

КОМПЛЕКС АДАПТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ДИСПЕРСИОННЫХ ИСКАЖЕНИЙ В ТРАНСИОНОСФЕРНЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ РАДИОКАНАЛАХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

Н.В. Рябова, А.А. Кислицын

Поволжский государственный технологический университет
Российская Федерация, 424000, г. Йошкар-Ола, 3, ул. Ленина, д. 3

Аннотация. Решена актуальная научно-техническая задача развития метода адаптивной компенсации дисперсионных искажений в трансionoсферных широкополосных радиоканалах для повышения пропускной способности и помехоустойчивости систем спутниковой связи. Представлен программно-аппаратный комплекс преодоления эффекта частотной дисперсии на основе метода обратной фильтрации с периодическим обучением компенсатора.

Ключевые слова: трансionoсферный радиоканал; системы спутниковой связи; частотная дисперсия; адаптивная компенсация дисперсии.

Введение

Трансионoсферный радиоканал связи обеспечивает распространение сигналов от передатчика системы спутниковой связи (ССС) до приемной наземной станции (или наоборот). Ионoсфера – среда распространения сигнала – обладает эффектом частотной дисперсии, когда фазовая скорость волны зависит от частоты. Эта дисперсия вызывает искажения широкополосного волнового пакета тем большие, чем шире его полоса частот [1, 2]. Дисперсионные искажения варьируются в пространстве и времени вслед за изменениями ионoсферы (суточные, сезонные и пр.). В рамках канальной модели распространения волнового пакета среда характеризуется радиоканалом с некоторой частотной характеристикой (ЧХ). Ее фаза содержит параметр, называемый полосой когерентности канала (полоса неискаженной передачи) [3, 4]. При использовании в задаче широкополосной трансionoсферной связи возникла проблема разработки метода адаптивного нивелирования негативного влияния частотной фазовой дисперсии в рамках канальной модели. В статье рассматриваются основы разработанного метода и экспериментальные оценки повышения эффективности СССР.

1. Математическая модель обратной фильтрации частотной характеристики канала

В качестве компенсирующего устройства для минимизации искажений различного характера (амплитудных, частотных или фазовых) излучаемого сигнала при его прохождении через среду распространения в приемном устройстве используют метод эквалайзирования [5]. Причем, если системные характеристики радиоканала существенно изменяются

во времени, приводя к низким информационным техническим показателям ССС, то существует необходимость в решении задачи построения адаптивного устройства [6].

С общих позиций задача широкополосной связи выглядит следующим образом. Предполагается, что в частотной области комплексную амплитуду сигнала системы связи можно представить в виде:

$$U_T(j\omega) = U(\omega) \cdot \exp(j\phi(\omega)), \quad (1)$$

где $U(\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ); $\phi(\omega)$ – фазо-частотная характеристика (ФЧХ) информационного сигнала.

Приемный связной сигнал после прохождения по радиоканалу с диспергирующей средой будет содержать каналный сомножитель, эквивалентный ЧХ канала:

$$U_R(j\omega, t) = \underbrace{H(\omega, t) \cdot \exp[-j\phi(\omega, t)]}_{\text{ЧХ канала}} \cdot \underbrace{U(\omega) \cdot \exp(j\phi(\omega))}_{\text{информационный сигнал}}. \quad (2)$$

Основной задачей систем радиосвязи является выделение информационного сигнала на приемной стороне, которая заключается в фильтрации мешающего каналного сомножителя в (2). Для этой цели используется метод обратной фильтрации, когда компенсация каналного сомножителя достигается за счет умножения принятого сигнала на функцию $G(j\omega, t)$, являющейся обратной функцией ЧХ канала. При этом АЧХ можно считать постоянной $H(\omega, t) \approx \text{const}$ (рис. 1):

$$U_R(j\omega, t) \cdot G(j\omega, t) = U_R(j\omega, t) \cdot \frac{\exp[j\phi(\omega, t)]}{H(\omega, t)} = U(\omega) \cdot \exp(j\phi(\omega)). \quad (3)$$

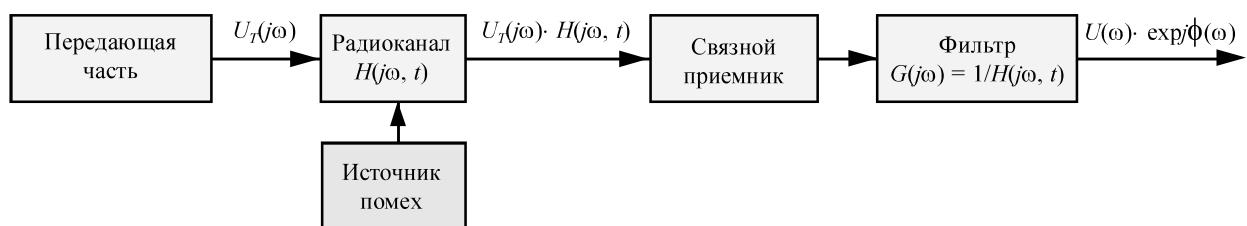


Рис. 1. Схема обратной фильтрации мешающего каналного сомножителя

Пусть комплексная ЧХ канала имеет вид:

$$H(j\omega, t) = H(\omega, t) \cdot \exp[-j\phi(\omega, t)] = H(\omega, t) \cdot \exp[-j(\phi_{\text{л}}(\bar{f}, t) + \phi_{\text{н}}(\bar{f}, t))], \quad (4)$$

где $\phi(\omega, t)$ – ФЧХ; $\phi_{\text{л}}(\bar{f}, t) = \phi(\bar{f}, t) + 2\pi\tau_g(\bar{f}, t) \cdot F$ – линейная составляющая ФЧХ;

$\phi_{\text{н}}(\bar{f}, t) = \pi s(\bar{f}, t) \cdot F^2$ – нелинейная составляющая ФЧХ (дисперсия второго порядка).

Была принята гипотеза о том, что для коррекции фазовой дисперсии оптимальным является метод обратной фильтрации ЧХ, которая должна осуществляться путем ее умножения на функцию вида [7]:

$$G(\bar{f}, t) = \exp j\varphi_n(\bar{f}, t). \quad (5)$$

При этом функция $G(\bar{f}, t)$ может быть реализована в виде эквалайзера. Нелинейная составляющая фазы, отвечающая за искажения в транссионсферном радиоканале, связана с полным электронным содержанием N_i (ПЭС) и средней частотой канала $\bar{f}$ [2, 8]:

$$\varphi_n(\bar{f}, t) = \pi s(\bar{f}, t) \cdot F^2 = -(\pi k / c) \cdot (N_i F^2 / \bar{f}^3), \quad (6)$$

где $k = 80,5 \text{ [m}^3 / \text{c}^2]$; c – скорость света; N_i – полное электронное содержание (ПЭС) ионосферы.

С учетом ошибок измерения ПЭС [2] $\tilde{N}_i = N_i \mp \Delta N_i$ нелинейную составляющую фазы можно записать в виде:

$$\tilde{\varphi}_n(\bar{f}, t) = \pi \tilde{s}(\bar{f}, t) \cdot F^2 = -(\pi k / c) \cdot (\tilde{N}_i F^2 / \bar{f}^3), \quad (7)$$

где $\tilde{\varphi}_n(\bar{f}, t)$, $\tilde{s}(\bar{f}, t)$, $\tilde{N}_i$ – измеренные значения с ошибкой.

Из-за ошибки измерения функция $\tilde{G}(\bar{f}, t)$ имеет вид:

$$\tilde{G}(\bar{f}, t) = \exp j\tilde{\varphi}_n(\bar{f}, t). \quad (8)$$

С учетом сказанного, ЧХ на выходе обратного фильтра будет равна:

$$\begin{aligned} H(\bar{f}, t) \cdot \tilde{G}(\bar{f}, t) &= H(\bar{\omega}, t) \cdot \exp j[-\varphi_n - \varphi_n(\bar{f}, t)] \cdot \exp j\tilde{\varphi}_n(\bar{f}, t) = \\ &= H(\bar{\omega}, t) \cdot \exp j[-\varphi_n(\bar{f}, t)] \cdot \exp j[\tilde{\varphi}_n(\bar{f}, t) - \varphi_n(\bar{f}, t)]. \end{aligned} \quad (9)$$

Таким образом, определяемая фаза в выражении (9) содержит как регулярную, так и случайную компоненты. В результате обратной фильтрации разность фаз будет содержать случайную компоненту:

$$\begin{aligned} \tilde{\varphi}_n(\bar{f}, t) - \varphi_n(\bar{f}, t) &= (k\pi / c) \cdot (\pm \Delta N_i / \bar{f}^3) \cdot F^2 = \\ &= (k\pi / c) \cdot (N_i / \bar{f}^3) \cdot (\pm \Delta N_i / N_i) \cdot F^2, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\pm \Delta N_i / N_i = \delta N_i$ – относительная ошибка.

Следовательно, из-за наличия случайной составляющей в выражении (10) полностью скомпенсировать эффект частотной дисперсии в радиоканале не удастся и на выходе обратного фильтра будут присутствовать остаточные дисперсионные искажения из-за погрешности измерения ПЭС.

В конечном итоге получена математическая модель для оценки информационно-технических характеристик ССС в результате коррекции дисперсионных искажений. Используя выражение для полосы когерентности (ПК) $B_k = \sqrt{c \cdot \bar{f}^3 / \pi \cdot k \cdot N_i} = \mu \cdot N_i^{-1/2}$ и ошибку измере-

ния ПЭС, случайную составляющую представляли в виде $b_k = \mu \cdot \Delta N_t^{-1/2}$ откуда $\eta_k = b_k / \bar{B}_k = \sqrt{N_t / \Delta N_t} = 1 / \sqrt{\delta N_t}$, где η_k – выигрыш по ПК при компенсации дисперсии с ошибкой. Видно, что выигрыш в ПК определяется относительной погрешностью и зависит от нее как $(\delta N)^{-0,5}$. Очевидно, что полоса канала в данном случае может быть увеличена до нового (большого) значения ПК.

2. Аппаратно-программный комплекс для компенсации дисперсионных искажений ШПС в случае трансionoсферного распространения

В трансionoсферном радиоканале из-за постоянной изменчивости системных характеристик и параметров дисперсии, обусловленных различными вариациями ПЭС в медленном (геофизическом) времени, задача фильтрации усложняется, так как эквалайзер должен быть адаптивным. Это означает, что ключевые параметры, в качестве которых рассматриваются параметры дисперсии, для формирования компенсирующих сомножителей в нелинейной составляющей фазы нуждаются в постоянной актуализации. С учетом этих предпосылок комплекс, реализующий обратную фильтрацию, в достаточно широкой полосе частот должен иметь следующие режимы: диагностику канала, обучение адаптивного эквалайзера, эквалайзирование (рис. 2).

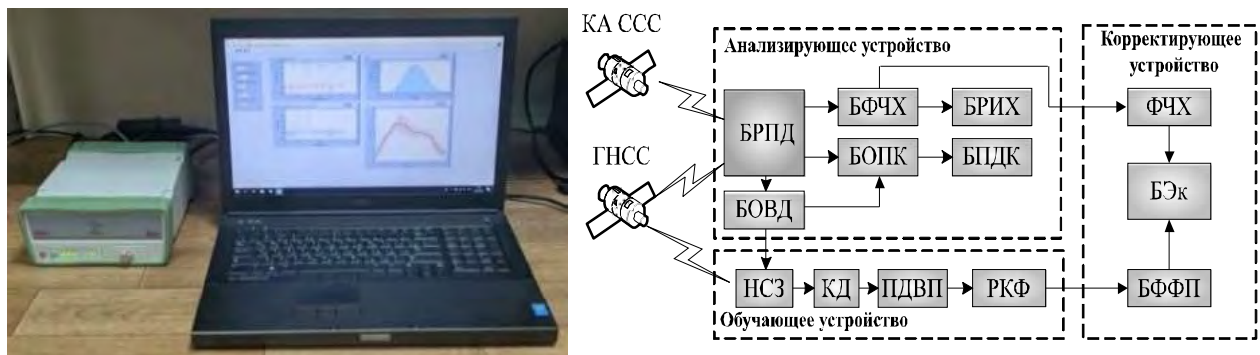


Рис. 2. Комплекс адаптивной компенсации частотной дисперсии в трансionoсферном радиоканале

Функционирование измерительного аппаратно-программного комплекса предполагает следующие этапы:

- 1) синхронный прием зондирующего сигнала глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и сигнала ССС;
- 2) диагностику текущего состояния канала в анализирующем устройстве. Для реализации применяется разработанный автором метод диагностики системных характеристик трансionoсферного канала, позволяющий в результате обработки экспериментальных данных сигналов сети референчных станций ГНСС периодически оценивать текущие парамет-

ры частотной (блок БФЧХ) и импульсной (блок БРИХ) характеристик. На этапе 1) рассчитываются параметры частотной дисперсии (блок БРПД) по разработанной математической модели, основными параметрами которой являются технические характеристики ССС (B_{ch} и f) и коэффициент дисперсии канала α_1 , полученный по результатам зондирования ГНСС.

Кроме того, в анализирующем режиме регистрируется предельная полоса частот (блок БОПК) для эффективной работы ССС в условиях частотной дисперсии. Следует отметить, что в течение определенного времени рассмотренные параметры остаются фиксированными, однако после рассогласованности канала связи из-за постоянной изменчивой среды деградации канала необходима их актуализация. Определение периода актуализации данных осуществляется на основе времени деградации радиоканала (блок БОВД);

3) оценка истечения времени жизни канала. Реализуется расчет коэффициента дисперсии (блок КД), по результатам которого рассчитывается параметр дисперсии второго порядка (блок ПДВП) и определяются фазовые поправочные коэффициенты (блок РКФ) для подканалов на их средней частоте. Число подканалов определяется исходя из количества примыкающих неперекрывающихся полос, составляющих общую полосу B_{ch} , каждая из которых не превышает полосы когерентности B_k ;

4) формирование блоком БФФП тестовой последовательности поправок для НС фаз и одновременно отчетов их в анализирующем устройстве;

5) подстройка коэффициентов частотных фильтров адаптивного эквалайзера (БЭк) на основе полученной последовательности корректирующих поправок от обучающего устройства.

3. Оценка повышения информационно-технических характеристик систем спутниковой связи при использовании разработанного комплекса

Сначала оценивалась полоса когерентности широкополосного радиоканала связи на рабочей частоте 1 ГГц, обусловленная случайной компонентой в фазе для разных ошибок определения N_t (таблица).

Полоса когерентности трансионосферного радиоканала связи до и после компенсации дисперсионных искажений с различной относительной ошибкой δN_t , определения ПЭС

ПЭС, TECU	B_k , МГц (исходная)	$\hat{B}_k$, МГц (после компенсации)		
		$\delta N_t = 0,05$	$\delta N_t = 0,1$	$\delta N_t = 0,15$
5	154	500	487	397
10	108	487	344	281
15	88	398	281	230
20	77	344	243	198
25	68	308	218	178
30	62	281	198	162

Полученные экспериментальные результаты позволили сделать вывод о том, что выигрыш от коррекции полосы трансионосферного радиоканала достигает значений 2,5 – 7 раз. Установлено, что для зимы он составляет 2,5 – 3; в переходное время – 3 – 4; в дневное время – 4. Весной в ночное время выигрыш равен 3; в переходное время – 3,5 – 7; в дневное

время – 4,5 – 6. Летом в ночное время он составляет 4 – 4,5; в переходное время – 4 – 6; в дневное – 5 – 7. Осенью в ночное время он равен 3,5 – 4,5; в переходное время – 4 – 4,5; в дневное равен 4.

Кроме того, использование известного соотношения на основе формулы Шеннона $C = B_{ch} \log_2(1 + SNR)$ и прямой зависимости от полосы радиоканала показало, что выигрыш в пропускной способности при коррекции дисперсии будет также достигать величины 2,5... 7 раз.

Для полученных в таблице полос частот покажем выигрыш при снижении энергетических потерь импульсной мощности от коррекции дисперсии в широкополосном трансионосферном канале на рабочей частоте 1 ГГц. Расчеты проведены для каналов с полосами частот 200; 300; 500 МГц. Рассчитанные зависимости выигрыша импульсной мощности PDP от значений ПЭС при заданных значениях полос частот трансионосферных радиоканалов демонстрирует рис. 3.

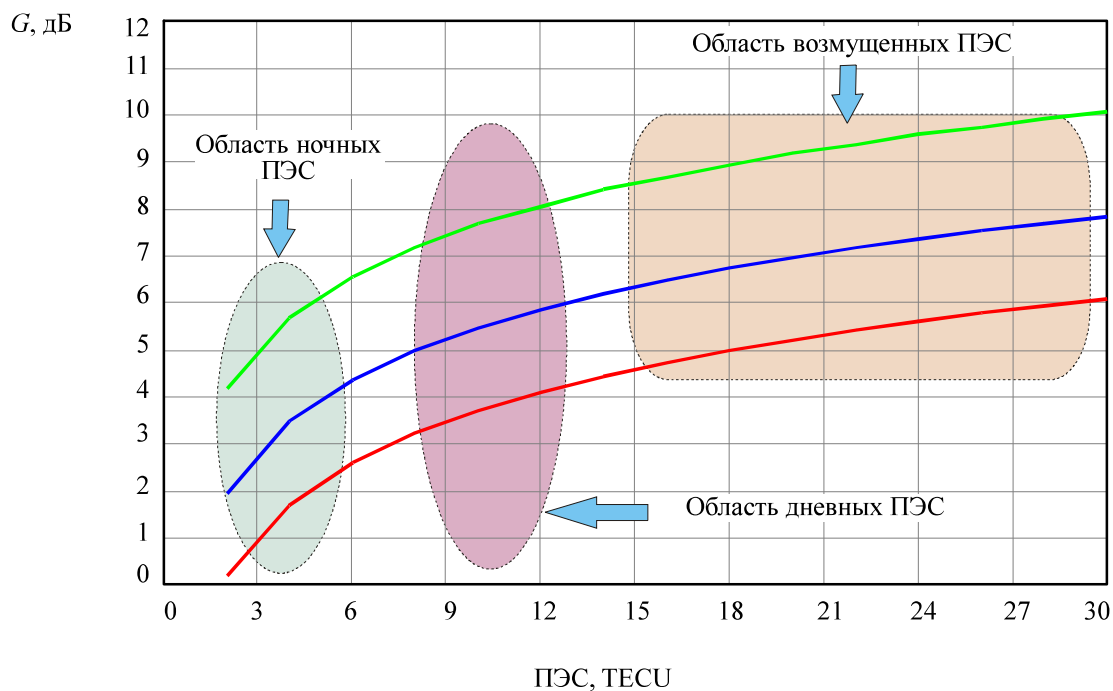


Рис. 3. Энергетический выигрыш для ССС при различных ПЭС:

— 200 МГц; — 300 МГц; — 500 МГц

Видно, что при полосах канала 200, 300, 500 МГц для ночного времени суток ($N_i \approx 4$ TECU) энергетический выигрыш от коррекции частотной дисперсии составил 1,6; 3,5; 5,6 дБ; в дневное время суток ($N_i \approx 10$ TECU) выигрыш равен 3,5; 5,4; 7,6 дБ, в переходное время суток (т.е. от дня к ночи или от ночи к дню) выигрыш будет равен промежуточным значениям между дневными и ночными. Кроме того, энергетический выигрыш для возмущенной ионосферы ($N_i \approx 25$ TECU) может достичь 5,6; 7,4; 9,6 дБ при исследуемых полосах частот.

Заключение

В результате теоретических и экспериментальных исследований показано, что разработанные методы адаптивного преодоления эффекта частотной дисперсии при существенном расширении полосы частот трансionoсферного радиоканала позволяют существенно улучшить информационно-технические характеристики широкополосных ССС: пропускную способность в 2,5 – 7 раз, энергетический выигрыш в 1,6 – 9,6дБ.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ivanov, D.V., Ryabova, N. et al.* Dispersive distortions of system characteristics of broadband transionospheric radio channels // Journal of Applied Engineering Science. – 2017. – Vol. 15. – № 4. – Pp. 550-555.
2. *Kislitsin, A., Ivanov, D., Ryabova, M. et al.* Adaptive correction for frequency phase dispersion arising with transionospheric propagation of wideband radio signals// Proceedings 2019 Russian Open Conference on Radio Wave Propagation, RWP 2019. DOI: 10.1109/RWP.2019.8810344.
3. *Иванов, Д.В.* Методы и математические модели исследования распространения в ионосфере сложных декаметровых сигналов и коррекции их дисперсионных искажений / Д.В. Иванов. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2006. – 266 с.
4. *Ivanov, V.A., Ryabova, N.V., Ryabova, M.I. et al.* Hardware software system for producing coherent bandwidth maps of transionospheric wideband radio channel // 2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. (SYNCHROINFO) – 2019. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2019.8813934.
5. *Ivanov, V.A., Kislitsin A.A., Ivanov, D.V. et al.* 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). Saint-Petersburg, 2019. Pp. 1-4. DOI: 10.1109/WECONF.2019.8840616.
6. *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.
7. *Ivanov, D.V., Ivanov, V.A., Ryabova, N.V. and Kislitsin, A.A.* Determining the repetition period of transionospheric radio channel sounding to retrain a facility of correction for dispersion distortions // Journal of Physics: Conference Series, Russian open scientific conference «Modern problems of remote sensing, radar, wave propagation and diffraction» (MPRSRWP), 23-25 June 2020. Murom: Russian Federation, 2020. – Vol. 1632. – Pp.1-6. DOI: 10.1088/1742-6596/1632/1/012006.
8. *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.

COMPLEX FOR ADAPTIVE COMPENSATION OF DISPERSION DISTORTIONS IN TRANS-IONOSPHERIC WIDEBAND RADIO CHANNELS FOR INCREASING EFFICIENCY OF SATELLITE COMMUNICATION

N.V. Ryabova, A.A. Kislitsin

Volga State University of Technology
3, Lenin Str., Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation

Abstract. Paper presents the solution of the topical scientific and technical problem of the development of the method of adaptive compensation for dispersion distortions in trans-ionospheric wideband radio channels to increase the throughput and noise immunity of satellite communication systems. There is presented the software hardware complex for overcoming the effect of frequency dispersion based on the method of inverse filtering with periodic training of the compensator.

Keywords: trans-ionospheric radio channel; satellite communication systems; frequency dispersion; adaptive dispersion compensation.

Дата поступления статьи в редакцию 20.04.2021.