

Метод адаптивной компенсации дисперсионных искажений частотной характеристики трансионосферного радиоканала с учётом изменения полного электронного содержания ионосферы

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

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

Предложен метод адаптивной коррекции дисперсионных искажений в трансионосферном радиоканале связи, включающий режим обучения и подстройки корректирующих коэффициентов в эквалайзере. Введено понятие «время жизни» рассматриваемого канала. Его работоспособность обусловлена изменениями значений полного электронного содержания ионосферы. В частности, задача сводится к определению критического наклона дисперсионной характеристики. С учётом изменения полного электронного содержания приведены суточные зависимости времени жизни канала.

We have proposed a method of adaptive correction for dispersion distortions in a transionospheric radio communication channel. The method includes a training procedure to update the equalizer coefficients accordingly. The concept of a “lifetime” of a particular channel was introduced. Channel performance depends on the values of the total electron content of the ionosphere. Particularly, the problem reduces to calculation of the critical slope of the dispersion characteristic. Theoretical diurnal dependences of a channel lifetime considering the variations of the total electron content are presented.

Введение

В настоящее время активно обсуждается вопрос прохождения широкополосного радиосигнала по трансионосферному радиоканалу связи [1, 2]. Это связано с тем, что существенное воздействие на работу космической широкополосной системы связи оказывает частотная дисперсия [3–5]. Данный эффект приводит к тому, что отдельные части спектра широкополосного сигнала имеют различные задержки распространения. Это приводит к возникновению амплитудных, частотных и фазовых искажений переданного сигнала.

Для повышения эффективности работы систем в условиях дисперсии необходимо решать задачу коррекции амплитудной и частотной характеристик приёмных каналов таким образом, чтобы нивелировать негативный эффект. Сложность решаемой проблемы заключается в том, что параметры трансионосферного радиоканала изменяются во времени, а значит априорно неизвестны. В этом случае требуется режим обучения корректора, основанный на данных зондирования радиоканала. Ранее было показано, что системные характеристики трансионосферного радиоканала зависят от полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере [6–7]. Поэтому при обучении возникает потребность их актуализировать через определенные интервалы времени, названные временем жизни канала.

Цель работы – разработка адаптивного метода коррекции дисперсионных искажений в трансионосферном радиоканале по данным ПЭС и оценка времени жизни канала для актуализации параметров эквалайзера.

Метод адаптивной оценки канала и эквалайзирования

Обычно, для уменьшения амплитудных, частотных и фазовых искажений переданного сигнала на приёмной стороне применяют эквалайзирование канала, выполняющего роль корректирующего устройства. В нашем случае, характеристики канала меняются во времени, а это значит, что нарушается оптимальная работа системы и возникает задача построения адаптивного устройства. Под адаптацией понимается процесс изменения параметров и структуры системы связи за счёт управляющих воздействий на основе текущей информации для достижения оптимального, состояния системы при изменяющихся условиях среды распространения [8]. При этом адаптивный корректор должен содержать обучающее устройство для получения информации о состоянии и характеристиках канала системы, необходимой для оптимального управления корректирующим устройством.

Разработанная блок-схема адаптивного корректора дисперсионных искажений представлена на рис. 1.

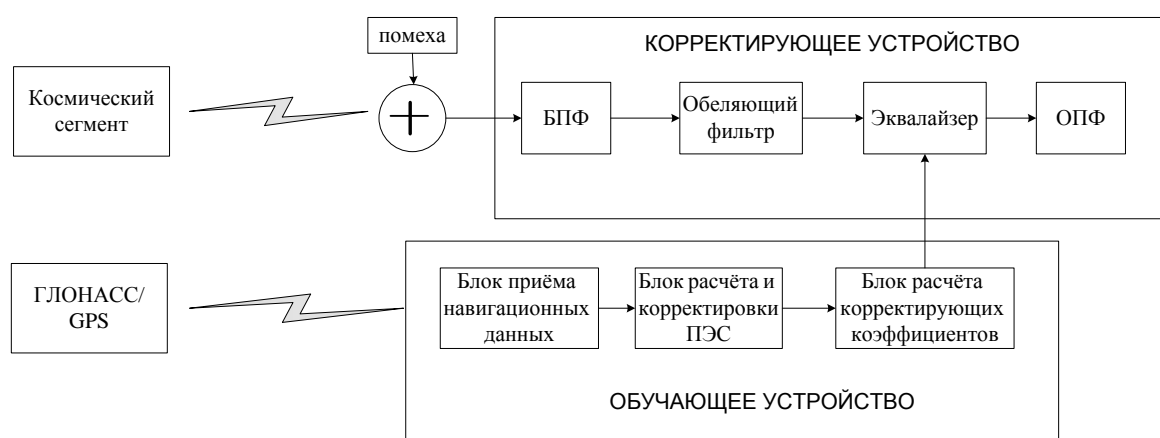


Рис. 1. Схема адаптивного корректора дисперсионных искажений в трансионосферном радиоканале

Оценка системных характеристик канала проводится в частотной области, при этом радиотехническая система в приёмном терминале содержит анализирующее, обучающее и корректирующее программно-аппаратное устройство. По результатам диагностики соответствующий алгоритм обеспечивает обучение корректирующей схемы, в качестве которой применяется эквалайзер. В общем виде комбинированный алгоритм адаптивной оценки канала и эквалайзирования состоит из следующих шагов:

1. Приём зондирующего сигнала ГЛОНАСС/GPS блоком приёма навигационных данных;
2. Расчёт полного электронного содержания на основе алгоритма с одновременным учётом фазовых и групповых измерений по данным навигационных спутниковых систем и оценка его статистической ошибки;
3. Расчёт фазовых поправочных коэффициентов;
4. Принятие тестовой последовательности эквалайзером и подстройка его коэффициентов;
5. Приём связного сигнала от космической системы;
6. Перевод входного сигнала в частотную область с помощью БПФ;
7. Подавление шумов и сосредоточенных помех с использованием обеляющего фильтра;
8. Прохождение полученной последовательности через эквалайзер с коэффициентами, полученными, по имеющейся оценке канала, и слежение за

изменением канала путём умножения принятого сигнала на подстраиваемые коэффициенты фильтра;

9. Перевод корректирующего сигнала во временную область.

Принцип эквалайзирования основывается на решении задачи распространения широкополосного сигнала в диспергирующем транссионсферном радиоканале. Задача сводится [9] к определению частотной $H(j\omega, t)$ (ЧХ), импульсной $h(\tau, t)$ (ИХ) и дисперсионной характеристик (ДХ), меняющихся от медленного времени t . При этом, ИХ и ЧХ связаны между собой прямым и обратным преобразованием Фурье:

$$H(j\omega, t) = H(\omega, t) \exp[-j\varphi(\omega, t)], \quad h(\tau, t) = F^{-1}[H(j\omega, t)]. \quad (1)$$

При учёте шумов и помех, воздействующих в канале, со спектральной плотностью мощности $N(\omega, t)$, которая не меняется со временем жизни канала $N(\omega, t) = N(\omega, t_0)$, у корректора должна реализоваться следующая частотная характеристика:

$$\hat{H}(j\omega, t) = \frac{H^*(j\omega, t)}{\sqrt{N(\omega, t_0)}} = \frac{H(\omega, t_0)}{\sqrt{N(\omega, t_0)}} \cdot \exp[j\varphi(\omega, t)] \quad (2)$$

Канал на средней частоте $\bar{\omega} = (\omega_1 + \omega_2)/2$ имеет ограниченную полосу частот Ω_{ch} и его ФЧХ можно представить в виде разложения в степенной ряд [8, 9]:

$$\begin{aligned} \varphi(\bar{\omega} + \Omega, t) &\approx \varphi(\bar{\omega}, t) + \varphi'(\bar{\omega}, t) \cdot \Omega + \varphi''(\bar{\omega}, t) \cdot \frac{\Omega^2}{2!} + \varphi'''(\bar{\omega}, t) \cdot \frac{\Omega^3}{3!} = \\ &= \varphi(\bar{f}, t) + 2\pi\tau_g(\bar{f}, t) \cdot [f - \bar{f}] + \pi s(\bar{f}, t) \cdot [f - \bar{f}]^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Параметр $\tau_g = \frac{\partial\varphi(\omega)}{\partial\omega}$ называется дисперсионной характеристикой, а параметр $s = \frac{\partial\tau(f)}{\partial f}$ – наклон ДХ, преобладание которого является причиной дисперсионных искажений.

Для коррекции дисперсионных искажений системных характеристик требуется компенсация дисперсии, которая достигается умножением частотной характеристики на комплексную функцию вида:

$$\hat{H}(j\omega, t) = \frac{H(\bar{f}, \bar{t}_0) \exp[j\pi \cdot (s - s_0)(f - \bar{f})^2]}{\sqrt{N(\omega, t_0)}} \quad (4)$$

где для транссионсферного канала [10] $s = -\frac{k \cdot N_t}{c \cdot \bar{f}^3}$, $s_0 = -\frac{k \cdot N_{t0}}{c \cdot \bar{f}^3}$, $k=80,5 [m^3/c^2]$.

Коррекция достигается, когда $s(\bar{f}, t) = s_0(\bar{f}, t_0)$. Пусть s_0 определяется в результате транссионсферного зондирования радиоканала, тогда в момент времени $t = t_0$ можно реализовать полную компенсацию влияния дисперсии. При изменении времени t между значениями s и s_0 будет происходить рассогласование, приводящее к негативному влиянию дисперсии, что требует повторной актуализации. Время, за

которое накапливающиеся искажения являются допустимыми, назовем временем жизни канала $dt = t - t_0 = T_t$. Очевидно, в качестве этого параметра можно выбрать отрезок времени, за который разность $s - s_0$ достигает критического значения s_c . Согласно [11]:

$$s_c = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{B_{ch}} \quad (5)$$

так как, наклон меняется на критическую величину $\Delta s = s - s_0 = s_c$, то согласно дифференциальному исчислению:

$$\Delta s \approx \frac{ds}{dt}(t - t_0) = \frac{s_c}{T_t} \cdot (t - t_0) \quad (6)$$

откуда:

$$\frac{s_c}{T_t} = \frac{ds}{dt} = \frac{80.5}{c \cdot f^3} \cdot \left| \frac{dN_t}{dt} \right| \quad (7)$$

или

$$T_t \approx \frac{c \cdot \bar{f}^3}{20 \cdot \pi \cdot B_{ch} \cdot \left| \frac{dN_t}{dt} \right|} \quad (8)$$

Согласно формуле (8) время жизни растёт с увеличением рабочей частоты канала и уменьшается с ростом полосы частот канала и скорости изменения ПЭС. Если актуализация будет проводиться периодически, то за ее период необходимо выбрать $\min T_t$, соответствующее $\max N_t$.

Оценки суточного хода времени жизни канала из-за пространственно-временных вариаций его параметров

Для построения суточного хода времени жизни канала необходимо оценить ПЭС над точкой приёма. Так для измерения ПЭС был развит метод вычислительного эксперимента на основе международной модели ионосферы IRI-2016. Исследовались суточные ходы ПЭС для среднеширотной ионосферы на примере города Йошкар-Ола (координаты: $56^\circ 38' 19''$ северной широты и $47^\circ 53' 26''$ восточной долготы) для различных сезонов. При этом ионосфера носила невозмущенный характер (умеренная солнечная активность, магнитные бури отсутствовали).

Полученные из модели суточные ходы ПЭС представлены на рис. 2.

По ним для канала на рабочей частоте 1 ГГц с полосой 500 МГц были получены суточные ходы времени жизни канала для невозмущенной ионосферы. Для этой полосы частот канала значение критического наклона составило $s_k = 0,5 \cdot 10^{-6}$ мкс/МГц.

Результаты вычислений представлены на рис. 3 и рис. 4. Красным цветом отмечены результаты летнего и весеннего периодов, а синим – зимнего и осеннего.

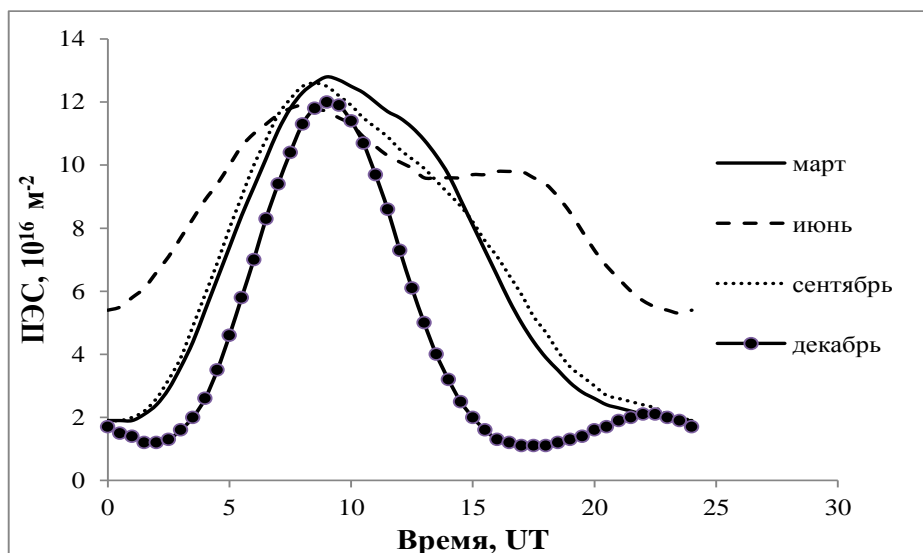


Рис. 2. Суточные ходы ПЭС, 2018 г.

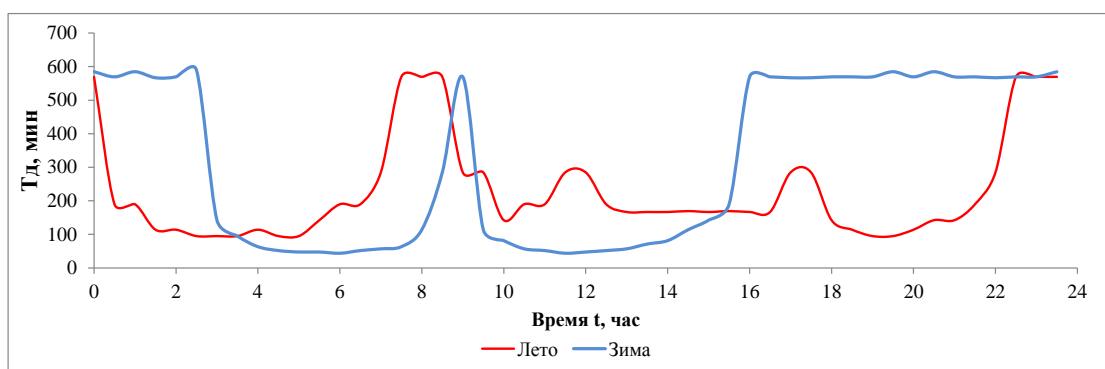


Рис. 3. Суточные изменения времени жизни канала с $B_{ch} = 500 \text{ \AA} \ddot{o}$ для летнего и зимнего периодов

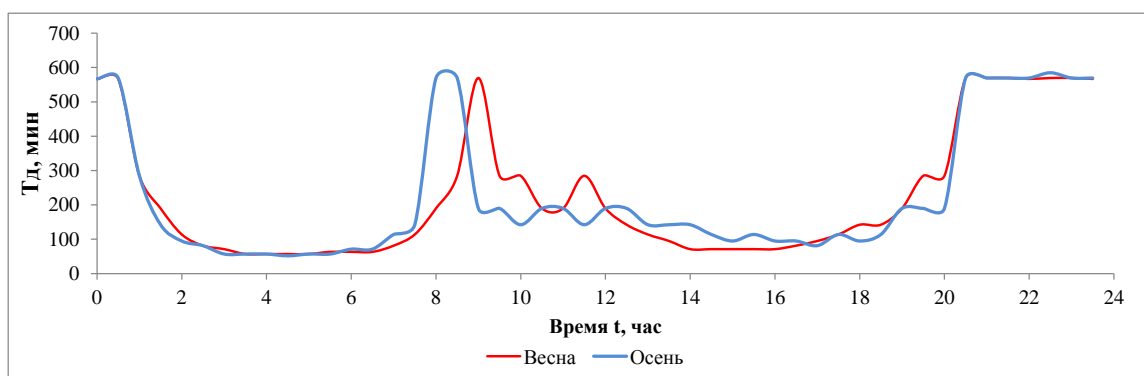


Рис. 4. Суточные изменения времени жизни канала с $B_{ch} = 500 \text{ \AA} \ddot{o}$ для весеннего и осеннего периодов

Видно, что в ночные и дневные часы время жизни канала больше, чем в переходное время (утро, вечер). Исходя из этого результата, можно сделать следующие заключения:

- в зимнее время минимальное время жизни канала составляет 40–120 мин;
- в летний период оно варьируется в диапазоне от 100–250 мин;

- в весенний и осенний периоды наблюдается схожая картина, когда минимальное время жизни составляет 40–200 мин.

Таким образом, интервал времени в 30 – 40 мин следует выбрать за период актуализации адаптивного корректора при его обучении. Обратим внимание на то, что этот временной интервал соответствует периоду вертикального зондирования ионосферы в невозмущенных условиях. В периоды возмущений частота зондирования увеличивается и его периодичность составляет до 5 – 10 мин.

Таким образом, по истечению времени $\min T_t = 5$ возникает необходимость актуализации данных при обучении корректирующей схемы для его оптимального функционирования.

Заключение

Предложен алгоритм адаптивной коррекции дисперсионных искажений в транссионосферном радиоканале связи, включающий режим обучения корректора. На основе экспериментальных данных установлено, что периодичность актуализации параметров адаптивного корректора составляет 5 мин.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ: № 8.2817.2017/ПЧ и грантов Российского фонда фундаментальных исследований: № 17-07-01590, № 18-37-00079, № 18-07-01377.

Литература

1. Петренко П.Б., Бонч-Бруевич А.М. Моделирование и оценка ионосферных искажений широкополосных радиосигналов в локации и связи // Вопросы защиты информации, 2007. № 3. С. 24-29.
2. N. V. Ryabova, V.A. Ivanov, D.V. Ivanov, M. I. Ryabova, A. A. Kislitsin. Method of Experimental Estimating Processing Gain from Dispersion Correction in a Wideband Transionospheric Radio Channel / Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2018, DOI: 10.1109/WECONF.2018.8604314
3. Kretov, N.V., T.Y. Ryshkina, and L.V. Fedorova, “Dispersive distortions of transionospheric broadband VHF signals”, Radio Sci., vol. 27(4), pp. 491–495, 1992
4. N.A. Armand, “Propagation of broadband signals in dispersive media”, Journal of Communications Technology and Electronics, vol. 48, no 9, pp. 1045-1057, 2003
5. Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В., Рябова М.И., Кислицын А.А. Определение параметров частотной дисперсии транссионосферного радиоканала // Известия высших учебных заведений. Физика. 2016. Т. 59 № 12-2. С. 105-108.
6. Кислицын А. А., Овчинников В. В., Трушкова О. А. Создание моделей и алгоритма для исследования эффектов нелинейной частотной дисперсии в транссионосферных каналах связи с дисперсионными искажениями // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2018. № 3 (39). С. 6-19. DOI: 10.15350/2306-2819.2018.3.6
7. Ivanov D., Ivanov V., Ryabova N., Ryabova M., Kislitsin A., Chernov A., Konkin N. Dispersive Distortions of System Characteristics of Broadband Transionospheric Radio Channels // Journal of Applied Engineering Science 15(2017)4, P. 550-555 doi:10.5937/jaes15-11784.
8. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М.: Наука, 1968. 400 с.
9. A. A. Kislitsin, D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, A. A. Chernov, V. V. Ovchinnikov. Studying Impulse Response Peak Power Losses in a Satellite Communication Transionospheric Radio

Channel with the Use of GPS/GNSS Data/ 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8456973

10. Ivanov D., Ivanov V., Ryabova N., Ryabova M., Kislitsin A., Ovchinnikov V. Studying frequency dispersion in transionospheric radio paths using the estimates of the total electron content // 12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018), DOI: 10.1049/cp.2018.0474

11. Иванов Д. В. Методы и математические модели исследования распространения в ионосфере сложных дециметровых сигналов и коррекции их дисперсионных искажений: монография. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2006. 268 с.