

ОГРАНИЧЕНИЕ ЧАСТОТНОГО РЕСУРСА ШИРОКОПОЛОСНЫХ КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК X-КЛАССА

Н. В. Рябова, А. А. Кислицын

Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола, Россия
E-mail: KislitsinAA@volgatech.net

Аннотация. В статье исследуется влияние ионизующих электромагнитных излучений солнечных вспышек X-класса на ограничение частотного ресурса широкополосных каналов передачи данных. Предлагаемый подход основан на комплексировании радиофизических и радиотехнических методов, алгоритмов, а также средств сенсорной диагностики сигналами спутников, работающих в диапазоне 1100...1610 МГц, с учётом воздействия неблагоприятных гелиогеофизических факторов в ионосфере. В рамках данного подхода развита аналитическая модель для определения предельной полосы частот, основанной на вычислении значений ПЭС ионосферы. В качестве экспериментальных были выбраны дни, когда наблюдались солнечные вспышки X-класса (более 8). Установлено, что предельная полоса частот в условиях экстремальной солнечной активности сужается в два раза.

Ключевые слова: трансионосферный радиоканал; предельная полоса частот; полное электронное содержание; внутримодовая частотная дисперсия; солнечная вспышка

LIMITATION OF FREQUENCY RESOURCES IN BROADBAND DATA TRANSMISSION CHANNELS UNDER THE INFLUENCE OF X-CLASS SOLAR FLARES

N. V. Ryabova, A. A. Kislitsin

Abstract. This article examines the impact of ionizing electromagnetic radiation from X-class solar flares on the available frequency bandwidth of broadband data transmission channels. The proposed approach integrates radiophysical and radiotechnical methods, algorithms, and sensor diagnostics for satellite signals operating in the 1100 to 1610 MHz range, accounting for the influence of adverse heliogeophysical conditions in the ionosphere. Within this framework, an analytical model was developed to estimate the maximum usable frequency band based on the calculation of ionospheric total electron content (TEC) values. The experimental data was collected on days with X-class solar flares, characterized by solar activity indices above 8. The results indicate that extreme solar activity can reduce the available frequency band by approximately 50%.

Keywords: transitionospheric radio channel; limiting frequency band; total electron content; intramode frequency dispersion; solar flare

Введение

Трансионосферные радиоканалы (ТРК) функционируют на рабочих частотах ВЧ диапазонов: 0,1...40 ГГц (ограниченная часть VHF-диапазона: 0,1–0,3 ГГц; UHF-диапазон: 0,3–1 ГГц; L-диапазон: 1–2 ГГц; С-диапазон: 4–8 ГГц; Ки-диапазон: 12–18 ГГц; Ка-диапазон: 26–40 ГГц) [1] и используются в спутниковой радиосвязи, обеспечивающей передачу или приём информации между промежуточным спутниковым ретранслятором и наземными инфокоммуникационными системами. Учитывая специфику ТРК можно отметить, что ионосфера является средой распространения радиосигнала, которая зависит от распределения электронной концентрации Ne в единице объёма. Таким образом, для корректного анализа радиоволнового распространения и оценки искажений сигнала необходимо учитывать интегральную характеристику распределения электронов по высоте и пути распространения, простирающегося от нижней границы атмосферы до верхней границы ионосферы или выше (как правило до высоты расположения космического аппарата или некоторой эталонной высоты), которая является полным электронным содержанием (ПЭС или ТЕС (англ.)) ионосферы [2]. В свою очередь ПЭС может варьироваться под воздействием различных факторов космической погоды, связанных с геомагнитной активностью Солнца, интенсивностью солнечной лучевой радиации, волновых процессов и т. д. [3]. Таким образом, часть ТРК, расположенной в ионосфере, является неустойчивой составляющей радиоканала, в которой нарушается инвариантность системных характеристик, в том числе предельной полосы

частот (ППЧ), ограниченной полосой когерентности [1]. Именно ионизующее электромагнитное излучение (ИЭИ) солнечных вспышек оказывает значительное влияние на трансионосферную радиосвязь. Таким образом, изучение влияния солнечной активности на широкополосные сигналы является актуальным для функционирования космических систем через ТРК в целом, включая спутники, космические аппараты и коммуникационные средства. При этом важной задачей является оценка предельной полосы частот (полосы когерентности) радиоканала для передачи данных в условиях максимальной солнечной активности.

Целью исследования является выявление и количественная оценка влияния солнечных вспышек X-класса на ограничение частотного ресурса широкополосных каналов передачи данных, а также разработка научно-обоснованных рекомендаций по адаптации оптимальной полосы пропускания радиоканалов в зависимости от индекса солнечной активности.

Теоретическое обобщение математической модели предельной полосы частот в ТРК

Процесс распространения радиоволн на трассе «ИСЗ – Наземная станция» в большей степени сопровождается дисперсионными искажениями из-за воздействия различных неоднородностей ионосферы. В работе [1] было установлено, что существует пропорциональная зависимость ФЧХ и времени группового запаздывания от ПЭС: $\varphi(\bar{f}, t) \sim TEC / \bar{f}$, $\tau(\bar{f}, t) \sim TEC / \bar{f}^2$. В свою очередь, полоса когерентности характеризует противоположную зависимость $B_c \sim \bar{f}^{1,5} / TEC^{0,5}$. Это позволяет выявить аналитическую зависимость для ППЧ, характеризующую эффективную полосу неискаженной передачи, от двух факторов $B_c = \psi[TEC, \bar{f}]$: геофизического (изменение TEC) и системного (несущая частота $f = \omega / 2\pi$). Тогда задача сводится к комплексированию канальной и физической модели для установления связи параметров системных характеристик радиоканалов с ПЭС.

Пройдя всю толщу ионосферы, обладающей пространственными флуктуациями ПЭС, фазовый фронт будет подвергаться внутримодовой частотной дисперсии. При этом набег фазы и групповую задержку волнового пакета можно получить путём разложения в ряд Тейлора группы частот вокруг средней (рабочей) частоты $\bar{\omega}$ по разностным частотам $\Omega = \omega - \bar{\omega}$:

$$\varphi(\bar{\omega} + \Omega) = \varphi(\bar{\omega}) + \varphi'(\bar{\omega})\Omega + \frac{1}{2}\varphi''(\bar{\omega})\Omega^2 = \varphi(\bar{\omega}) + \tau_g(\bar{\omega})\Omega + \frac{1}{2}GDD\Omega^2 \quad (1)$$

$$\tau_g(\bar{\omega} + \Omega) = \frac{d\varphi}{d\omega} = \tau_g(\bar{\omega}) + \frac{d\tau_g}{d\omega}(\bar{\omega})\Omega = \tau_g(\bar{\omega}) + GDD\Omega \quad (2)$$

где $\varphi''(\bar{\omega}, t) = GDD$ – дисперсия групповой задержки.

Для ТРК групповая задержка убывает с ростом частоты ($GDD < 0$). Это значит, что в канале быстрее распространяются ВЧ-составляющие волнового пакета и поэтому дисперсия в ТРК является аномальной.

Анализируя выражение (1), условие, при котором на границах полосы когерентности нелинейная составляющая фазового набега на граничной частоте отличается от фазового набега на центральной частоте на 1 рад, будет иметь вид:

$$\frac{\varphi''(\bar{\omega}, t)}{2} \cdot \left(\frac{\Omega_k}{2} \right)^2 = \frac{GDD}{2} \cdot \left(\frac{\Omega_k}{2} \right)^2 = 1. \quad (3)$$

На основе (3) для циклических частот в ТРК, с учётом того, что в физической модели трансионосферного распространения волн используется ВЧ-приближение, выражение для полосы когерентности, учитывающее геофизические параметры среды будет иметь вид:

$$\Omega_c = \sqrt{8 / |GDD|} = 4\pi \sqrt{\frac{cf^3}{kTEC}} = 4\sqrt{\frac{\pi c f_r^3}{kTEC}} \cdot \frac{3}{RF^2} = \Omega_{cr} \cdot \frac{3}{RF^2}. \quad (4)$$

где f_r – опорная частота; и $RF = \bar{f} / f_r$ (RF – Relative Frequency) – относительная частота.

При пересчёте в угловые частоты выражение примет вид:

$$B_c = \frac{\Omega_c}{2\pi} = B_{cr} \cdot RF^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

Тогда можем установить, что геофизический фактор выражается через ПЭС и характеризует изменения первого сомножителя B_{cr} в (5), а системный фактор заложен во втором сомножителе, позволяющий пересчитывать полученные значения B_c на опорной частоте на любую другую рабочую частоту \tilde{f} , причём с ростом рабочей частоты полоса когерентности увеличивается согласно функции $RF^{1.5}$.

Конфигурация измерительной системы на основе радиосенсоров ГНСС

и экспериментальные исследования ППЧ при различной солнечной активности

Для решения поставленных задач была модернизирована конфигурация системы измерения информационно-технических характеристик на основе пассивных радиосенсоров, работающих в диапазоне частот 1100...1610 МГц (рис. 1). Система базируется на данных референцной сети *Smartnet*, которая обеспечивает приёмные терминалы информацией со спутников в формате *RINEX*. Программная часть позволяет обрабатывать большой объём данных формата *RINEX* с целью получения для выбранного времени наблюдений суточных вариаций ПЭС ионосферы по результатам фазовых и кодовых измерений. Кроме того, в систему включен блок анализа данных лаборатории солнечной астрономии [<https://xras.ru>] для исследования влияния комической погоды на передачу сигналов ГНСС, а также адаптирования системных (технических) характеристик к оптимальным условиям передачи и приема.

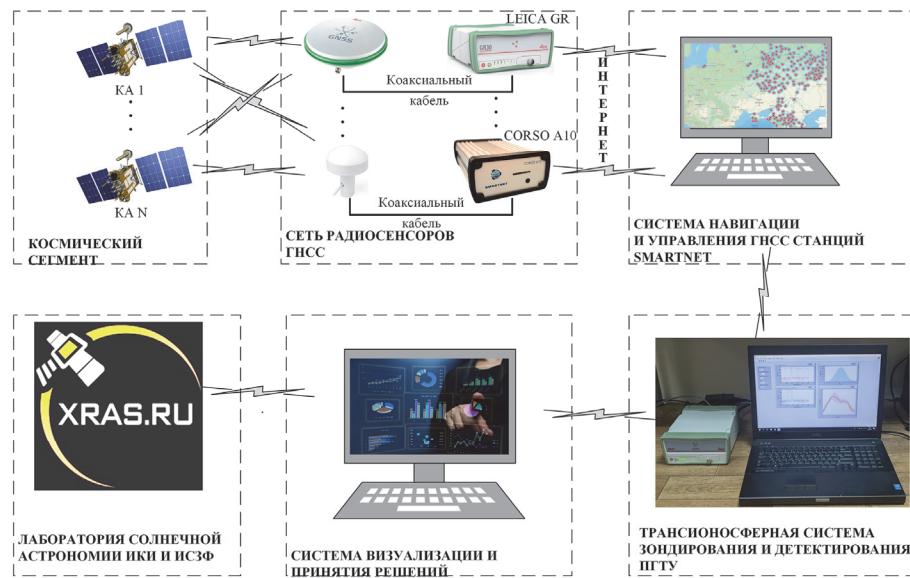


Рис. 1. Конфигурация системы измерения ППЧ на основе радиосенсоров ГНСС

На первом этапе экспериментальных исследований была проанализирована геомагнитная обстановка за 2022–2024 гг. для определения периодов с максимальной солнечной активностью. Далее были рассчитаны суточные значения ПЭС для каждого периода по данным станции YOSH. При этом массив данных включал дни до достижения пикового значения индекса солнечной активности (ИСА) и после. На заключительном этапе согласно (5) была рассчитана ППЧ, пример суточных ходов которых для мая 2023 года представлены на рис. 2.

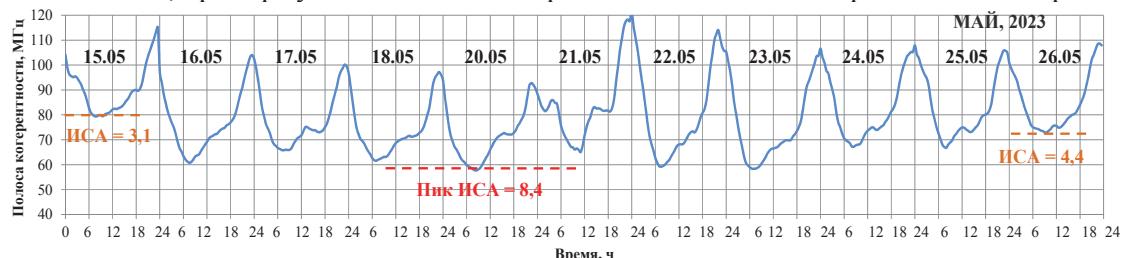


Рис. 2. Суточные ходы предельной полосы частот трансионосферного радиоканала

Анализ полученных результатов показал, что ППЧ уменьшается в момент возрастания солнечной активности, которая сохраняет своё воздействие до пяти дней после завершения вспышечной активности. Для выявления общей тенденции были построены регрессионные модели для установления выраженной зависимости значений ППЧ от ИСА, в результате, которых был рассчитан линейный тренд с использованием метода наименьших квадратов по экспериментальным данным за май и сентябрь за 2022–2024 гг.

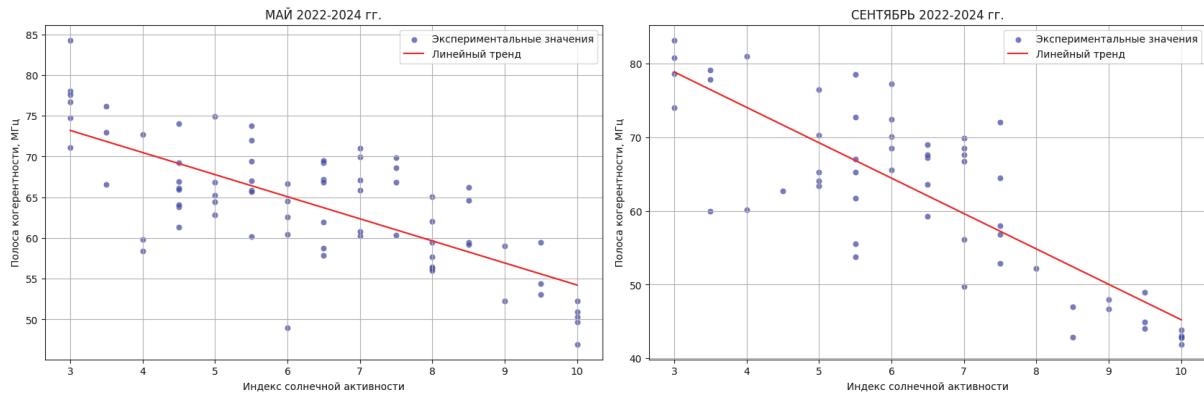


Рис. 3. Регрессионный модели выявления зависимости ППЧ от ИСА

В исследованные периоды установлено, что максимальные значения ППЧ за сутки варьируются в диапазоне от 46 до 85 МГц в мае и от 42 до 83 МГц в сентябре, с наибольшими значениями, наблюдаемыми при ИСА (3–7), и постепенным уменьшением ППЧ при увеличении ИСА до 10 (вспышки X-класса).

Заключение

Создан подход и комплекс средств сенсорной диагностики трансионосферных радиоканалов на основе сочетания радиофизических и радиотехнических методов с целью экспериментального определения изменения частотного ресурса широкополосных каналов передачи данных при влиянии ионизующих электромагнитных излучений солнечных вспышек X-класса. В рамках данного подхода развита аналитическая модель определения ППЧ, основанная на вычислении значений ПЭС ионосферы. Проведенный регрессионный анализ экспериментальных данных подтверждает зависимость между ППЧ и ИСА, которая выражается снижением значений предельной полосы частот трансионосферного широкополосного радиоканала при увеличении индекса солнечной активности. Установлено, что при достижении ИСА красного уровня (более 8), характеризующего вспышки X-класса, предельная полоса частот в условиях экстремальной солнечной активности сужается примерно в два раза. Для обеспечения стабильной работы систем спутниковой связи рекомендуется адаптировать их рабочие параметры, включая динамическую настройку полосы частот, в зависимости от текущего индекса солнечной активности.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 23-19-00145.

Список литературы

1. Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В., Кислицын А.А. Обеспечение предельной широкополосности систем спутниковой радиосвязи в условиях внутримодовой дисперсии трансионосферных радиоканалов // Радиотехника и электроника. – 2023. – Т. 68, № 6. – С. 571–578.
2. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.Ч. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. – Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. – 480 с.
3. Синтез, анализ и прогнозирование характеристик ионосферных линий декаметровой радиосвязи: монография / В.А. Иванов, Н.В. Рябова, Д.В. Иванов и др.; под общ. ред. проф. В.А. Иванова. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2011. – 180 с.