УДК 621.396.94; 004.89
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-439
ORCID: 0000-0003-4227-5240

# СУТОЧНО-СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ ДОПУСТИМЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПОЛОС ТРАНСИОНОСФЕРНЫХ КАНАЛОВ ДЛЯ СЛУЧАЕВ, КОГДА ЧИРПИНГ-ЭФФЕКТОМ МОЖНО ПРЕНЕБРЕЧЬ

**Д.В. Иванов[1], В.А. Иванов[1], А.А. Кислицын[1], Н.В. Рябова[1]**

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

# DIURNAL AND SEASONAL VARIATIONS IN ACCEPTABLE BANDWIDTHS OF TRANSIONOSPHERIC CHANNELS UNDER NEGLIGIBLE CHIRPING EFFECT

**D.V. Ivanov[1], V.A. Ivanov[1], A. A. Kislitsin[1] N. V. Ryabova[1]**

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

**Аннотация.** Рассматривается проблема ограничения полосы частот широкополосных трансионосферных радиоканалов, обусловленная проявлением аномальной внутримодовой дисперсии и связанного с ней чирпинг-эффекта. На основе комплексного подхода развита математическая модель чирпинг-эффекта, учитывающая особенности распространения сигналов с расширенным спектром через трансионосферный радиоканал. Получены аналитические выражения для параметров групповой задержки, коэффициента дисперсии *GDD* и предельной полосы частот *FBL*, позволяющие на основе суточно-сезонных моделей анализировать допустимые значения полосы каналов в случае, когда чирпинг-эффектом можно пренебречь. Установлено, что для каналов на эталонной рабочей частоте 1 ГГц чирпинг-эффектом всегда можно пренебречь для полос, не превышающих 40─50 МГц. При этом ночная граница предельной полосы частот весной составляет ~60 МГц, а осенью она увеличивается до 75 МГц. В периоды солнечных вспышек для весеннего сезона допустимая дневная граница предельной полосы частот составляет 50 МГц, для осеннего она снижается до 40 МГц.

**Ключевые слова:** чирпинг-эффект, аномальная дисперсия, дисперсия групповой задержки, полное электронное содержание, трансионосферный радиоканал, предельная полоса частот.

**Abstract.** This paper investigates bandwidth limitations in wideband transionospheric radio channels caused by anomalous intramode dispersion and its associated chirping effect. A comprehensive mathematical model of the chirping effect is developed, taking into account the propagation characteristics of spread-spectrum signals in transionospheric radio channels. Analytical expressions for group delay, the group delay dispersion (*GDD*) coefficient, and the limiting bandwidth (*FBL*) are derived, enabling us to analyze acceptable channel bandwidths under conditions where the chirping effect can be neglected, based on diurnal and seasonal ionospheric models. The results show that, for channels with a reference operating frequency of 1 GHz, the chirping effect can generally be neglected when the bandwidth does not exceed 40–50 MHz. In spring, the nighttime limiting bandwidth is approximately 60 MHz, while in autumn it increases to about 75 MHz. During periods of solar flare activity, the permissible daytime limiting bandwidth is approximately 50 MHz in spring and decreases down to about 40 MHz in autumn.

**Keywords:** chirping effect, anomalous dispersion, group delay dispersion, total electron content, transionospheric radio channel, limiting bandwidth.

## ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие спутниковых систем связи (ССС) связано с необходимостью обеспечения высокоскоростной передачи данных, устойчивой работы мультимедийных сервисов и увеличения пропускной способности трансионосферных радиоканалов (ТРК). Решение данной задачи достигается, прежде всего, за счет расширения полосы частот передаваемых сигналов и внедрения технологий WGS (Wideband Global Satcom), HTS (High Throughput Satellites) и VHTS (Very High Throughput Satellite), обеспечивающих передачу информации в широком диапазоне частот [Чепурнов и др., 2020; Olfa Ben Yahia et al., 2023].

Известно, что увеличение широкополосности ТРК сопровождается возникновением дисперсионных искажений, обусловленных ионизированной структурой атмосферы Земли [Иванов, 2006]. При влиянии ионосферы возникает частотная зависимость групповой задержки спектральных составляющих волнового пакета, которая приводит к чирпинг-эффекту, представляющему собой линейную зависимость задержки волнового пакета в ионосфере от частоты [Иванов и др, 2025; Иванов и др., 2026], и вызывает деформацию импульсной характеристики радиоканала. Этот эффект ограничивает возможность использования волновых пакетов с полосой, превышающей полосу когерентности ТРК.

Ключевым параметром чирпинг-эффекта является дисперсия групповой задержки (Group Delay Dispersion, *GDD*), обусловленная частотной фазовой дисперсией второго порядка. Установлена аналитическая зависимость параметра *GDD* от характеристики среды — полного электронного содержания (ПЭС или TEC). Несмотря на значительное количество исследований, посвященных распространению радиоволн в ионосфере, влияние внутримодовой дисперсии второго порядка на параметры широкополосных ТРК остается недостаточно изученным. В частности, отсутствуют модели, позволяющие учитывать суточно-сезонную изменчивость параметров

чирпинг-эффекта и прогнозировать предельно допустимые значения полос для систем без коррекции дисперсии.

Целью работы является разработка суточно-сезонных моделей допустимых значений полос частот трансионосферного канала в условиях пренебрежимо малого чирпинг-эффекта на основе комплексного радиотехнического и радиофизического подходов анализа распространения широкополосных волновых пакетов.

## КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ ЧИРПИНГ-ЭФФЕКТА ПРИ ТРАНСИОНОСФЕРНОМ РАСПРОСТРАНЕНИИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

В рамках радиотехнического подхода ТРК рассматривается как эквивалентная линейная система, характеризуемая частотной и импульсной характеристиками. Такой подход основан на гипотезе эквивалентности распространения волновых пакетов в диспергирующей среде и прохождения сигналов через линейную систему [Арманд, 2003; Иванов, 2006].

Для анализа частотной характеристики канала $\omega \in [\bar{\omega} - \Omega_{ch}/2,\ \bar{\omega} + \Omega_{ch}/2]$ используется разложение ФЧХ в ряд Тейлора относительно рабочей частоты:

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

Поскольку приращение фазы равно $\Delta\varphi = \varphi(\bar{\omega} + \Omega) - \varphi(\bar{\omega})$, а дифференциал $d\varphi = \varphi'(\bar{\omega}) \cdot \Delta\omega = \varphi'(\bar{\omega}) \cdot \Omega$, то выражение (1) преобразуется к виду

$$\Delta\varphi = \varphi(\bar{\omega} + \Omega) - \varphi(\bar{\omega}) = \varphi'(\bar{\omega}) \cdot \Omega + \frac{1}{2}\varphi''(\bar{\omega}) \cdot \Omega^2 = d\varphi + \frac{1}{2} GDD(\bar{\omega}) \cdot \Omega^2, \quad (2)$$

где $\tau_g'(\bar{\omega}) = \varphi''(\bar{\omega}) = GDD(\bar{\omega})$ — дисперсия групповой задержки.

Откуда

$$\Delta\varphi - d\varphi = \frac{1}{2} GDD(\bar{\omega}) \cdot \Omega^2, \begin{cases} GDD(\bar{\omega}) \cdot \Omega^2 = 0, \text{сигнал без искажений,} \\ GDD(\bar{\omega}) \cdot \Omega^2 \neq 0, \text{сигнал искажается.} \end{cases} \quad (3)$$

Разность $\Delta\varphi - d\varphi$ определяет величину искажений, но в некоторой полосе $\Omega_c$ при $|\Delta\varphi - d\varphi| < \Phi_0$ искажения могут оказаться малыми из окрестности $\bar{\omega}$. Это справедливо, когда фазы спектральных компонент волновых пакетов изменяются в канале согласованно и можно говорить об их когерентности. Полосу частот $\Omega_c$, для которой величина $|\Delta\varphi - d\varphi| < \Phi_0$ достаточно мала, принято называть полосой когерентности радиоканала. В качестве предельного значения $\Phi_0$ принято выбирать 1 рад ($\Phi_0 = 1$) [Иванов, 2006]. Таким образом, уравнение $|GDD(\bar{\omega})| \cdot \Omega^2/2 = 1$ позволяет вычислить граничные частоты полосы когерентности: $\Omega_{c1,2} = \mp\sqrt{2/|GDD(\bar{\omega})|}$. В конечном итоге полоса когерентности будет равна:

$$\Omega_c = 2\sqrt{2/|GDD(\bar{\omega})|} = \sqrt{8/|GDD(\bar{\omega})|} \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что, чем меньше модуль параметра дисперсии, тем полоса когерентности больше. Из симметрии нелинейной составляющей фазы от частоты наибольшее значение набега нелинейной составляющей достигается на границах полосы канала, т. е. при $\Omega = \mp\Omega_{\text{ch}}/2$. Поэтому наибольшее значение набега, равное 1, достигается при условии совпадения полосы канала с его полосой когерентности, т. е. $\Omega_{ch}/2 = \Omega_c/2$ или $\Omega_{ch} = \Omega_c$. Если полоса канала меньше полосы когерентности, дисперсией можно пренебречь. В противном случае это соответствует явлению существенной дисперсии.

Отметим, что для передачи СРС в ТРК без дисперсионных искажений их полоса частот не должна превышать полосы когерентности канала, которую в таком случае следует рассматривать как предельную полосу частот сигнала *FBL* (Frequency Band Limit):

$$\Omega_{\text{lim}} = \Omega_{\text{c}} = \sqrt{8/GDD(\bar{\omega})},$$

$$F_{\text{lim}} = F_{\text{c}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{8}{GDD(\bar{\omega})}} = \frac{2}{\sqrt{\pi GDD(\bar{f})}}, \quad (5)$$

где $GDD(\bar{\omega}) = \frac{d\tau_g}{d\omega} = \frac{1}{2\pi}\frac{d\tau_g}{df} = \frac{1}{2\pi} GDD(\bar{f})$, $\Omega = 2\pi \cdot F$.

Физический подход позволяет получить соотношения для связи между физическими характеристиками среды с ТЕС и параметрами чирпа диспергирующего ТРК [Иванов и др., 2026]:

$$GDD(\bar{f}) = -\frac{3}{2\pi^2}\frac{k}{c\bar{f}^3} N_{Vt} = -\frac{3}{2\pi^2}\frac{k}{c\bar{f}^3} VTEC, \quad (6)$$

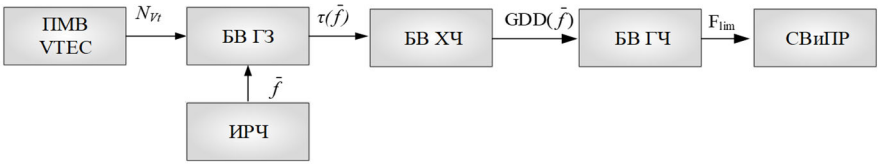
где $N_{Vt} = \int_s N_{\text{e}}(z)dz$ – ПЭС (TEC) при больших значениях высоты $z$.

Таким образом, допустимая полоса частот обратно пропорциональна квадратному корню модуля параметра дисперсии, а параметр чирпирования *GDD* прямо пропорционален ТЕС и поэтому в случае его увеличения приводит к сужению *FBL* канала.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СУТОЧНО-СЕЗОННЫЕ МОДЕЛИ ДОПУСТИМЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПОЛОС ЧАСТОТ ТРК ДО ПРОЯВЛЕНИЯ ЧИРПИНГ-ЭФФЕКТА

Натурные исследования допустимой частоты проявления чирпинг-эффекта в ТРК проводились на основе аппаратно-программного комплекса, созданного в ФГБОУ ВО «ПГТУ» (г. Йошкар-Ола). Его основой являются пассивные радиосенсоры референцной сети SmartNet [https://smartnetrtk.ru/]. Исследовались предельные полосы частот для вертикальных трасс по сезонным данным 2024 г. на эталонной частоте 1 ГГц. В выбранные сезоны входили также экстремальные условия, соответствующие солнечным вспышкам типа X.

В программном модуле вычисления *VTEC*, интегрированном в разработанную блок-схему определения граничной частоты (рис. 1), осуществляется обработка большого объема данных формата RINEX с целью получения суточных вариаций *VTEC* ионосферы. Полученные результаты являются ключевыми для вычисления групповой задержки, которая с учетом второго слагаемого при разложении в ряд Тейлора, позволяет рассчитать параметр чирпа *GDD*. В результате дальнейшей обработки получаем оценки текущих значений




ПМВ VTEC – программный модуль вычисления *VTEC*, БВ ГЗ – блок вычисления групповой задержки, ИРЧ – инициализация рабочей частоты, БВ ХЧ – блок вычисления характеристики чирпинга, БВ ГЧ – блок вычисления граничной частоты, СВиПР – система визуализации и принятия решения

*Рис. 1.* Блок-схема определения граничной частоты проявления чирпинг-эффекта

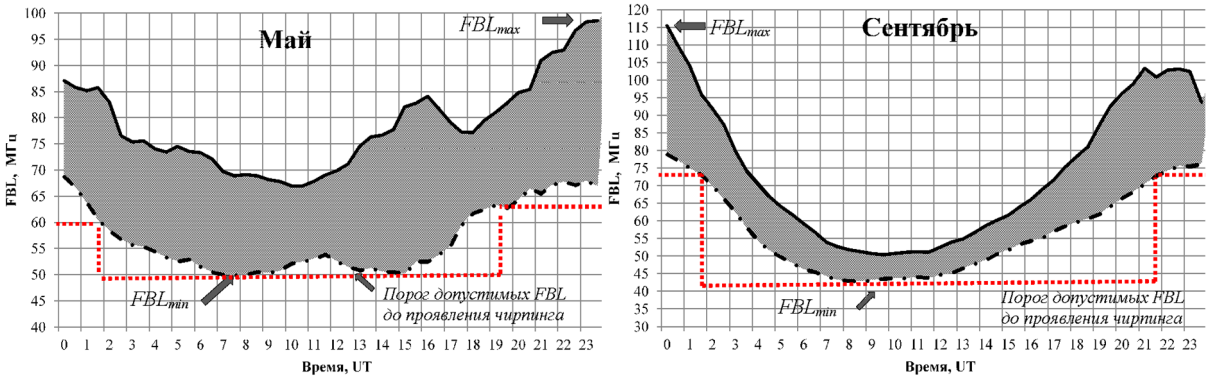



*Рис. 2.* Суточно-сезонные модели *FBL* до проявления чирпинт-эффекта по данным 2024 г.

параметров *GDD*, значения которых показывают, в том числе, начало проявления чирпинг-эффекта, когда полоса частот выходит за граничные значения предельной полосы частот *FBL* (5). Для анализа *FBL* в комплекс включена система построения их суточно-сезонных моделей.

На рис. 2 показаны суточно-сезонные модели допустимых значений полос частот ТРК до проявления чирпинг-эффекта в мае и сентябре 2024 г. Следует отметить, что для обеспечения репрезентативности анализа были выбраны именно эти периоды, поскольку присутствовали дни с повышенной геодинамической активностью. Так, в мае 2024 г. уровень солнечных вспышек изменялся от X1.0 до X8.7, а в сентябре 2024 г. — от X1.3 до X4.3. Первичные результаты показали увеличение *VTEC* до 63.8 TECU в мае и до 66.3 TECU в сентябре 2024 г. В свою очередь, это способствовало ограничению частотного ресурса в системах спутниковой связи.

Как показывает рис. 2, по результатам суточно-сезонных вариаций *FBL* порог допустимых значений полос (красная пунктирная линия), при котором чирпинг-эффектом можно пренебречь, ограничивается минимальными значениями $FBL_{\min}$. Допустимая ночная граница *FBL* увеличивается до 60 МГц в весенний период и до 75 МГц в осенний. Кроме того, видно, что для эталонных каналов в дневное время весны— осени в периоды солнечных вспышек допустимая дневная граница *FBL* составляет 50 МГц, а для осеннего снижается до 40 МГц.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе комплексного подхода, включающего радиофизический и радиотехнический методы, создана суточно-сезонная модель допустимых значений полос частот трансионосферного радиоканала, т. е. для полос, при которых чирпинг-эффектом можно пренебречь. Для анализа задачи получены аналитические выражения, описывающие влияние дисперсии групповой задержки на параметры широкополосного ТРК. Установлено, что ключевым параметром, определяющим допустимую полосу частот, является коэффициент дисперсии групповой задержки *GDD*, непосредственно связанный с *TEC* ионосферы. При этом параметр чирпирования *GDD* прямо пропорционален *TEC* и поэтому в случае его увеличения приводит к сужению предельной полосы частот (*FBL*) канала. Экспериментальные исследования, выполненные на основе данных ГНСС для станции YOSH, позволили оценить и проанализировать суточно-сезонные вариации предельно допустимых полос частот для вертикальных трасс на эталонной рабочей частоте 1 ГГц. Установлено, что для каналов на эталонной рабочей частоте чирпинг-эффектом всегда можно пренебречь для полос, не превышающих 40–50 МГц. При этом ночная граница предельной полосы частот весной составляет ~60 МГц, а осенью увеличивается до 75 МГц. Установлено, что для каналов на данной рабочей частоте в периоды солнечных вспышек для весеннего сезона, допустимая дневная граница предельной полосы частот составляет 50 МГц, а для осеннего снижается до 40 МГц.

Увеличение предельной полосы канала сверх предельно допустимого значения возможно лишь за счет применения методов фильтрации чирпинг-эффекта, что требуют проведения отдельного исследования.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 25-19-00153.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


Арманд Н.А. Распространение широкополосных сигналов в дисперсионных средах // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48, № 9. С. 1045–1057.

Иванов Д.В. Методы и математические модели исследования распространения в ионосфере сложных декаметровых сигналов и коррекции их дисперсионных искажений: монография. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2006. 266 с.

Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В. и др. Создание комплексной модели чирпинг-эффекта трансионосферного широкополосного радиоканала. Ч. 1. Радиотехнический подход // Радиотехника. 2025. Т. 89, № 12. С. 147–159. DOI: 10.18127/j00338486-202512-16. EDN HCSHNY.

Иванов Д.В., Иванов В.А., Кислицын А.А. и др. Создание комплексной модели чирпинг-эффекта трансионосферного широкополосного радиоканала. Ч. 2. Физический подход // Радиотехника. 2026. Т. 90, № 1. С. 94–105. DOI 10.18127/j00338486-202601-09. EDN KALECQ.

Чепурнов П.А., Петриченко А.В., Яковлев Р.С. и др. Анализ развития систем спутниковой связи ведущих зарубежных стран с космическими аппаратами на геостационарной орбите на период до 2025 г. // Информация и космос. 2020. № 3. С. 34–41. EDN ITFDXN.

Ben Yahia O., Garroussi Z., B´elanger O., et al. Evolution of high throughput satellite systems: vision, requirements, and key technologies // arXiv preprint. 2023. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.04389.

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, 2020. DOI: 10.3390/s20195702.