

Региональные и временные изменения основных параметров частотной дисперсии в широкополосных трансионосферных каналах радиосвязи

Д. В. Иванов, В. А. Иванов, Н. В. Рябова, А. А. Кислицын

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный технологический университет»
пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, 424000,
E-mail: KislitsinAA@volgatech.net*

Предложен метод для экспериментального исследования влияния дисперсии в трансионосферном радиоканале с учётом разделения системного и геофизического факторов. Метод основан на математической модели частотной дисперсии, отличающейся введением опорной частоты. Это позволило разделить в дисперсии геофизические и частотные переменные. В экспериментах исследованы особенности влияния геофизических факторов на частотную дисперсию в широкополосных каналах на опорной частоте и дано правило их пересчета на произвольные частоты. Установлены особенности фазовой дисперсии в зависимости от широты расположения приемника сигналов.

Ключевые слова: трансионосферный радиоканал, частотная дисперсия, широтная зависимость дисперсии, широкополосные системы спутниковой связи.

Regional and temporal changes in the main parameters of frequency dispersion in wideband transionospheric radio communication channels

D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, A. A. Kislitsin

*Volga State University of Technology
3, Lenin Sq., Yoshkar-Ola, Republic of Mari El, 424000,
E-mail: KislitsinAA@volgatech.net*

We propose a method for carrying out experimental studies into the effect of dispersion in transionospheric radio channel, taking into account systemic and geophysical factors separately. The method is based on the mathematical model of frequency dispersion, which is distinguished by introducing a reference frequency. This allowed to separate geophysical and frequency variables in dispersion. Experiments were focused on the features of the influence of geophysical factors on the frequency dispersion in wideband channels at the reference frequency. There is presented a rule for its recalculation into different operating frequencies. The features of phase dispersion depending on the latitude of the signal receiver were revealed.

Keywords: transionospheric radio channel, frequency dispersion, latitude dependence of dispersion, wideband satellite communication systems

Введение

Расширение полосы частот спутниковой связи создает ряд преимуществ системам передачи информации. Однако существенному расширению полосы препятствует изменчивая частотная дисперсия ионосферы. Для преодоления дисперсии на практике стали разрабатывать системы эквалайзирования, которые предполагают методическое и алгоритмическое обеспечение. Их создание требует развития моделей трансионосферного распространения. К ним относятся физические, каналные и гибридные модели. В последнее время основное внимание уделяется гибридным моделям [1]. Показано, что в уравнении фазовой дисперсии можно разделить переменные на те, которые отвечают за геофизические процессы в среде распространения и те, которые отвечают за частотные зависимости. В последнем случае вводится опорная частота. Для учета геофизики используется характеристика, называемая полным электронным содержанием (ПЭС или

ТЕС (англ.)). ПЭС определяется интегралом от профиля электронной концентрации ионосферы. Известно [2, 3], что профиль концентрации ионосферы испытывает различные вариации (суточные, сезонные, связанные с циклом солнечной активности и случайными возмущениями). Очевидно, что они приводят к соответствующим пространственно-временным вариациям ПЭС и, как следствие, ввиду прямой пропорциональности, к вариациям коэффициента дисперсии изменчивого трансionoсферного радиоканала, а также к изменению основных параметров частотной дисперсии.

Таким образом, анализ изменения интегральной концентрации электронов ионосферы позволяет на основе коэффициента дисперсии оценить степень влияния фазо-частотных искажений на достоверность передачи сложных сигналов, что весьма актуально для инфокоммуникационных систем, базирующихся на спутниковых системах. Отметим, что задача исследования влияния вариаций ПЭС на коэффициент и параметры дисперсии изучена в недостаточной степени, что вызывает определенные трудности для технических решений.

Цель работы – исследование региональных и временных изменений основных параметров частотной дисперсии в широкополосных трансionoсферных каналах радиосвязи для оценки их зависимости от географической широты.

Метод, используемый для мониторинга параметров дисперсии трансionoсферного радиоканала

Метод основан на гибридной модели, объединяющей физическую и канальную модели распространения радиоволн. В рамках канальной модели задача распространения описывается в терминах частотной характеристики (ЧХ) эквивалентной среде радиоканала. При этом частотная характеристика $H(j\omega, t)$ канала имеет динамический характер (учитывается медленное время t) и определяется следующим выражением [4]:

$$H(j\omega, t) = H(\omega, t) \exp[-j\varphi(\omega, t)], \quad (1)$$

где $H(\omega, t)$ – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) канала; $\varphi(\omega, t)$ – фазо-частотная характеристика (ФЧХ) канала.

В свою очередь, АЧХ и ФЧХ могут быть получены экспериментально с помощью физической модели на основе волнового уравнения [5], решение которого говорит о том, что у каждого излучённого гармонического колебания в результате распространения происходит ослабление амплитуды и сдвиг фазы. При этом из физической модели следует, что набег фазы волны в среде в лучевом приближении равен:

$$\varphi(\omega) = (1/c) \int_s [\omega \cdot n(\omega, z)] dz \approx \omega \int_s (1/c) dz - [(\alpha_1/f) + (\alpha_2/f^3) + (\alpha_3/f^5)], \quad (2)$$

где $\alpha_1 = 8,43 \cdot 10^{-7} \cdot \int_s N_e(z) dz$, $\alpha_2 = 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot \int_s N_e^2(z) dz$, $\alpha_3 = 6,82 \cdot 10^{-4} \cdot \int_s N_e^3(z) dz$ – коэффициенты разложения набег фазы волны в ряд Тейлора по степеням $(1/f)$; $N_t = \int_s N_e(z) dz$ – ПЭС ионосферы.

В рамках канальной модели для радиоканала, у которого полоса частот B_{ch} меньше средней частоты $\bar{f} = (f_1 + f_2)/2$ справедливо разложение ФЧХ в степенной ряд [6]:

$$\varphi(f, t) = \varphi(\bar{\omega}, t) + \varphi'(\bar{\omega}, t) \cdot (\Omega) + \frac{\varphi''}{2}(\bar{\omega}, t) (\Omega)^2 = \varphi(\bar{f}, t) + 2\pi\tau_g(\bar{f}, t) \cdot (F) + \pi s(\bar{f}, t) (F)^2, \quad (3)$$

где $F = \Omega/2\pi = f - \bar{f}$ – разностная частота; $F \in [-B_{ch}/2, B_{ch}/2]$; $\tau_g(\bar{f}, t) = d\varphi/d\omega$, $s(\bar{f}, t) = d\tau_g/d\bar{f} = 2\pi \cdot \varphi''$ – параметры фазовой дисперсии первого и второго порядка.

Известно, что ФЧХ канала на полосе его частот совпадает с набегом фазы волны в среде распространения [5, 7]. Из физической модели следует [8], что для частот $f > 7f_c$ (f_c

– критическая частота ионосферы) набег фазы характеризуется двумя факторами $\varphi=\psi[f, \alpha]$: системным - рабочая частота f и геофизическим – ПЭС. Поэтому гибридная модель приводит к следующим решениям для параметров фазовой дисперсии через системные и геофизические характеристики:

$$\tau_g(\bar{f}, t) = \int_s \frac{dz}{c} + \frac{\alpha_1}{2\pi\bar{f}^2} = \int_s \frac{dz}{c} + \frac{k}{2 \cdot c \cdot \bar{f}^2} \cdot N_t(t), \quad (4)$$

$$s(\bar{f}, t) = -\frac{1}{\pi} \frac{\alpha_1}{\bar{f}^3} = -\frac{k}{c \cdot \bar{f}^3} \cdot N_t(t). \quad (5)$$

где $k=80,5[M^3/c^2]$

Из (4) и (5) видно, что параметры фазовой дисперсии зависят от геофизического и системного фактора. Для их разделения введем опорную частоту f_r . Тогда переменные разделяются, а выражения для параметров принимают вид:

$$\tau(\hat{f}, t) = \int_s \frac{dz}{c} + \frac{k \cdot N_t}{2 \cdot c \cdot f_r^2} \left(\frac{f_r}{\hat{f}} \right)^2 = \int_s \frac{dz}{c} + \tau_r \cdot \eta_f^2; \quad (6)$$

$$s(\hat{f}, t) = -\frac{k \cdot N_t}{c \cdot f_r^3} \left(\frac{f_r}{\hat{f}} \right)^3 = s_r \cdot \eta_f^3; \quad (7)$$

τ_r – дисперсионная характеристика (ДХ) на опорной частоте; s_r – параметр дисперсии второго порядка на опорной частоте, η_f – коэффициент пересчета частот.

Полученные формулы позволяют задачу исследования дисперсии разделить на две части. В первой исследовать влияние геофизических факторов на каналы, размещенные на опорной частоте $\bar{f} = f_r$. Во второй – пересчитывать полученные данные на требуемые рабочие частоты \hat{f} .

Было показано [9], что дисперсионные искажения системных характеристик незначительны, если полоса частот канала меньше полосы когерентности, т.е. полосы частот, на границах которой набег фазы из-за параметра дисперсии второго порядка не превышает 1 радиан, т. е. $\pi s(f, t) (B_k/2)^2 = 1$ (см. рис.1)

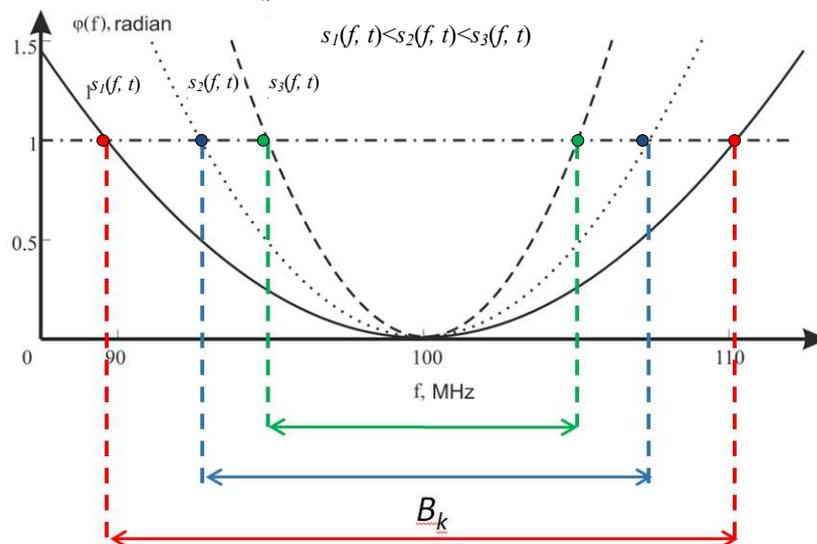


Рис. 1. Влияние коэффициента дисперсии на полосу когерентности

Аналитически формула для полосы когерентности имеет вид:

$$B_k = 1/\sqrt{\pi \cdot |s(\bar{f}, t)|} = \sqrt{\frac{c \cdot \bar{f}^3}{\pi \cdot k \cdot N_t}} = \sqrt{\frac{\bar{f}^3}{\alpha_1}} = B_{kr} \cdot (\eta_f)^{-1,5}, \quad (8)$$

где $B_{kr} = \mu_r \cdot N_t^{-1/2}$ – полоса когерентности для канала на опорной частоте; $\mu_r = \sqrt{((f_r^3)/(\alpha_1))}$ – коэффициент для опорной частоты.

Формула (8) позволяет в натурных и вычислительных экспериментах оценивать параметры дисперсии, а также полосу когерентности для произвольной частоты, если известны их значения для опорной частоты.

Экспериментальная техника и условия проведения экспериментов.

В настоящее время имеет место ряд функционирующих глобальных и региональных сетей, снабжённых навигационной аппаратурой глобальных навигационных спутниковых систем. В Российской Федерации одной из распространённых является сеть референчных базовых станций SmartNet компании «ГЕКСАГОН ГЕОСИСТЕМС РУС» [<https://geosystems.ru/solutions/bazovye-stantsii/>], Hexagon (до 2017 г. «Навгеоком»). Сеть включает более 300 референчных станций, основная часть приёмников при этом сосредоточена в Европейской части России. Это позволяет проводить глобальные исследования региональных и временных изменений основных параметров частотной дисперсии.

Для проведения эксперимента были использованы данные одновременных наблюдений трёх станций, разнесённые по месторасположению и имеющие различные особенности трансионосферного распространения. Разница по широтному разнесению составляет примерно 10°, что пропорционально расстоянию между станциями порядка 1200–1500 км. Координаты станций и приёмная аппаратура представлены в таблице 1. Массив экспериментальных данных включал измерения ПЭС в течение четырёх сезонов 2018–2019 годов в условиях невозмущённой ионосферы. Геомагнитную обстановку в рассматриваемые дни можно оценить, как спокойную: Кр-индекс был меньше 3, солнечные вспышки отсутствовали.

Таблица 1. Местоположение референчных GNSS-станций

Станция	Широта	Долгота	Высота, м	Приёмник/Антенна
Мурманск (MUSK)	68°59'32.50711" с.ш.	33°5'59.57398" в.д.	135,3261	Leica GR10/Leica AS10
Йошкар-Ола (YOSH)	56°37'49.55106" с.ш.	47°53'31.40226" в.д.	118,3016	Leica GR10/Leica AS10
Ростов-на-Дону (ROST)	47°14'26.38620" с.ш.	39°35'36.81223" в.д.	104,2668	Leica GR10/Leica AS10

Экспериментальные результаты и их интерпретация

В таблице 2 приведены средние значения минимальных и максимальных ПЭС, а также среднеквадратичные отклонения ПЭС для каждого месяца по данным исследуемых станций.

Таблица 2. Статистика средних максимальных и минимальных ПЭС ионосферы

Месяц	Станция MUSK (г. Мурманск)			Станция YOSH (г. Йошкар-Ола)			Станция ROST (г. Ростов-на-Дону)		
	ПЭС _{мин} , TECU	ПЭС _{макс} , TECU	СКО	ПЭС _{мин} , TECU	ПЭС _{макс} , TECU	СКО	ПЭС _{мин} , TECU	ПЭС _{макс} , TECU	СКО
июнь	6,7	9,6	1,03	5,23	11,31	1,01	4,05	11,59	1,43
сентябрь	3,05	6,56	0,96	3,98	9,9	0,82	3,98	10,05	1,07
декабрь	1,96	3,87	0,98	2,92	7,33	0,8	3,35	7,51	0,83
март	2,68	7,03	1,07	3,54	8,37	0,88	3,85	8,79	0,77

На первом этапе работы были проведены исследования суточных вариаций ПЭС для каждого из сезонов (всего исследовано по 40 суточных ходов ПЭС для каждой станции). На следующем этапе работы были проведены вычисления вариаций параметров нелинейной частотной дисперсии трансionoсферных радиоканалов для различных сезонов с широтным разнесением референчных станций. В качестве ключевых, учитывались средние значения ПЭС согласно таблице 2. Полученные суточные вариации оценок параметра дисперсии второго порядка на опорной частоте 1 ГГц (рисунки 2 – 4).

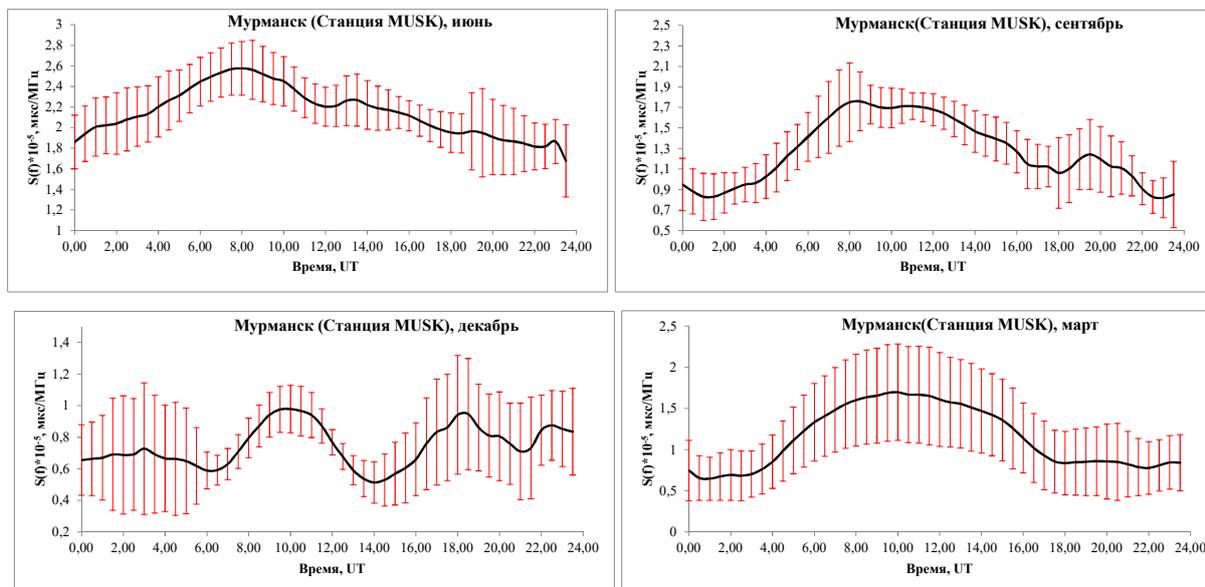


Рисунок 2. Суточные вариации параметра дисперсии второго порядка трансionoсферного радиоканала по данным ГНСС (г. Мурманск, станция MUSK)

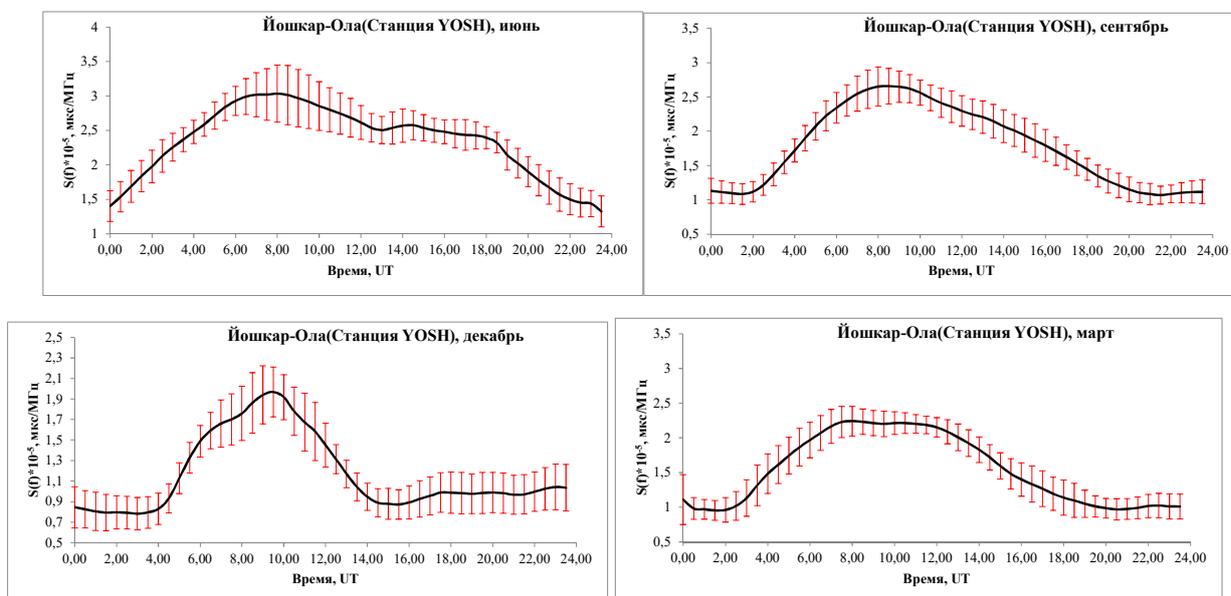


Рисунок 3. Суточные вариации параметра дисперсии второго порядка трансionoсферного радиоканала по данным ГНСС (г. Йошкар-Ола, станция YOSH)

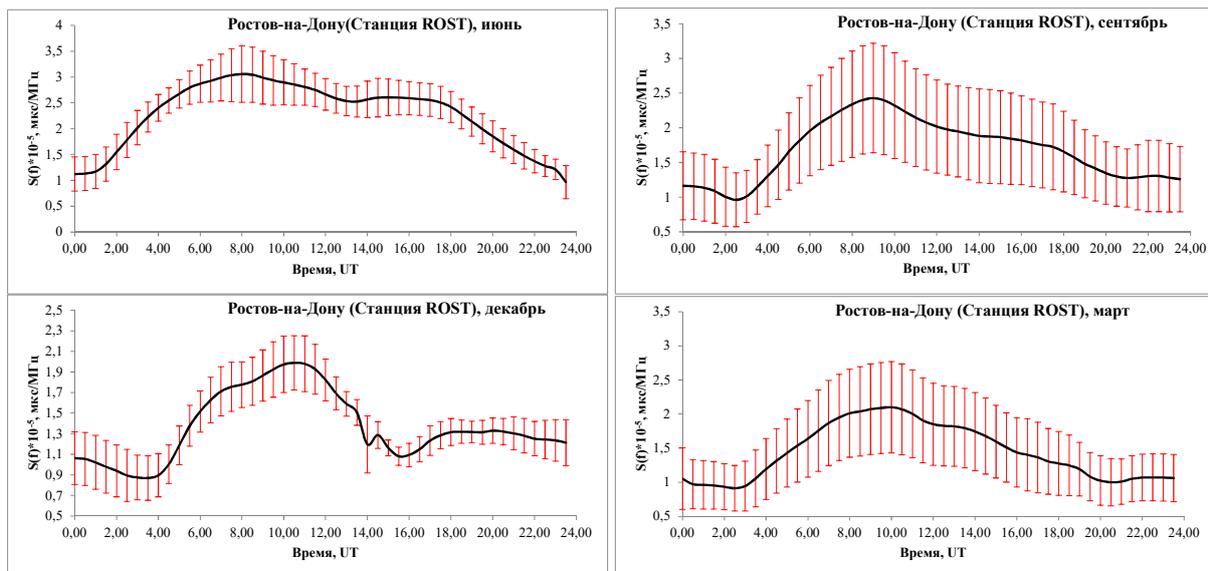


Рисунок 4. Суточные вариации параметра дисперсии второго порядка трансionoсферного радиоканала по данным ГНСС (г. Ростов-на-Дону, станция ROST)

Видно, что на средних широтах (станция YOSH), наблюдался минимальный вариационный размах суточных изменений параметра дисперсии второго порядка. Максимальный размах имел место на высоких широтах (станция MUSK) и наблюдался в декабре и марте, а для широт близких к низким (ROST) он имел место в сентябре и марте. Максимальная амплитуда вариаций параметров дисперсии второго порядка для станций YOSH и ROST практически совпадала и составляла для июня – $3,5 \cdot 10^{-5}$ мкс/МГц; для сентября – $3 \cdot 10^{-5}$ мкс/МГц; для декабря – $1,2 \cdot 10^{-5}$ мкс/МГц; для марта – $2,5 \cdot 10^{-5}$ мкс/МГц. На высоких широтах значения параметра были меньше, и составили для июня – $2,8 \cdot 10^{-5}$ мкс/МГц; для сентября – $2 \cdot 10^{-5}$ мкс/МГц; для декабря – $2,3 \cdot 10^{-5}$ мкс/МГц; для марта – $2,4 \cdot 10^{-5}$ мкс/МГц. Установлено, что для опорной частоты вариационный размах суточных изменений параметра дисперсии второго порядка может составлять до 2,5 раз.

Заключение

Развит метод, позволяющий решать задачи влияния дисперсии в трансionoсферном радиоканале с учётом разделения системного и геофизического факторов, а также региональных и временных изменений полного электронного содержания ионосферы. Особенностью метода является получение общего математического решения для опорной частоты, что позволяет просчитать геофизическую составляющую на основе данных глобальных навигационных спутниковых систем. В экспериментах, проведенных для референсных станций, разнесённых по широте, показан вариационный размах суточных изменений параметра дисперсии второго порядка. Установлено, что на опорной частоте максимальный вариационный размах суточных изменений параметра дисперсии второго порядка составляет около 2,5, что справедливо для высоких и низких широт. Для средних широт он много меньше и составляет 0,9.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 19-07-00629.

Литература

1. Mitigation of Dispersion Distortions of Transionoсpheric Communication Channels when Total Electron Content Measurements are Corrupted with Stochastic Error / D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, A. A. Kislitsin and A. A. Chernov // 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the

- Field of on Board Communications. Moscow, Russia, 2020. Pp. 1-6. DOI: 10.1109/IEEECONF48371.2020.9078570.
2. Суточная динамика вертикального полного электронного содержания над городами Иркутск и Йошкар-Ола по данным GPS/ГЛОНАСС и модели IRI-2012 / Ю. В. Ясюкевич, А. А. Мыльникова, В.В. Демьянов и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2013. № 3(19). С. 18-29.
 3. Yasyukevich Yu.V., Mylnikova A.A., Polyakova A.S. Estimating the total electron content absolute value from the GPS/GLONASS data // Results in Physics, V. 5, P. 32–33. 2015. Doi:10.1016/j.rinp.2014.12.006.
 4. Kislitsin, A., Ivanov, D., Ryabova, M., Chernov, A. Adaptive correction for frequency phase dispersion arising with transionospheric propagation of wideband radio signals // 2019 Russian Open Conference on Radio Wave Propagation, RWP 2019 - Proceedings DOI: 10.1109/RWP.2019.8810344
 5. Иванов Д.В. Методы и математические модели исследования распространения в ионосфере сложных декаметровых сигналов и коррекции их дисперсионных искажений. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2006. 266 с.
 6. Method of Experimental Estimating Processing Gain from Dispersion Correction in a Wideband Transionospheric Radio Channel / N. V. Ryabova, V. A. Ivanov, D. V. Ivanov et al // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2018, DOI: 10.1109/WECONF.2018.8604314
 7. Арманд, Н.А. Коррекция дисперсионных искажений широкополосных сигналов / Н.А. Арманд, В.А. Иванов // Тр. XXI Всерос. науч. конф. «Распространение радиоволн». – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. – Т.1. – С. 10–18.
 8. Анализ математических приближений для оценки частотной фазовой дисперсии широкополосных трансionoсферных каналов связи. Картографирование полосы когерентности / Д.В. Иванов, В.А. Иванов, Н.В. Рябова и др. // VII Всероссийские Армандовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской научной конференции. Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2017. С. 315-322.
 9. Hardware software system for producing coherent bandwidth maps of transionospheric wideband radio channel / V.A. Ivanov, N.V. Ryabova, M.I. Ryabova et al // 2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. (SYNCHROINFO). 2019. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2019.8813934