

Метод диагностики предельной полосы частот изменчивого трансionoсферного радиоканала связи

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

*Поволжский государственный технологический университет
424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3.
E-mail: KislitsinAA@volgatech.net*

Рассмотрен метод диагностики предельной полосы частот для изменчивого трансionoсферного радиоканала. Метод основан на экспериментальных оценках текущих значений полос когерентности, в которых учитываются вариации дисперсии. Представленные результаты свидетельствуют о том, что учёт вариаций дисперсии при её диагностике позволяет получить увеличение полосы частот до 2,5 раз от минимально возможного значения. Ключевые слова: трансionoсферный радиоканал, предельная полоса частот, полное электронное содержание, полоса когерентности

Method for diagnosing the ultimate bandwidth of variable transionoсpheric radio communication channel

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

Volga State University of Technology

Method for diagnosing the ultimate bandwidth of variable transionoсpheric radio communication channel There is presented a method for diagnosing the ultimate bandwidth of a variable transionoсpheric radio channel. The method is based on experimental estimates of the current values of the coherence bandwidths, within which dispersion variations are taken into account. Research findings indicate that taking into account dispersion variations allows one to increase the affordable bandwidth up to 2.5 times. Keywords: transionoсpheric radio channel, ultimate bandwidth, total electron content, coherence bandwidth

Введение

В настоящее время наблюдается значительный интерес к совершенствованию систем спутниковой связи путём изучения системных и информационно-технических характеристик (предельная полоса частот, пропускная способность, помехоустойчивость и др.) трансionoсферного радиоканала на основе данных глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [1, 2]. Для Российской Федерации развитие технологий спутниковой связи имеет особое значение. Оно обусловлено не только новыми возможностями в услугах связи, но и обеспечение инфокоммуникационными технологиями труднодоступных регионов (горы, северные территории, тайга) с недостаточно развитой инфраструктурой наземных телекоммуникационных систем. Этап технической модернизации систем спутниковой связи связан с переходом к широкополосным системам (Wideband Global Satcom), позволяющим получить дополнительные интернет услуги. Однако нестабильность состояния широкополосных трансionoсферных каналов из-за различной степени возмущения среды распространения приводит к искажениям принимаемого сигнала, что отражается на энергетических потерях и ухудшении информационно-технических

характеристик систем связи [3,4]. Для принятия адекватных решений и составления рекомендаций по адаптации информационно-технических характеристик систем спутниковой связи, работающих через трансионосферный канал, развивается подход, связанный с анализом и обработкой большого объема данных (Big Data) от навигационных приёмников сети ГНСС. Кроме того, для достижения эффективных показателей существует необходимость в расширении полосы частот систем спутниковой связи сверх полосы когерентности (предельно допустимой полосы канала) при влиянии фактора частотной внутри модовой дисперсии ионосферной плазмы.

Цель работы – создание методов и программно-конфигурируемых средств диагностики предельной полосы частот систем спутниковой связи на основе анализа и обработки большого объема данных сети референсных станций ГНСС.

Метод, используемый для диагностики предельной полосы частот

При исследовании дисперсии в качестве моделей трансионосферного распространения радиоволн применяются физические, каналные и гибридные модели, обладающие достоинствами и недостатками. В силу того, что параметры трансионосферного радиоканала изменяются во времени, разработанный метод основывается на использовании гибридной модели (физическая + каналная), которая позволяет установить связи параметров системных характеристик полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы.

В рамках каналной модели задача распространения описывается в терминах частотной характеристики (ЧХ) эквивалентной среде радиоканала [5]. При этом, ЧХ канала имеет динамический характер, учитывается медленное время, а амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики получают экспериментально с помощью физической модели на основе волнового уравнения. Решение задачи показывает, что каждое гармоническое колебание при распространении испытывает ослабление амплитуды и сдвиг фазы $\varphi(\omega, t)$. При этом набег фазы зависит от частоты колебания. Данный эффект назвали частотной дисперсией фазы. Поскольку сигнал представляет собой группу колебаний на частотах из его полосы, то фазовая дисперсия приводит к искажению формы сигнальной группы и, как следствие к ошибкам связи.

Физическая модель дает следующие выражения для набег фазы и задержки группы частот:

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

$$\tau_g(f, t) = \frac{d\varphi}{d\omega}(f, t) = \frac{1}{2\pi} \left[2\pi \int_s \frac{dz}{c} + \frac{\alpha_1(t)}{f^2} + \dots \right] \quad (2)$$

где $n(\omega, t, z)$ – показатель преломления, $\alpha_1(t) = 8,43 \cdot 10^{-7} \cdot \int_s N_e(t, z) dz$, $N_t(t) = \int_s N_e(z, t) dz$ – TEC ионосферы (при больших значениях z).

Из формул (1) и (2) следует, что при трансионосферном распространении набег фазы в среде и задержка группы частот характеризуется двумя факторами $f, \alpha(t)$: системным – $f = \omega/2\pi$ – частота колебания и геофизическим – α_1 , связанным с изменяющимся в геофизическом t времени $TEC = N_t(t)$.

Пусть группа частот компактно расположена вокруг частоты $\bar{\omega}$. В этом случае набег фазы и задержку группы можно разложить в ряд Тейлора по разностным частотам $\Omega = \omega - \bar{\omega}$:

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

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

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

При мониторинге системных характеристик наблюдаются существенные вариации параметра дисперсии второго порядка, что приводит к ограничению максимальной применимой полосы частот ССС и, соответственно, к корректировке предельной скорости передачи данных. В работах [3, 6] показано, что огибающая группы начинает испытывать искажения, если ее полоса частот превысит некоторую предельную полосу частот, называемую полосой когерентного распространения B_k . Поэтому для волнового пакета максимально допустимой является полоса частот B_g^L , равная B_k .

В общем случае на полосе когерентности набег нелинейной составляющей фазы на граничной частоте, отличается от набега фазы на средней частоте на 1 рад. Из формулы (3) следует, что для дисперсии второго порядка данное условие имеет вид:

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

Отсюда в циклических частотах для трансионосферного распространения получим выражение полосы когерентности через геофизические характеристики среды в виде:

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

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

Обратим внимание на то, что полоса когерентности уменьшается с ростом ТЕС. Изменяющиеся суточные вариации параметра дисперсии второго порядка говорят о максимальном ограничении на применимую полосу частот в дневное время и минимальном в ночное. В остальное время для трассы спутник–Земля применимая полоса будет лежать в диапазоне $(B_{g_{\min}}^L, B_{g_{\max}}^L)$. Поэтому для максимально возможного увеличения полосы частот волновых пакетов в изменчивой ионосфере необходимо применять методы адаптации по результатам экспериментального определения ТЕС.

Отметим, что полоса когерентности, также зависит от средней частоты волнового пакета. Поэтому нами используется опорная частота и пересчет результатов вычисления для нее на любые другие частоты (см. формулу (6)). Нами в качестве опорной выбрана частота равная 1 ГГц.

На рис. 1 представлен пример суточного хода полосы когерентности для волнового пакета на опорной частоте.

Видно, что в течение суток максимально возможную полосу частот волнового пакета можно увеличить почти в 2 раза.

Отношение этих граничных частот можно назвать выигрышем по полосе частот при использовании метода адаптации системы спутниковой связи (ССС) по этой изменчивой величине:

$$\eta_B = B_{g\max}^L / B_{g\min}^L = \sqrt{N_{t\min} / N_{t\max}} \quad (7)$$

Следует отметить, что выигрыш уже не зависит от средней частоты пакета и определяется только геофизическим фактором – ПЭС.

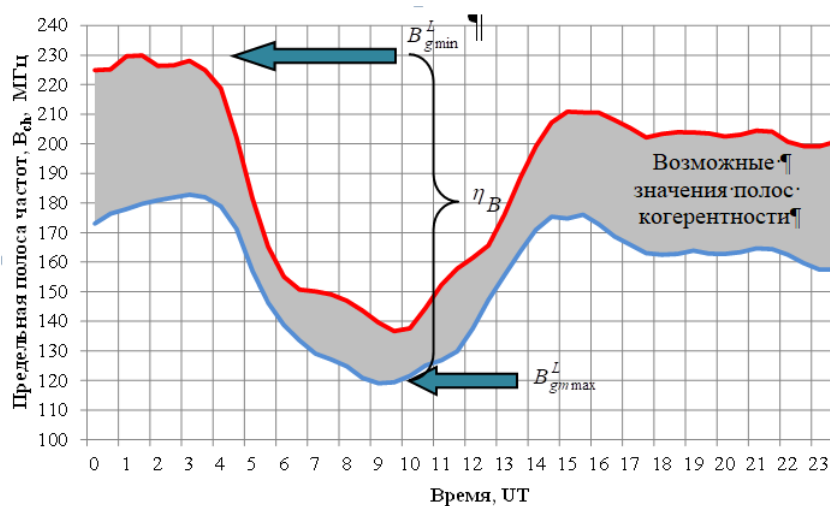


Рис. 1. Пример суточного хода полосы когерентности для волнового пакета на опорной частоте

Экспериментальная техника, условия и исследования предельно достижимой полосы частот спутниковой связи

Для проведения экспериментальных исследований, согласно структурной схеме, изображённой на рисунке 2, было разработано программное обеспечение, позволяющее в автоматизированном режиме получать параметры абсолютного ПЭС ионосферы, коэффициента дисперсии трансionoсферного радиоканала и предельной полосы частот на основе анализа и обработки большого объёма данных сети SmartNet. Программный модуль состоит из двух блоков: Absoltec_wrap – позволяет генерировать абсолютные значения ПЭС согласно данным кодовых и фазовых измерений [7]; Absoltec_graph – на основе статистических параметров абсолютных значений ПЭС осуществляет визуализацию полученных данных графически.

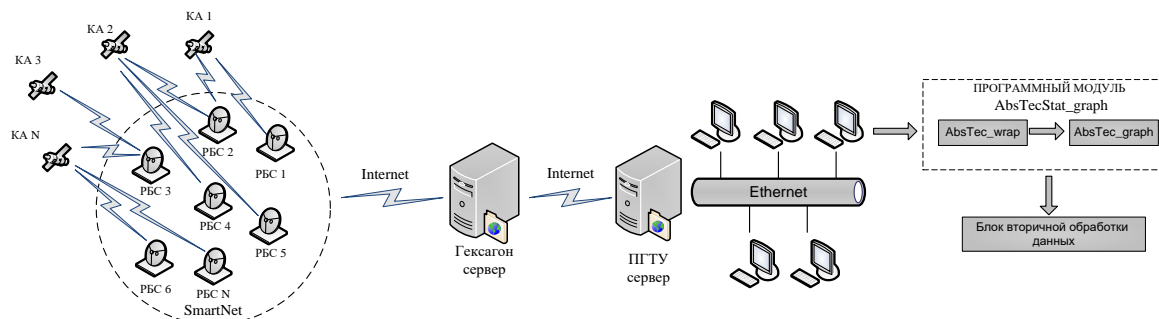


Рис. 2. Структурная схема для диагностики информационно-технических характеристик;
 КА 1 – КА N – космический аппарат систем ГЛОНАСС/GPS;
 РБС 1 – РБС N – референсные базовые станции сети SmartNet

На рисунке 3 изображён интерфейс программного обеспечения для автоматизированной обработки большого объёма навигационных данных. В блоке 1 выбирается дата исследования и станция, по данным которой существует необходимость оценки параметров. В блоке 2 осуществляется статистическая обработка данных для оценки за длительный временной интервал (месяц, сезон и т.д.) абсолютных значений и вариаций полного электронного содержания с построением соответствующих зависимостей и доверительных интервалов относительно среднего значения. Блоки 2 и 3 служат для сохранения результатов в графическом и численном виде. Референсные станции для исследования задаются в блоке 5. По данным каждой из станций рассчитывается абсолютное полное электронное содержание ионосферы и в блоке 6 оценивается среднее его значение по всем станциям. Результаты отображаются графически и численно при помощи блоков 7 и 8 соответственно.

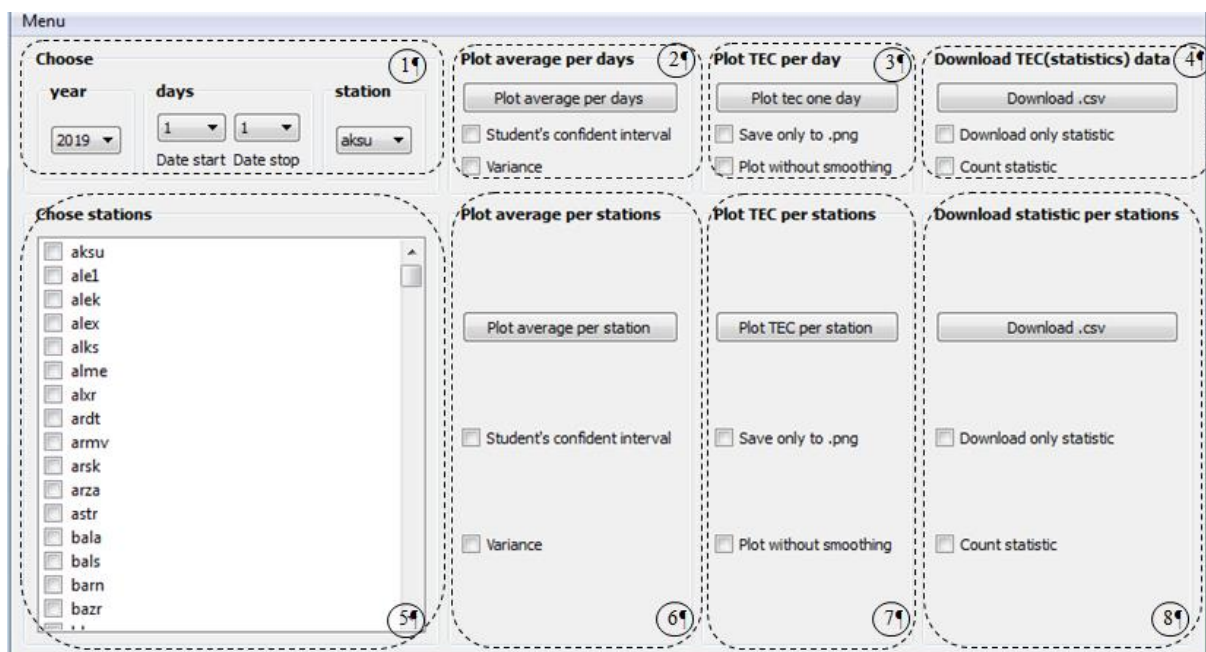


Рис. 3. Интерфейс программного обеспечения для вычисления суточных ходов ПЭС и его статистической погрешности измерения

Для анализа большого объёма данных с сети навигационных приёмников и машинного обучения осуществлялось зондирование радиоканала на серии трасс. Для проведения эксперимента были использованы данные одновременных наблюдений трёх станций, входящих в сеть референсных базовых станций SmartNet компании «ГЕКСАГОН ГЕОСИСТЕМС РУС», разнесённых по месторасположению и имеющие различные особенности трансionoсферного распространения. Это позволяет решить задачу по выявлению особенностей частотной дисперсии в зависимости от широты расположения приемников ГНСС и определению для различных регионов предельной полосы частот системы спутниковой связи. 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: K_p -индекс был меньше 3, солнечные вспышки отсутствовали. В экспериментах регистрировались суточные изменения полосы когерентности канала (допустимой полосы частот системы

связи) на опорной частоте. В качестве опорной принималась частота 1 ГГц, при этом максимальная полоса, исходя из критериев широкополосности, не превышала 500 МГц. Выборками служили данные для декады месяцев с зимним - летним солнцестоянием и весенним/осенним равноденствием.

Таблица 1. Местоположение референсных 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	LeicaGR10/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

Результаты оценки максимальной и минимальной предельной ширины полосы частот для выбранных станций в различные сезоны для частоты 1 ГГц представлены на рис.4 – 6 и в таблице 2.

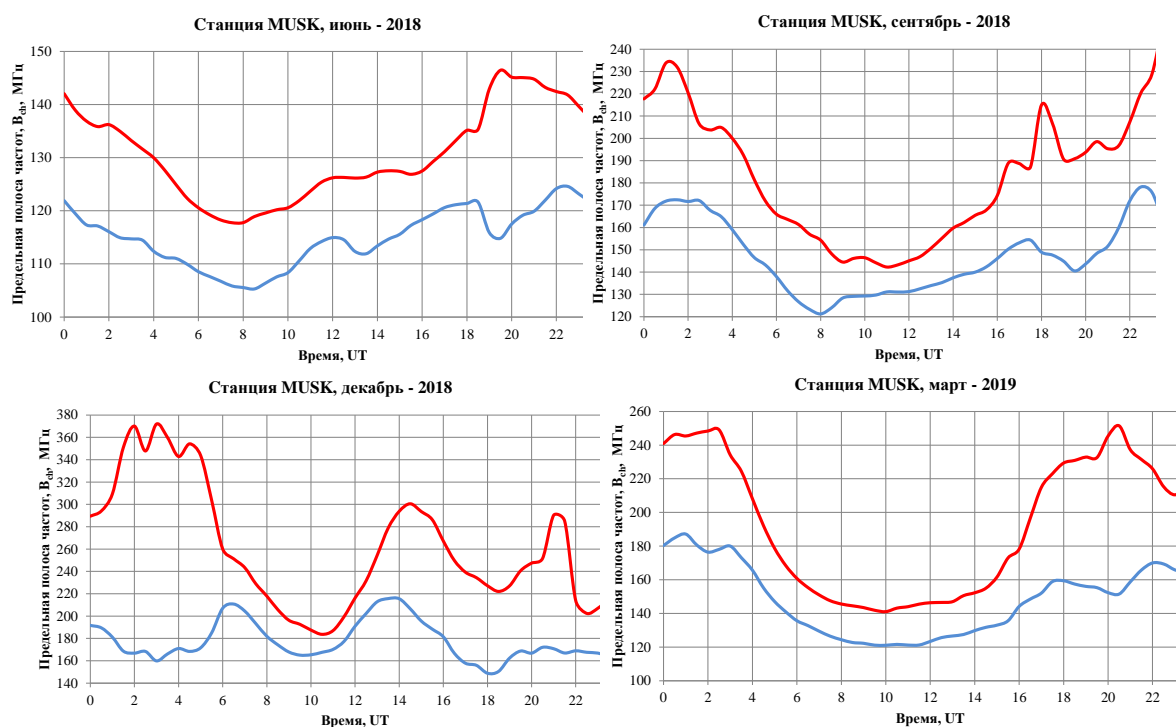


Рис. 4. Экспериментальные значения предельной полосы частот B_{ch}^L :(станция MUSK)

Из рис. 6–8 видно, что из-за влияния геофизических факторов полоса когерентности меняется. Наибольших значений она достигает в ночное время суток, а наименьших – днём. Получено, что в декабре полоса когерентности ночью достигала значений 182...235 МГц; днем – 119...136 МГц; в марте – 169...205 МГц и 113...125 МГц; июне – 130...142 МГц и 90...95 МГц; в сентябре – 162...186 МГц и 104...115, соответственно. Таким образом, полоса когерентности в проведенных экспериментах принимала значения от 90 МГц до 235 МГц.

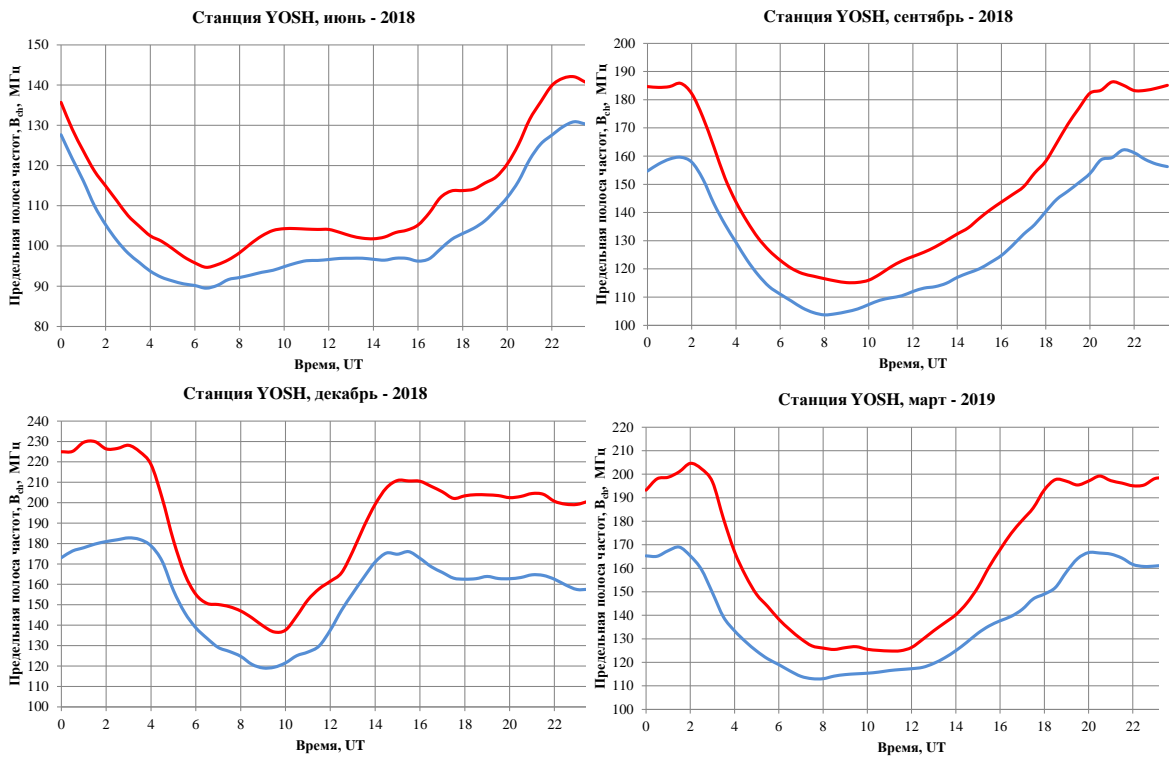


Рис. 5. Экспериментальные значения предельной полосы частот B_{ch}^L (станция YOSH)

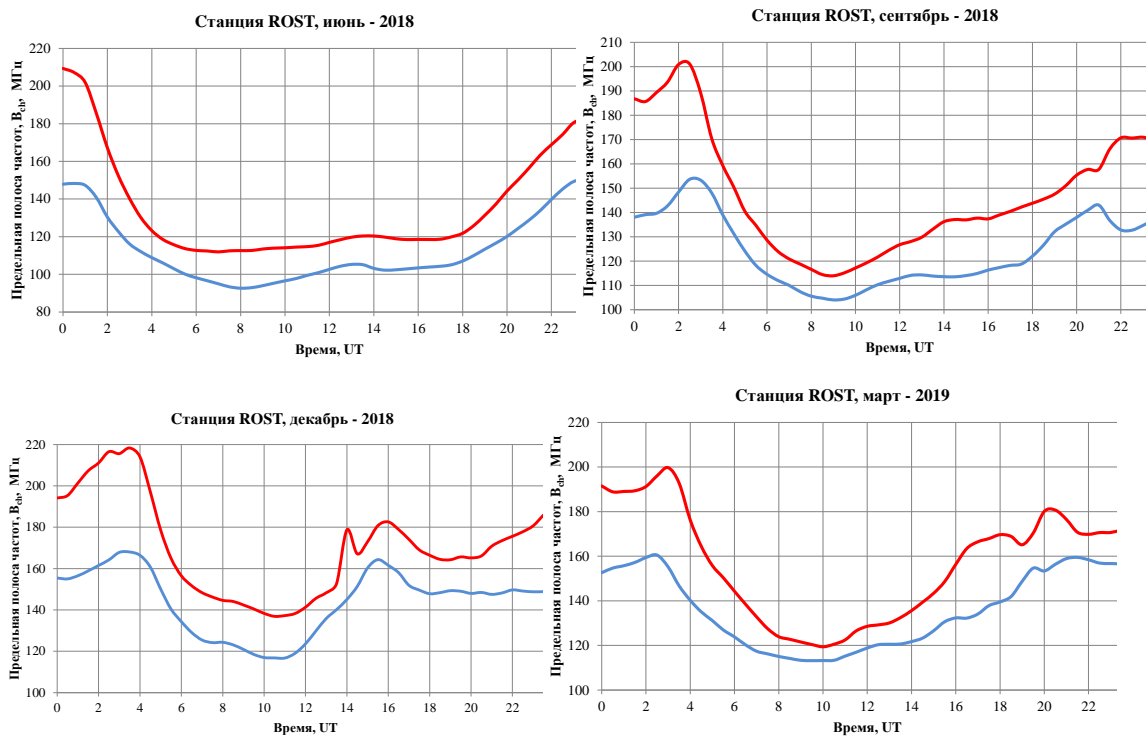


Рис. 6. Экспериментальные значения предельной полосы частот B_{ch}^L (станция ROST)

Таблица 2. Экспериментальные результаты максимальной и минимальной предельной ширины полосы частот B_{ch}^L (МГц) для различных сеансов связи

Месяц	Станция MUSK				Станция YOSH				Станция ROST			
	$B_{ch\min}^L$, МГц		$B_{ch\max}^L$, МГц		$B_{ch\min}^L$, МГц		$B_{ch\max}^L$, МГц		$B_{ch\min}^L$, МГц		$B_{ch\max}^L$, МГц	
	NS	DS	NS	DS	NS	DS	NS	DS	NS	DS	NS	DS
июнь	125	105	145	118	130	90	142	95	150	92	209	112
сентябрь	162	104	186	115	162	104	186	115	154	104	201	114
декабрь	215	148	372	184	182	119	235	136	169	117	218	136
март	187	120	251	140	169	113	205	125	160	113	200	119

Представленные результаты свидетельствуют о том, что учет вариаций дисперсии при её диагностике позволяет получить увеличение полосы частот до 2,5 раз от минимально возможного значения.

Выводы

Для трансionoсферного радиоканала связи предложен метод диагностики предельной полосы частот. В методе используются экспериментальные оценки текущих значений полосы когерентности трансionoсферного канала. Верификация метода показала, что при диагностике обеспечивается возможность увеличения используемой полосы частот (выигрыш) сверх минимального значения до 2,5 раза.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда: проект № 22-29-00622.

Литература

1. Zhukov A., Sidorov D., Mylnikova A., Yasyukevich Y. Machine learning methodology for ionosphere total electron content nowcasting International Journal of Artificial Intelligence, V. 16, N 1, P. 144-157.
2. Ясюкевич Ю.В., Жуков А.В., Ясюкевич А.С., Веснин А.М., Сидоров Д.Н. Машинное обучение для задач моделирования регулярной и нерегулярной динамики ионосферы // Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений: XI международная конференция, с. Паратунка, Камчатский край, 22 - 25 сентября 2020 г.: сб. тез. докл. Петропавловск-Камчатский: ИКИРДВОРАН, 2020.
3. Armand N.A. Propagation of broadband signals in dispersive media // Journal of Communications Technology and Electronics. 2003. Vol. 48. № 9. P. 1045-1057.
4. Кислицын А. А. Комплексный подход к адаптивной компенсации дисперсионных искажений системных характеристик широкополосных трансionoсферных радиоканалов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2019. № 3 (43). С. 6-21. DOI: 10.25686/2306-2819.2019.3.6
5. Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В., Кислицын А.А. Исследование вариаций периодичности зондирования трансionoсферного радиоканала для повышения эффективности коррекции его дисперсионных искажений // В сборнике: Всероссийские открытые Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. материалы Всероссийской открытой научной конференции. Научный совет ОФН РАН по распространению радиоволн; Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых». Муром, 2020. С. 22-28.

6. Анализ математических приближений для оценки частотной фазовой дисперсии широкополосных трансионосферных 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.
7. Ясюкевич Ю.В., Мыльникова А.А., Демьянов В.В. и др. Суточная динамика вертикального полного электронного содержания над городами Иркутск и Йошкар-Ола по данным GPS/ГЛОНАСС и модели IRI-2012 // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2013. № 3(19). С. 18-29.