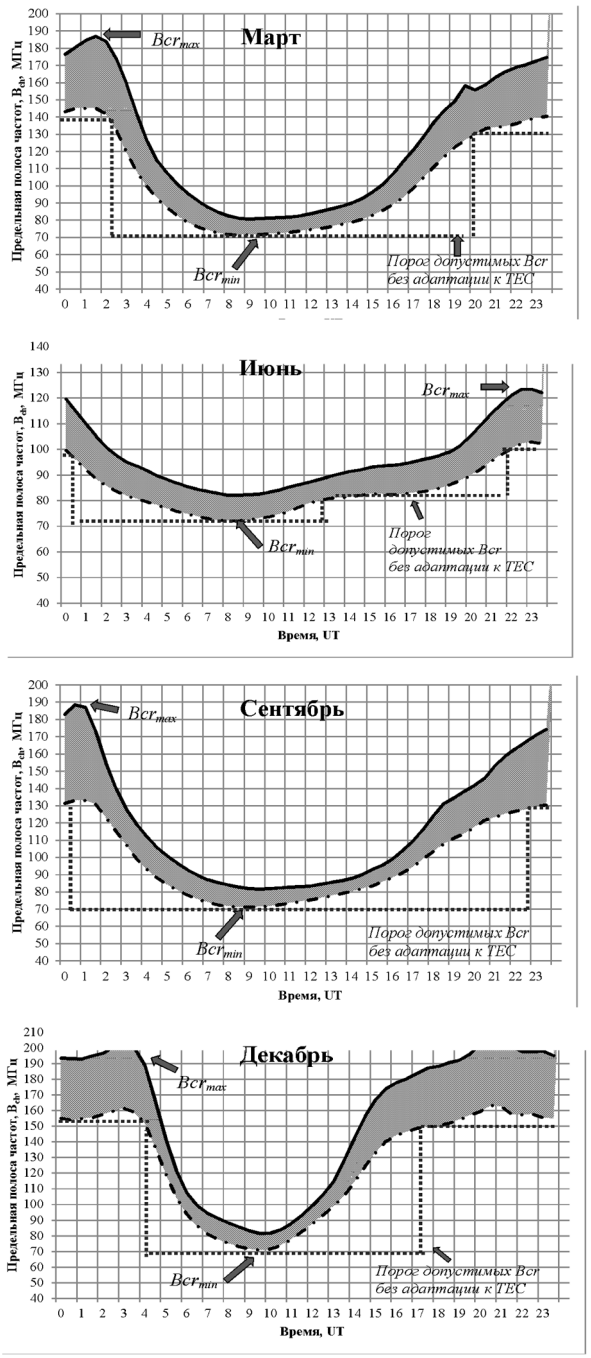

Рис. 2. Суточные ходы полос когерентности ТРК для различных сезонов

Текстура на рисунке характеризует диапазон наблюдавшихся за указанный период значений предельной полосы частот. Так, в марте диапазон вариаций полосы составил 71…187 МГц; в июне 72…123 МГц; в сентябре 71…188 МГц и в декабре 70…202 МГц. Видно, что для всех сезонов значения полосы в дневное время меньше, чем в ночное. Пунктиром показаны значения и интервалы времени для ночных и дневных полос, когда алгоритм их выбора не является адаптивным. При этом дневные полосы являются предельными за сутки, если в алгоритме не учитывать переходы от дня к ночи. Поэтому для всех сезонов предельная полоса по данным 2022 г. не должна превышать 70 МГц.

При адаптации предельная полоса опорного канала может достигать: в марте 145 и 187 МГц, в июне 102 и 123 МГц, в сентябре 133 и 188 МГц, в декабре 163 и 202 МГц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развит метод и комплекс средств для сенсорной диагностики предельной полосы ТРК с дальнейшей её адаптацией к условиям воздействия дестабилизирующих факторов ионосферы при функционировании систем спутниковой связи. Для экспериментальных исследований развит программно-аппаратный комплекс, включающий интеллектуальные пассивные радиосенсоры ГНСС и программное обеспечение, реализующее режимы анализа, машинного обучения и инверсной фильтрации. Метод прошел экспериментальную верификацию в части решения задачи обеспечения предельной полосой частот ТРК. Экспериментально установлено, что на опорной частоте без адаптации можно получить каналы с полосой канала не превышающие 70 МГц. Адаптация к суточным вариациям параметров дисперсии позволяет увеличить полосу когерентности в среднем до 2.5 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Иванов Д.В., Иванов В.А., Кислицын А.А. и др. Адаптивное управление предельной полосой частот систем спутниковой связи в трансионосферных радиоканалах в условиях частотной дисперсии среды // Вестник ПГТУ. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2021. № 3(51). С. 14–30. DOI 10.25686/2306-2819.2021.3.14. EDN UQKLTO

Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В. и др. Обеспечение предельной широкополосности систем спутниковой радиосвязи в условиях внутримодовой дисперсии трансионосферных радиоканалов // Радиотехника и электроника. 2023. Т. 68, № 6. С. 571–578. DOI 10.31857/-S0033849423060049, EDN XLUNDS.

Кислицын А.А. Комплексный подход к адаптивной компенсации дисперсионных искажений системных характеристик широкополосных трансионосферных радиоканалов // Вестник ПГТУ. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2019. № 3(43). С. 6–21.

Пантелеймонов И.Н., Мырова Л.О., Яхин И.Х. и др. Основные перспективные направления системного проектирования сетей и систем спутниковой связи // Электросвязь. 2022. № 8. С. 8–17.

Yasyukevich Y., Mylnikova A., Vesnin A. GNSS-based non-negative absolute ionosphere total electron content, its spatial gradients, time derivatives and differential code biases: Bounded-variable least-squares and Taylor series // Sensors. 2020. V. 20, N 19. P. 1–20. Doi 10.3390/s20195702.

Armand N.A. Propagation of broadband signals in dispersive media // J. Communications Technology and Electronics. 2003. V. 48, N 9. P. 1045–1057.