

## **Исследование вариаций периодичности зондирования трансионосферного радиоканала для повышения эффективности коррекции его дисперсионных искажений**

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 суточного хода времени жизни трансионосферного канала. Получены выражения, устанавливающие связь времени жизни с производной по времени от полного электронного содержания ионосферы. Полученные результаты способствуют установлению периода переобучения корректирующего устройства дисперсионных искажений в трансионосферных радиоканалах связи.*

*We proposed a method for experimental studying diurnal variations of the life time of the transionospheric channel. In the framework of the research we derived equations which show the relationship between the life time and the time derivative of the total electron content of the ionosphere. Research findings allowed to find an appropriate training period of the device of correction for dispersion distortions in transionospheric radio communication channels.*

### **Введение**

Проведенные нами ранее исследования по изучению эффекта частотной дисперсии в трансионосферном радиоканале связи позволили высказать гипотезу о том, что для повышения эффективности работы систем космической связи необходимо решать задачу коррекции дисперсии для нивелирования данного негативного эффекта [1–4]. Сложность решаемой проблемы заключается в том, что параметры трансионосферного радиоканала из-за постоянной изменчивости среды со временем варьируются, а значит априорно неизвестны. Поэтому канал, для которого была выполнена коррекция дисперсионных искажений, через определенное время станет рассогласованным. С этой позиции, для корректора дисперсионных искажений должен быть реализован режим обучения, позволяющий актуализировать параметры корректирующих функций, через периодические интервалы времени, названные временем жизни канала связи с равным ему периодом. Ключевым параметром дисперсии является полное электронное содержание (ПЭС) ионосферы над местом приёма сигналов спутниковой связи. Поэтому необходимо актуализировать информацию о ПЭС с темпом времени жизни радиоканала для повторного обучения корректора. Периодичность обучения корректора трансиионосферного канала является практически неизученной актуальной задачей.

**Цель работы** – исследование вариаций периодичности зондирования радиоканала для повышения эффективности коррекции дисперсионных искажений в нем.

### **Метод обучения корректора и соответствующий ему алгоритм оценки времени жизни канала**

Важным этапом при создании адаптивного компенсирующего устройства является режим обучения корректора. Обобщенный вид схемы обучающего устройства представлен на рисунке 1. Принцип её работы основывается на результатах зондирования сигналами ГЛОНАСС/GPS.

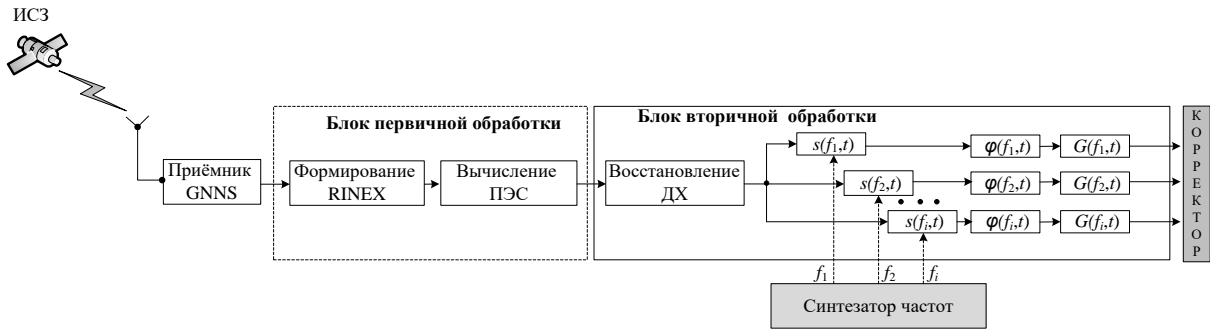


Рис. 1. Обобщенная схема обучения корректора дисперсионных искажений

В блоке первичной обработки формируются данные в формате RINEX, после чего осуществляются измерения псевдодалностей по фазовым и кодовым измерениям. Комбинация этих двух факторов позволяют вычислить абсолютные значения полного электронного содержания ионосферы [5]. Блок вторичной обработки, на основе полученных данных, оценивает фазовые функции, позволяющие компенсировать нелинейную дисперсию, заданную на сетке частот из широкой полосы канала. По вычисленным параметрам дисперсии рассчитываются фазовые функции с учётом линейных и нелинейных составляющих. Параметры нелинейной дисперсии меняются вслед за изменениями ПЭС в медленном времени. Поэтому перед нами стояла задача определения периодичности зондирования путем оценки времени деградации скорректированного канала.

Для ее решения была выбрана модель канала на основе задания частотной  $H(j\omega, t)$  характеристики, меняющейся в медленном (геофизическом) времени  $t$  [6, 7]:

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

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

Так как амплитудная дисперсия незначительна, т.е.  $H(\omega, t) \approx const$ , а искажения обусловлены фазовой дисперсией, то полагаем, что для канала на средней частоте  $\bar{\omega} = (\omega_1 + \omega_2)/2$  с полосой частот  $\Omega_{ch}$  ФЧХ можно представить в виде разложения в степенной ряд [8, 9]:

$$\begin{aligned} \varphi(\bar{\omega}, t) &\approx \varphi(\bar{\omega}, t) + \varphi'(\bar{\omega}, t) \cdot \Omega + \varphi''(\bar{\omega}, t) \cdot \frac{\Omega^2}{2!} = \\ &= \varphi_l(\bar{f}, t) + 2\pi\tau_g(\bar{f}, t) \cdot F + \pi\kappa(\bar{f}, t) \cdot F^2 = \varphi_l(\bar{f}, t) + \varphi_n(\bar{f}, t). \end{aligned} \quad (2)$$

где  $F = f - \bar{f}$ ,  $\Omega = \omega - \bar{\omega}$  – разностные частоты;  $\Omega = 2\pi \cdot F$ ,  $F \in [-B_{ch}/2, B_{ch}/2]$ ,  $\varphi_l(\bar{f}, t) = \varphi(\bar{f}, t) + 2\pi\tau_g(\bar{f}, t) \cdot F$  – линейная составляющая ФЧХ;  $\varphi_n(\bar{f}, t) = \pi\kappa(\bar{f}, t) \cdot F^2$  – нелинейная составляющая ФЧХ;  $\tau_g = d\varphi/df$  – дисперсионная характеристика (ДХ) канала,  $s = d\tau_g/df$  – наклон ДХ.

Далее была принята гипотеза о том, что для коррекции фазовой дисперсии оптимальным является метод обратной фильтрации ЧХ. При этом учитывалось, что линейная часть ФЧХ  $\varphi_l(\bar{f}, t)$  не влияет на искажения сигнала, а лишь приводит к

смещению по задержке. Исходя из этих позиций, обратная фильтрация должна осуществляться путём умножения ЧХ на функцию вида:

$$G(\bar{f}, t) = \exp j\varphi_n(\bar{f}, t). \quad (4)$$

Нелинейную составляющую фазы, отвечающую за искажения в трансиносферном радиоканале, можно представить в виде [9, 10]:

$$\varphi_n(\bar{f}, t) = \pi s(\bar{f}, t) \cdot F^2 = -\frac{\pi k N_t F^2}{c \bar{f}^3} \quad (5)$$

где  $k = 80,5 [m^3/c^2]$ ;  $c$  – скорость света,  $N_t = \int_s N_e(z) dz$  – полное электронное содержание.

Стоит отметить, что значения наклона  $s(\bar{f}, t)$ , а соответственно и фазы  $\varphi(\bar{f}, t)$  вычисляются для заданной сетки частот. В таком случае рабочая частота произвольного  $i$ -го канала будет синтезироваться по следующей формуле:  $\bar{f}_i = \bar{f}_1 + i \cdot \Delta B_{ch}$  ( $i=0, 1, \dots, N$ ,  $N$  – количество каналов;  $\Delta B_{ch}$  – полоса подканала).

Для оценки времени жизни (деградации) канала нелинейная фазовая дисперсия  $\varphi_{n0}$  определяется в результате трансиносферного зондирования радиоканала. По ее завершению, в момент времени  $t = t_0$ , осуществлялась компенсация нелинейной дисперсии, т.е. выполнялось условие:  $\varphi_n(\bar{f}, t) = \varphi_{n0}(\bar{f}, t_0)$ . Дальнейшее увеличение времени  $t$  приводит к нарушению этого равенства, т.е. значения  $\varphi_n$  и  $\varphi_{n0}$  начинают различаться и через время жизни  $\Delta t = t - t_0 = T_t$  канала различия становятся недопустимыми.

Оценим разность значений фазовой функции из-за приращения времени, равного  $\Delta t = t - t_0 = T_t$ . В результате получим:

$$\Delta \varphi_n(\bar{f}, t) = \varphi_n(\bar{f}, t) - \varphi_{n0}(\bar{f}, t_0) \approx \frac{d\varphi_n}{dt} (t - t_0) = \pi \cdot F^2 \frac{ds(\bar{f}, t)}{dt} \cdot (t - t_0) \quad (6)$$

Потребуем, чтобы при  $F = B_{ch}/2$  приращение фазы за время  $t - t_0$  не превышало 1 рад, т.е. величина  $\Delta s = \frac{ds(\bar{f}, t)}{dt} \cdot (t - t_0)$  не превышала критического значения  $s_k$  (см. рис.

2) (где  $s_k = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{B_{ch}}$ ). Равенство этих величин примем в качестве уравнения для оценки времени жизни  $\frac{ds(\bar{f}, t)}{dt} \cdot T_t = s_k$ . Итак:

$$T_t = s_k / |s'_t| = \frac{4}{\pi \cdot B_{ch}^2 \left| \frac{ds(\bar{f}, t)}{dt} \right|} = \frac{4c\bar{f}^3}{\pi k B_{ch}^2 \left| \frac{dN_t}{dt} \right|} = \frac{c \cdot \bar{f}^3}{63 \cdot (B_{ch})^2 \cdot \left| \frac{dN_t}{dt} \right|} = \frac{cf_0}{63} \cdot \frac{\hat{f}^3}{\eta_f^2 |N'_t|} \quad (7)$$

где  $\hat{f} = f / f_0$  – относительная частота;  $\eta_f = B_{ch} / f_0$  – коэффициент широкополосности (для пересчёта на другие частоты можно представить в виде  $\eta_f = B_{ch} / \hat{f} \cdot f_0$ );  $f_0$  – опорная частота;  $N'_t = dN_t / dt$  – скорость изменения полного электронного содержания.

Согласно выражению (7) временной интервал между зондированиями прямо пропорционален полосе канала, а также кубу его относительной средней частоты и обратно пропорционален квадрату коэффициента широкополосности относительно опорной частоты и скорости изменения ПЭС.

Рисунок 2 поясняет методику оценки интервала зондирования. Стоит отметить, что как только нарушается линейность функции на отрезке времени  $\Delta t = t - t_0 = T_t$ , т.е. касательная не совпадает с графиком, происходит деградация канала связи.

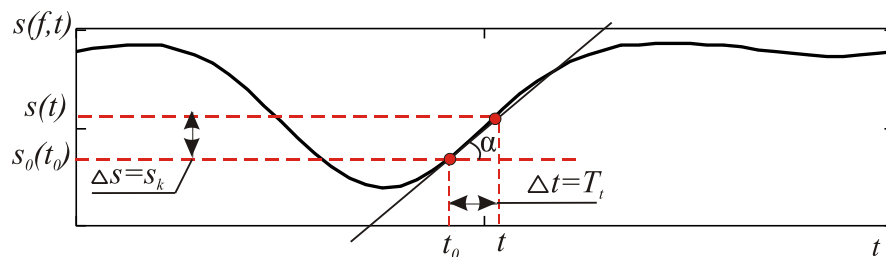


Рис. 2. Графическое представление методики оценки интервала зондирования

### Техника и условия проведения эксперимента

Для выполнения экспериментальных исследований был модернизирован аппаратно-программный комплекс, позволяющий проводить зондирование трансионосферного канала навигационными сигналами систем ГЛОНАСС/GPS (рис. 3). В него входит навигационный приёмник Leica GR10, включенный в сеть референционной сети SmartNet компании ГЕКСАГОН ГЕОСИСТЕМС РУС [<https://geosystems.ru/solutions/bazovye-stantsii/>], и персональная ЭВМ.

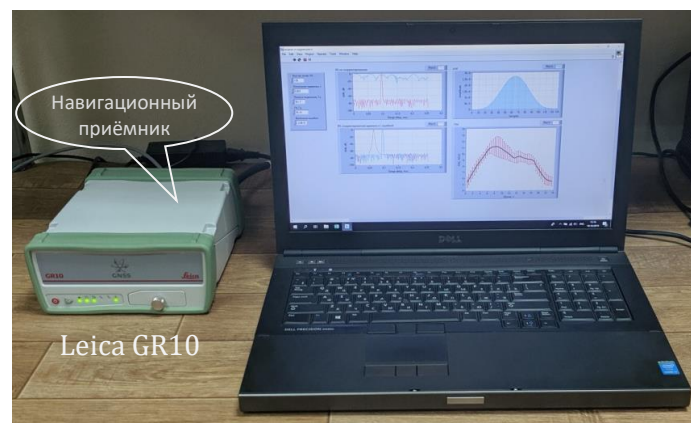


Рис. 3. Аппаратно-программный комплекс для исследования

На первоначальном этапе проводились измерения ПЭС по данным фазовых и кодовых измерений. Экспериментальные измерения ПЭС проводились по данным станции YOSH (г. Йошкар-Ола), что характерно для среднеширотной ионосферы. В качестве экспериментальных были выбраны дни весеннего и осеннего равноденствия, а также летнего и зимнего солнцестояния за 2018/2019 гг. В программном модуле вычисления на основе полученной аналитической модели осуществляется построение

суточных ходов времени жизни транссионферного канала и их прогнозирование. При этом в качестве рабочей выбрана частота 1 ГГц с полосой канала 500 МГц.

#### Исследования суточного хода периодичности зондирования транссионферного радиоканала

Полученное выражение (7) для времени жизни канала связано с производной по времени от ПЭС. Таким образом, для построения суточного хода интервалов зондирования канала необходимо оценить ПЭС над точкой приёма с дальнейшим пересчётом в суточные ходы интервалов зондирования канала. При этом следует учесть, что значения ПЭС, полученные по экспериментальным данным, могут иметь краткосрочные колебания из-за погрешностей измерения, за которые принимаются случайные компоненты, а значит, существует необходимость в их фильтрации. В процессе эксперимента для сглаживания значений использовался фильтр на основе скользящего среднего. При этом для усреднения использовалась средняя арифметическая во временном интервале 60 минут.

Экспериментальные суточные изменения сглаженных ПЭС за рассматриваемые сезоны представлены на рис. 4, а. Для согласования результатов были проанализированы результаты ПЭС по модели IRI (рис. 4, б).

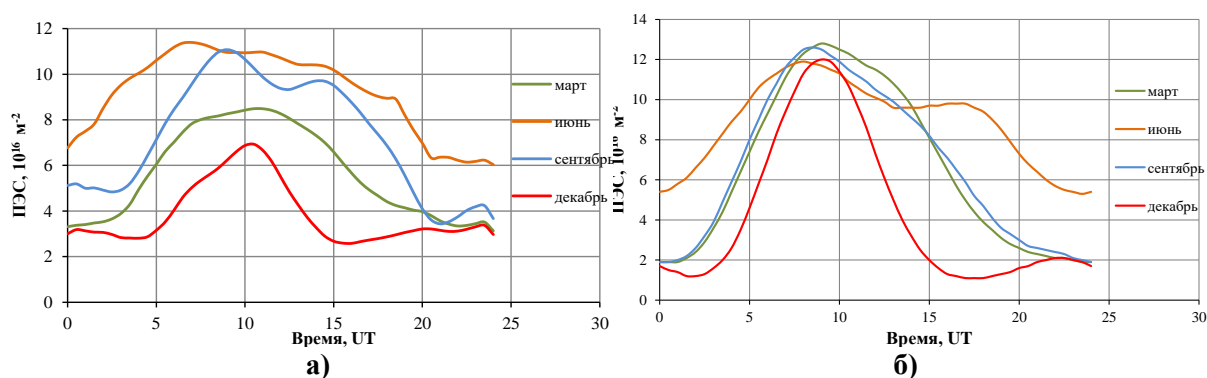
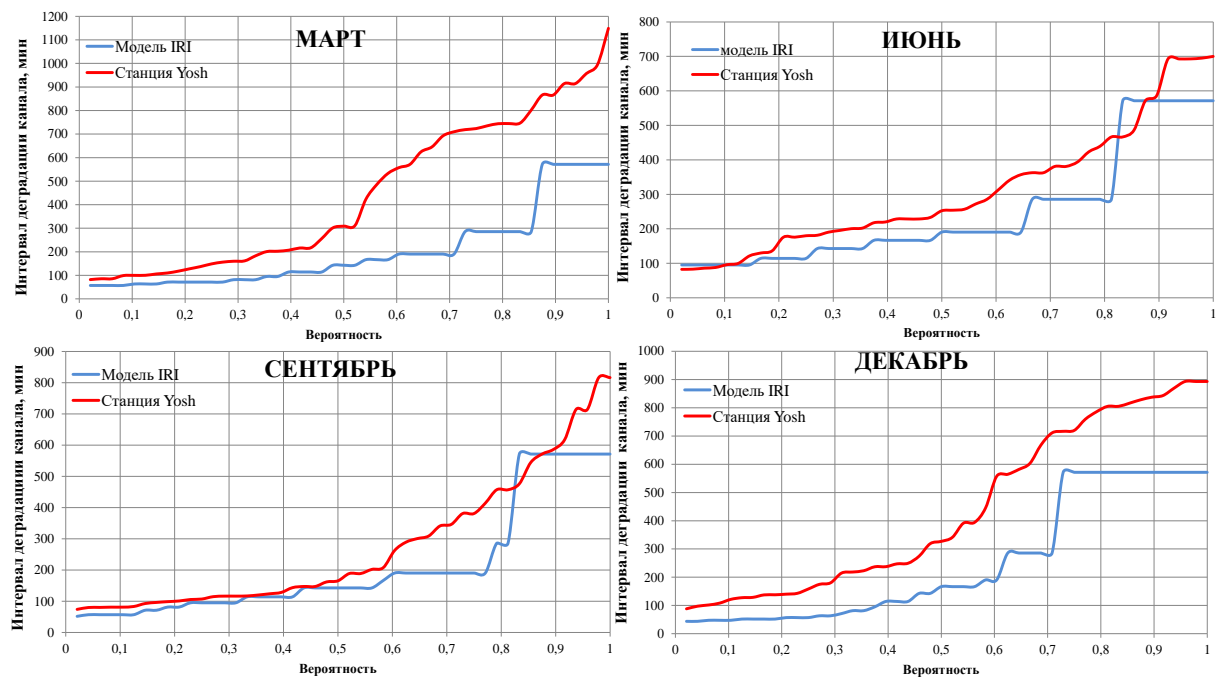


Рис. 4. Суточные изменения ПЭС: а – по данным станции Yosh, б – по модели IRI

Полученные результаты построения суточных ходов ПЭС позволяют оценить скорость его изменения и определить интервалы зондирования канала связи. При этом для исследования использовался метод анализа вариационных рядов интервалов зондирования каналов, результаты которых представлены на рис. 5. Его обоснование заключается в том, что определяется вероятность для номера варианты в ряду, отнесённого к объёму выборки (частоты), когда варианты с меньшим значением не превышают его.

Анализируя рис. 5 можно установить, что периодичность зондирования по экспериментальным значениям выше, чем по модели IRI. Так если полученный по модели с вероятностью 0,5 интервал зондирования канала не превышает 150 мин для марта, сентября, декабря и 200 мин для июня, то для экспериментальных данных он не превышает 300, 180, 320, 250 мин. соответственно. Кроме того, если для модели IRI есть вариации, когда период времени зондирования составляет менее часа, то для марта и сентября такой период наблюдается в 10 % всех вариантов, а в декабре в 20 %, при этом для экспериментальных значений периодичность составляет более часа практически для всех вариантов. Как правило, минимальные значения периодов достигаются в переходное время суток, когда скорость изменению ПЭС возрастает. Большие значения периодов регистрировались в 25 % в декабре, 18 % июне и сентябре, 14 % в марте,

свидетельствуют о возможности длительной работы радиоканала и соответствуют ночному времени суток.



**Рис. 5. Вариационные ряды для интервалов зондирования каналов на частоте 1 ГГц по модели IRI (синяя кривая) и экспериментальных значения по данным станции Yosh (г. Йошкар-Ола)**

Полученные результаты также позволяют судить о том, что в зависимости от сезонности, полосы канала, а также времени суток наблюдаются различные вариации времени жизни канала. В этой связи существует необходимость в прогнозировании данного параметра. При этом для задачи обучения корректора можно либо настроить периодичность актуализации поправочных коэффициентов по минимальному значению времени жизни канала, либо согласно полученным прогнозам изменять её лишь после того времени, когда канал станет рассогласованным.

### Заключение

Предложен метод оценки периодичности зондирования при деградации трансионосферного радиоканала связи на основе подхода к определению скорости изменения значений ПЭС ионосферы. Разработанный метод позволил установить частоту актуализации поправочных коэффициентов фазы на этапе обучения корректирующего устройства дисперсионных искажений в трансионосферном радиоканале. Основным достоинством является его реализация на основе зондирования трансионосферного канала сигналами навигационных спутниковых систем, по данным которых удастся с высокой точностью оценить абсолютные значения ПЭС. Экспериментальные исследования, полученные для частоты 1 ГГц с полосой канала 500 МГц, позволили экспериментально установить период актуализации адаптивного корректора при его обучении и проанализировать его временные (суточные и сезонные) вариации.

*Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 18-19-00401.*

## Литература

1. 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
2. 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
3. Ivanov, V.A., Kislitsin, A.A., D.V., Chernov, A.A., Ovchinnikov, V.V. Adaptive Equalizer Training Algorithm to Correct for Frequency Dispersion in Transionospheric Radio Channels // 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2019 DOI: 10.1109/WECONF.2019.8840616
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. 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.
6. 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.
7. Дисперсионные искажения системных характеристик широкополосных ионосферных радиоканалов: монография / В.А. Иванов, Д.В. Иванов, Н.Н. Михеева и др. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2015. 156 с.
8. Эффекты частотной дисперсии группового запаздывания при трансionoсферном распространении радиоволн / Д.В. Иванов, В.А. Иванов, Н.В. Рябова и др. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2017. Т.20, № 3, ч. 2. С. 31-36.
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
10. 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.