

К 85-ЛЕТИЮ
ДМИТРИЯ СЕРГЕЕВИЧА ЛУКИНА

УДК 621.396

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОЙ ШИРОКОПОЛОСНОСТИ СИСТЕМ
СПУТНИКОВОЙ РАДИОСВЯЗИ В УСЛОВИЯХ ВНУТРИМОДОВОЙ
ДИСПЕРСИИ ТРАНСИОНОСФЕРНЫХ РАДИОКАНАЛОВ**

© 2023 г. Д. В. Иванов^а, В. А. Иванов^а, Н. В. Рябова^а, А. А. Кислицын^а, *

^а Поволжский государственный технологический университет,
пл. Ленина, 3, Йошкар-Ола, 424000 Российская Федерация

*E-mail: KislitsinAA@volgatech.net

Поступила в редакцию 17.03.2023 г.

После доработки 17.03.2023 г.

Принята к публикации 26.03.2023 г.

Решена проблема существенного расширения полосы частот транссионосферного радиоканала до предельно возможных значений для повышения эффективности систем спутниковой связи. Создан комплекс средств и математическое обеспечение для преодоления дисперсии групповой задержки на основе применения методов интеллектуального анализа данных экспериментальной диагностики транссионосферной линии связи. Развита алгоритмы и средства интеллектуальной сенсорной диагностики широкополосных радиоканалов с режимами адаптации к изменчивости дисперсии. Установлено, что без адаптации удастся создать радиоканалы неискаженной передачи с коэффициентом широкополосности не более 4.5%, при этом адаптация к изменчивости дисперсии позволяет увеличить широкополосность до 11.5%. Найдено, что наибольшей широкополосности (20...25%) для неискаженной дисперсией передачи можно добиться, применяя адаптивную инверсную фильтрацию частотной характеристики канала в совокупности с такими интеллектуальными методами как: эквалаизация с ошибкой, машинное обучения эквалайзера канала и обработка больших данных.

DOI: 10.31857/S0033849423060049, EDN: XLUNDS

ВВЕДЕНИЕ

Спутниковая связь относится к одному из основных видов дальней радиосвязи, способной обеспечить передачу больших объемов информации на дальние расстояния. В настоящее время спутниковая связь продолжает активно развиваться, возникают новые технические решения, направленные на реализацию и использование широкополосных систем WGS и систем с высокой пропускной способностью HTS. Это позволяет обеспечивать территории мультимедийной связью и создавать корпоративные высокоскоростные интернет-сети. Системы спутниковой связи (ССС) работают сквозь ионосферу, используя транссионосферный радиоканал на рабочих частотах из диапазона 0.1...30 ГГц (диапазоны УВЧ и СВЧ) [1].

Одним из направлений модернизации является решение проблемы существенного расширения полосы частот транссионосферного радиоканала до предельно возможных значений. Трудности на этом пути связаны с проявлением внутримодовой дисперсии, когда с превышением полосой некоторого предела, называемого полосой когерент-

ности, возникают дисперсионные искажения переносящих информацию волновых пакетов [2]. Большой вклад в развитие физических моделей распространения в диспергирующих средах широкополосных волновых пакетов внесли ученые научной школы Д.С. Лукина [3–5]. Эти работы особенно актуальны для радиосвязи и радиолокации.

Для преодоления искажений требуется проведение исследований и создание соответствующих средств. Было показано, что используемые методы, по ряду причин, не обеспечивают полного преодоления негативного эффекта. Поэтому в настоящее время стоит задача предельно возможного увеличения широкополосности радиоканалов связи и анализа влияния на нее геофизических факторов. Перспективы ее решения связаны с применением технологий искусственного интеллекта.

Цель данной работы – дальнейшее развитие с применением технологий искусственного интеллекта методов и комплекса средств для обеспечения предельной широкополосности систем спутниковой радиосвязи в условиях внутримодовой дисперсии.

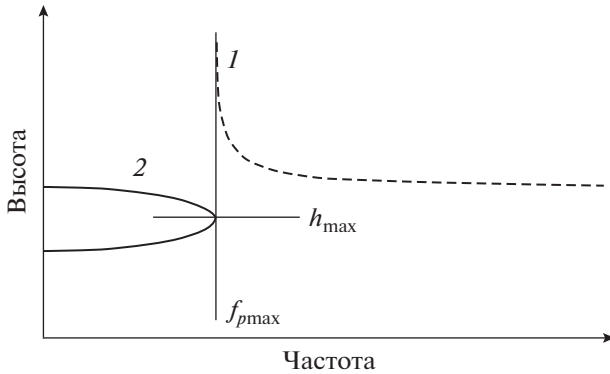


Рис. 1. Аномальная внутримодовая дисперсия в транссионосферном канале.

1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕДЕЛЬНОЙ ШИРОКОПОЛОСНОСТИ ДИСПЕРГИРУЮЩИХ ТРАНСИОНОСФЕРНЫХ РАДИОКАНАЛОВ

Для решения поставленных задач требуется комплексирование канальной и физической моделей. Такой подход позволяет установить связи параметров системных характеристик радиоканалов с полным электронным содержанием (ПЭС или ТЭС (Total Electron Content)) ионосферы [1]. В рамках канальной модели задача сводится к описанию распространения волновых пакетов (радиоимпульсов) и замене радиоканала эквивалентной линейной системой с частотной (ЧХ) и импульсной (ИХ) характеристиками. При этом ЧХ канала имеет динамический характер, который учитывается с помощью медленного (геофизического) времени. Амплитудно-частотная (АЧХ) и фазочастотная (ФЧХ) характеристики радиоканала получаются при использовании физической модели, основанной на известном, для данного случая, решении в высокочастотном приближении волнового уравнения.

Для радиоканала учтем внутримодовую частотную дисперсию групповой задержки [6, 7]. Формулу для неё можно получить из выражения для разложения ФЧХ в ряд Тейлора, около его рабочей частоты $\bar{\omega}$ канала, по разностным частотам $\Omega = \omega - \bar{\omega}$ до слагаемого третьего порядка:

$$\begin{aligned} \varphi(\bar{\omega} + \Omega) &= \varphi(\bar{\omega}) + \varphi'(\bar{\omega})\Omega + \frac{1}{2}\varphi''(\bar{\omega})\Omega^2 = \\ &= \varphi(\bar{\omega}) + \tau_g(\bar{\omega})\Omega + \frac{1}{2}\text{GDD}\Omega^2. \end{aligned} \quad (1)$$

Дифференцированием формулы (1) можно получить разложение для групповой задержки волнового пакета [8]:

$$\begin{aligned} \tau_g(\bar{\omega} + \Omega) &= \frac{d\varphi}{d\omega} = \tau_g(\bar{\omega}) + \frac{d\tau_g}{d\omega}\Omega = \\ &= \tau_g(\bar{\omega}) + \text{GDD}\Omega. \end{aligned} \quad (2)$$

Существует несколько критериев оценки широкополосности каналов (сигналов). Считаемый основным критерий был введен американским Агентством перспективных оборонных исследовательских проектов (DARPA) [9]. Критерий основан на сравнении полосы канала $\Omega_{ch} = \omega_2 - \omega_1$ с его рабочей частотой $\bar{\omega} = (\omega_2 + \omega_1)/2$, где $\bar{\omega}$ – средняя частота отрезка $[\omega_1, \omega_2]$. По определению DARPA коэффициент широкополосности равен

$$\eta_f = \Omega_{ch}/2\bar{\omega}. \quad (3)$$

При значениях коэффициента $\eta_f \leq 0.01$ каналы считаются узкополосными, при $0.01 < \eta_f \leq 0.25$ – широкополосными, а при $\eta_f > 0.25$ – сверхширокополосными.

При исследовании распространения волновых пакетов в диспергирующих средах часто вводится критерий значимости дисперсии, который характеризуется коэффициентом, равным отношению полосы канала Ω_{ch} к его полосе когерентности Ω_c :

$$\eta_d = \Omega_{ch}/\Omega_c, \quad (4)$$

где $\Omega_c = \sqrt{8/\text{GDD}}$.

При $\eta_d \leq 1$ ($\Omega_{ch} < \Omega_c$) дисперсией в канале можно пренебречь и считать, что задержка не зависит от частоты ($\tau_g(\bar{\omega} + \Omega) = \tau_g(\bar{\omega})$), а все составляющие спектра пакета распространяются с одной скоростью. При $\eta_d > 1$ ($\Omega_{ch} > \Omega_c$) канал считается диспергирующим и учёт дисперсии для него имеет принципиальное значение.

Из формулы (4) следует, что при распространении волновых пакетов в диспергирующих каналах групповая задержка линейно зависит от частоты с угловым коэффициентом

$$\text{GDD} = \frac{d\tau_g}{d\omega}(\bar{\omega}) = \varphi''(\bar{\omega}).$$

При $\text{GDD} > 0$ частотная зависимость групповой задержки является возрастающей функцией частоты, а при отрицательном ($\text{GDD} < 0$) – убывающей.

Известно [10, 11], что для транссионосферного канала групповая задержка убывает с ростом частоты ($\text{GDD} < 0$). Это значит, что в канале быстрее распространяются высокочастотные составляющие волнового пакета и поэтому дисперсия транссионосферного канала является аномальной (см. рис. 1).

Различия в скорости распространения спектральных частей волнового пакета может приводить к существенным дисперсионным искажениям его огибающей [11].

Для систем спутниковой связи рабочие частоты значительно превышают критическую частоту

глобального максимума ионосферы $\bar{f}/f_0 F2 = \bar{\omega}/\omega_0 F2 > 10$ ($f_0 F2$ – критическая частота $F2$ -слоя). Это позволяет в физической модели транссионосферного распространения волн использовать высокочастотное приближение [12]. Данное приближение устанавливает связь между полным электронным содержанием ТЕС (в TECU) и коэффициентом дисперсии групповой задержки GDD по формуле [13].

$$\begin{aligned} \text{GDD} &= -\frac{1}{2\pi} \frac{k\text{TEC}}{c\bar{f}^3} = \\ &= -\frac{1}{2\pi} \frac{k\text{TEC}}{c f_r^3} \left(\frac{\bar{f}}{f_r}\right)^{-3} = |\text{GDD}_r| \text{RF}^{-3}, \end{aligned} \quad (5a)$$

$$\begin{aligned} \Omega_c &= \sqrt{8/|\text{GDD}|} = 4\pi \sqrt{\frac{c\bar{f}^3}{k\text{TEC}}} = \\ &= 4\sqrt{\frac{\pi c \bar{f}^3}{k\text{TEC}}} \text{RF}^{\frac{3}{2}} = \Omega_{cr} \text{RF}^{\frac{3}{2}}. \end{aligned} \quad (5b)$$

Отсюда для полосы когерентности в угловых частотах f будем иметь следующую формулу:

$$B_c = \Omega_c/2\pi = B_{cr} \text{RF}^{\frac{3}{2}}. \quad (6)$$

Отметим, что для достижения общности решения задачи при выводе формул (5a) и (5b) сомножители были разделены нами на геофизический и частотный. Во втором сомножителе вместо рабочей частоты были введены опорная f_r частота и относительная $\text{RF} = \bar{f}/f_r$ (RF – Relative Frequency, относительная частота). Первые сомножители в формулах для GDD_r и Ω_{cr} , выражающиеся через параметр ТЕС, характеризуют изменение GDD_r и Ω_{cr} от геофизических факторов, влияющих на ТЕС. Второй сомножитель даёт возможность пересчитать параметры, полученные для канала на опорной частоте, на их значения для каналов на любой другой рабочей частоте \bar{f} . В качестве опорной в работе была принята частота $f_r = 1$ ГГц.

Из формул видно, что с ростом рабочей частоты величина коэффициента GDD изменяется как $1/\text{RF}^3$, а полоса когерентности растёт, как функция $\text{RF}^{\frac{3}{2}}$.

Итак, с учетом выполненных преобразований коэффициент широкополосности канала можно записать в виде

$$\begin{aligned} \eta_f &= \frac{\Omega_{ch}}{4\pi\bar{f}} = \frac{\Omega_{ch}}{\Omega_c} \frac{\Omega_c}{4\pi\bar{f}} = \eta_d \frac{\Omega_{cr} \text{RF}^{\frac{3}{2}}}{4\pi f_r \text{RF}} = \\ &= \eta_d \eta_{fr} \sqrt{\text{RF}} = \eta_d \eta_{fr} \sqrt{\frac{\bar{f}}{f_r}}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\eta_d = \Omega_{ch}/\Omega_c$ – коэффициент дисперсии, $\Omega_{cr} = 4\sqrt{\frac{\pi c f_r^3}{k\text{TEC}}}$ – полоса когерентности канала на опорной частоте; $\eta_d = B_{cr}/\bar{f} = \Omega_{cr}/\bar{\omega}$.

Видим, что изменение геофизического фактора приводит к вариациям полосы когерентности транссионосферного канала на опорной частоте, т.е. к вариациям коэффициента дисперсии.

2. ЗАДАЧИ ПРЕДЕЛЬНОЙ ШИРОКОПОЛОСНОСТИ ТРАНСИОНОСФЕРНЫХ КАНАЛОВ СВЯЗИ

Рассмотрим две задачи о предельной широкополосности транссионосферных каналов связи. Первая относится к случаю, когда дисперсией в широкополосном канале еще можно пренебречь. Вторая задача возникает в случае применения метода преодоления дисперсии с использованием инверсной фильтрации, однако при оценке коэффициентов инверсного фильтра допускается погрешность и дисперсию не удастся отфильтровать полностью.

Согласно приведенному анализу в первом случае предельная широкополосность транссионосферного радиоканала достигается при условии, когда полоса канала равна его полосе когерентности $\Omega_{ch} = \Omega_c$. Для практического применения результата требуется учесть изменчивость ионосферы в геофизическом времени. Это можно реализовать, если значения полосы когерентности определять экспериментально, используя для этого пассивный сенсор канала.

Во втором случае положительный эффект предельного расширения полосы канала дает применение метода инверсной фильтрации ЧХ транссионосферного канала, реализуемого с помощью соответствующего эквалайзера. При этом коэффициенты эквалайзера определяются с помощью пассивного сенсора. Ограничения широкополосности канала возникают из-за погрешностей при экспериментальном определении коэффициентов инверсного фильтра [14]. Рассмотрим задачу ограничения широкополосности более подробно. Учтем, что широкополосный эквалайзер представляет собой фильтр с примыкающими парциальными подканалами. Каждому произвольному k -му из них соответствует парциальный узкополосный транссионосферный радиоканал, ЧХ $H(j\bar{\omega}_k, t)$ которого можно представить в следующем виде [11]:

$$H(j\bar{\omega}_k, t) = \exp[-j\text{GDD}(\bar{\omega}_k)(\bar{\omega}_1 + (k-1)\omega_{ch})^2]. \quad (8)$$

Поэтому отсчеты коэффициента инверсного фильтра можно получить, используя формулу

$$\begin{aligned} G_{ch}(j\bar{\omega}_k, t) &= \\ &= \exp[j\text{GDD}(\bar{\omega}_k)(\bar{\omega}_1 + (k-1)\omega_{ch})^2] = I_k + jQ_k. \end{aligned} \quad (9)$$

Далее примем во внимание, что пассивный сенсор позволяет получить экспериментальные данные о ПЭС ионосферы. При этом допускается статистическая погрешность ΔTEC [14], которая трансформируется в значение параметра дисперсии групповой задержки ΔGDD . Эта погрешность будет представлять собой остаточную дисперсию gdd после инверсной фильтрации:

$$\text{gdd} = \Delta\text{GDD} = \rho\Delta\text{TEC}, \quad (10)$$

где

$$\rho = -\frac{1}{2\pi} \frac{k}{cf^3}.$$

Выразим остаточную дисперсию $\text{gdd} = \Delta\text{TEC}$ через относительную погрешность полного электронного содержания $\delta(\text{TEC})[\%]$ в виде

$$\text{gdd} = \Delta\text{GDD} = \text{GDD}\delta(\text{TEC}). \quad (11)$$

Откуда для широкополосного канала на опорной частоте остаточная дисперсия будет равна

$$\text{gdd}_r = \Delta\text{GDD}_r = \text{GDD}_r\delta(\text{TEC}), \quad (12)$$

$$\delta(\text{GDD}_r) = \delta(\text{TEC}).$$

Остаточная дисперсия ограничивает предельную полосу трансionoсферного канала следующей полосой когерентности:

$$\omega_c = \sqrt{8/\text{gdd}}. \quad (13)$$

При малых значениях погрешности использование инверсной фильтрации будет приводить к положительному эффекту роста полосы когерентности канала:

$$\Omega_{ch} = \omega_c, \quad \text{так как } \omega_c > \Omega_c. \quad (14)$$

Используя результаты, полученные для физической модели, запишем формулу для коэффициента широкополосности при остаточной дисперсии:

$$\eta_f = \eta_d \frac{\omega_{cr} \text{RF}^2}{4\pi f_r \text{RF}} = \eta_d \sqrt{\frac{cf_r}{\pi k \delta(\text{TEC})}} \sqrt{\frac{f}{f_r}}. \quad (15)$$

Согласно выражению (15) для достижения предельного расширения полосы частот трансionoсферных каналов принципиальным является уменьшение погрешности определения ПЭС пассивным сенсором. С этой целью нами в [14] было предложено увеличить выборку ПЭС путем использования данных референционной сети глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС).

3. АЛГОРИТМЫ И СРЕДСТВА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СЕНСОРНОЙ ДИАГНОСТИКИ И ИНВЕРСНОЙ ФИЛЬТРАЦИЯ ДИСПЕРСИИ В ШИРОКОПОЛОСНЫХ ТРАНСИОНОСФЕРНЫХ РАДИОКАНАЛАХ

Для преодоления внутримодовой дисперсии в широкополосных радиоканалах систем спутниковой связи могут быть использованы пассивные радиосенсоры, базирующиеся на сигналах навигационных спутников, работающих в диапазоне частот 1100...1610 МГц. Созданные алгоритмы и программное обеспечение позволяют обрабатывать большой объем данных, трансформируемых в текущие значения ПЭС ионосферы. Эти данные являются результатом фазовых и кодовых измерений сигналов навигационных спутников. Статистическая обработка текущих значений ПЭС позволяет оценивать доверительные интервалы для средних значений (статистическую погрешность измерений). Для увеличения объема выборки (уменьшения статистической погрешности) предложено использовать спутниковые данные, полученные на референционной сети приемников, расположенных в радиусе высокой пространственной корреляции ПЭС (не более 300 км). Для анализа вариаций погрешностей в геофизическом времени (месяц, сезон и т.п.) используются их временные ряды на больших интервалах времени. Получаемые средние значения ПЭС используются для расчета коэффициентов эквалайзера для инверсной фильтрации и машинного обучения модели эквалайзера с подкреплением [15].

Структурная схема работы сети пассивных сенсоров представлена на рис. 2. Блок-схема действующего инверсного фильтра для систем широкополосной спутниковой связи с режимом машинного обучения [15] представлена на рис. 3.

В результате применения представленного здесь подхода может быть достигнута предельно возможная широкополосность для систем спутниковой связи. Исследования предельной широкополосности основаны на оценке по экспериментальным данным величины и закономерностей изменения в геофизическом времени остаточной дисперсии gdd_r (см. формулу (11)) и реализуются с применением метода картографирования [1, 16]. Такой подход позволяет, с одной стороны, оценивать в реальном времени погрешности модели инверсного фильтра, а усредненные по выборке данные использовать для машинного обучения эквалайзера с периодом упреждения, соответствующим методу прогноза параметра gdd_r .

В целом система интеллектуального пассивного сенсора с эквалайзером инверсной фильтрации для функционирования широкополосной

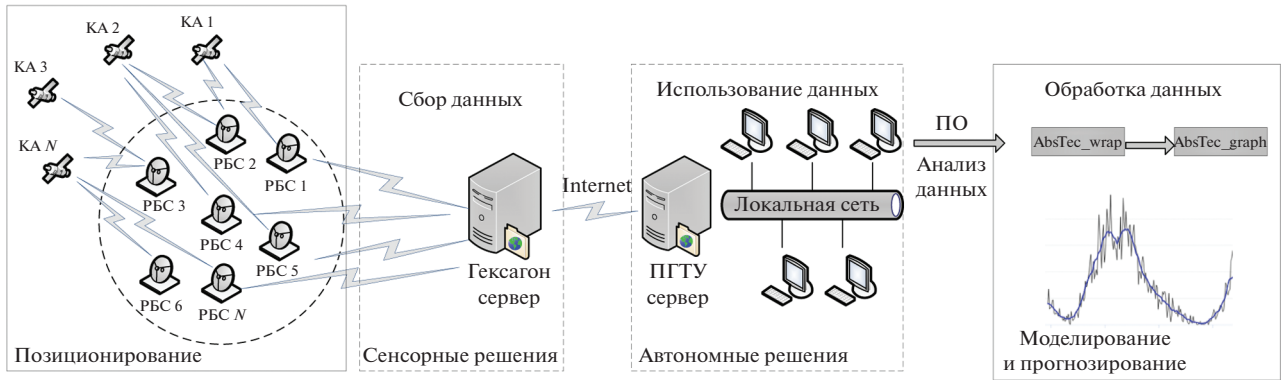


Рис. 2. Структурная схема работы пассивных трансионосферных радиосенсоров КА – космический аппарат систем ГНСС; РБС – референсная базовая станции сети; ПО – программное обеспечение.

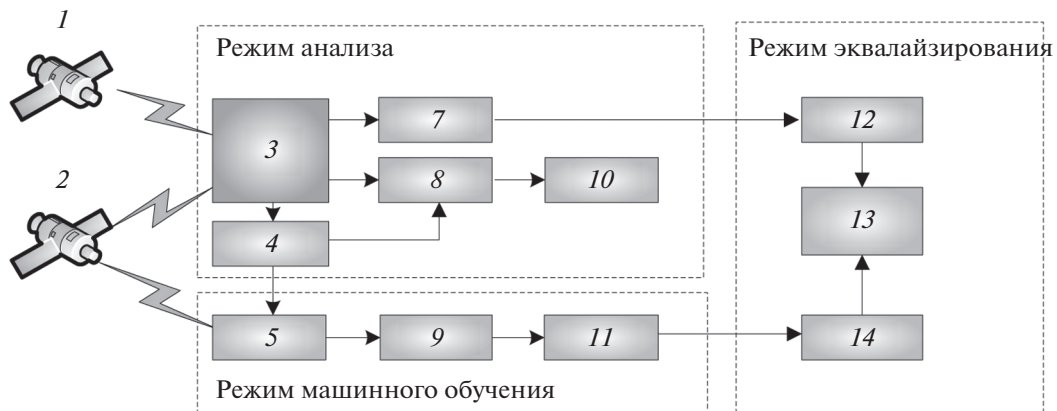


Рис. 3. Блок-схема экспериментальной установки, реализующей принцип инверсной фильтрации для преодоления дисперсионных искажений в широкополосных трансионосферных радиоканалах: 1 – космический аппарат спутниковой системы связи; 2 – глобальная навигационная спутниковая система; 3 – блок диагностики системных характеристик; 4 – блок определения периода упреждения прогноза; 5 – начало сеанса зондирования; 7 – блок формирования частотной дисперсии; 8 – блок определения предельной полосы частот; 9 – формирование предикторов; 10 – блок определения предельной широкополосности системы; 11 – блок формирования тестовой последовательности; 12 – блок формирования ЧХ; 13 – блок эквалайзирования; 14 – актуализация коэффициента инверсного фильтра.

спутниковой радиосвязи обеспечивает работу в следующих режимах:

– режим анализа – осуществляется на основе метода диагностики системных характеристик трансионосферного канала, позволяющего в результате обработки экспериментальных данных сигналов сети референчных станций ГНСС с периодом упреждения прогноза оценивать текущие параметры частотной и импульсной характеристики. Также в рамках первой задачи осуществлять адаптацию в геофизическом времени предельной полосы частот канала до максимально возможной на случай, когда внутримодовой дисперсией еще можно пренебречь;

– режим машинного обучения – актуализация коэффициентов инверсного фильтра с подкреплением модели в рамках второй задачи. Важным

моментом является прогнозирование значений предельной полосы трансионосферных радиоканалов связи с применением методов машинного обучения. Обязательной процедурой в данном случае является подготовка выборки данных ПЭС, обеспечивающая при машинном обучении систему тренировочной и тестовой выборками полосы когерентности. Для повышения точности прогнозирования используется модель, основанная на алгоритме XGBoost.

– режим эквалайзирования – реализует адаптивную компенсацию дисперсионных искажений с учетом временной и пространственной изменчивости модели. Адаптивная компенсация дисперсионных искажений волновых пакетов по результатам диагностики позволяет использовать каналы с максимально возможными полосами

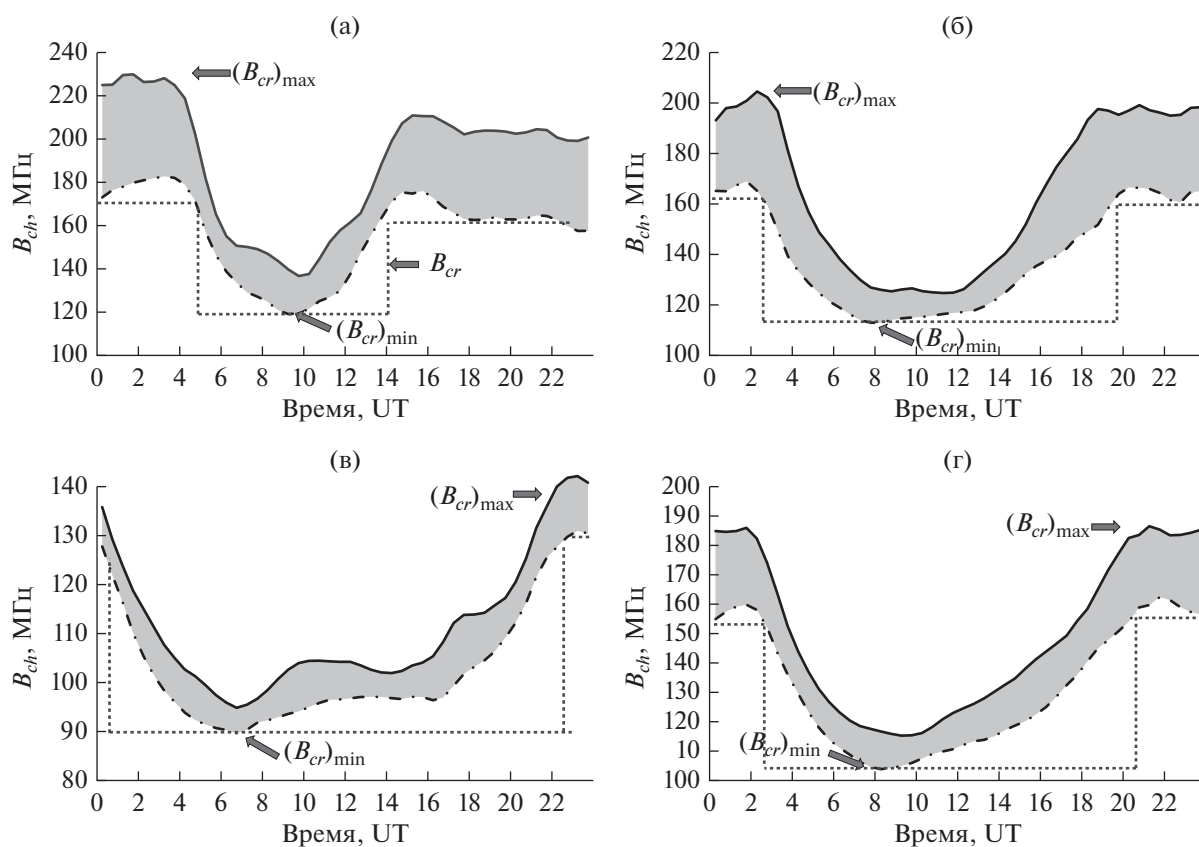


Рис. 4. Модели допустимых значений полос когерентности трансionoсферного канала, полученные в декабре (а), марте (б), июне (в) и сентябре (г).

(большими их полосы когерентности при решении первой задачи), что обеспечивает максимальную пропускную способность трансionoсферного канала спутниковой связи и низкие энергетические потери связанного широкополосного сигнала.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДХОДОВ ПРЕДЕЛЬНОГО РАСШИРЕНИЯ ПОЛОСЫ ЧАСТОТ СИСТЕМ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

Для верификации достижения поставленной цели в Поволжском государственном технологическом университете, ПГТУ (г. Йошкар-Ола) в декабре, марте, июне и сентябре 2018–2019 гг. в условиях невозмущенной среднеширотной ионосферы были проведены соответствующие эксперименты. Для обеспечения общности представленные данные относятся к трансionoсферным каналам на опорной частоте (опорным каналам).

На рис. 4 представлен суточный ход диапазонов изменения предельной полосы частот опорного трансionoсферного канала для различных сезонов года. Области серого цвета соответствует диапазону

наблюдавшихся за указанный период значений предельной полосы в течение периода наблюдения. Так, в декабре диапазон вариаций полосы составлял 120...230 МГц; в марте 115...205 МГц; в июне 90...145 МГц и в сентябре 105...185 МГц. Видно, что для всех сезонов значения полосы в дневное время меньше, чем в ночное. Пунктиром показаны значения и интервалы времени для ночных и дневных полос, когда алгоритм их выбора не является адаптивным. Дневные и ночные полосы составляют: в декабре 120 и 170 МГц, в марте 115 и 160 МГц, в июне 90 и 130 МГц, в сентябре 105 и 155 МГц. Отметим, что дневные полосы являются предельными за сутки, если в алгоритме не учитывать переходы от дня к ночи. Поэтому для всех сезонов предельная полоса не должна превышать 90 МГц, т.е. широкополосность опорного канала не должна превышать 4.5%.

Полученные результаты показывают, что в случае адаптации полосы опорного канала к вариациям ПЭС значения широкополосности могут быть увеличены сверх 4.5%. Для реализации метода в работе было предложено автоматическое управление полосой путем создания модели прогнозных значений, полученных с применением метода машинного обучения на выборке месяч-

Таблица 1. Относительные погрешности измерения коэффициента дисперсии $\delta(\text{GDD}_r)$

Период	Относительные ошибки $\delta(\text{GDD}_r)$, %		
	ночное время	переходное время	дневное время
Зима	10...15	6...10	7
Весна	9...10	2...8	3...5
Лето	5...8	3...6	2...4
Осень	5...9	5...8	6...8

Таблица 2. Предельные значения широкополосности опорных трансionoсферных каналов с применением адаптивной инверсной фильтрации

ПЭС, TECU	Предельная широкополосность каналов без инверсной фильтрации, %	Предельная широкополосность каналов с инверсной фильтрацией		
		$\delta(\text{GDD}_r)$ 5%	$\delta(\text{GDD}_r)$ 10%	$\delta(\text{GDD}_r)$ 15%
5	8	25	24	20
10	5.5	24	17	14
15	4.5	20	14	11
20	4	17	12	10
25	3.5	15	11	8.5
30	3	14	10	8

ных данных. Данный подход, позволяет увеличивать полосу до значений, показанных на рис. 4 сплошной линией. Таким образом, при адаптации предельная полоса опорного канала может достигать: в декабре 135 и 230 МГц, в марте 125 и 205 МГц, в июне 95 и 145 МГц, в сентябре 115 и 185 МГц. Поэтому адаптация позволяет получить опорные каналы с широкополосностью не хуже 11.5%.

Дальнейшие исследования были посвящены изучению влияния погрешности в экспериментальной оценке GDD на предельную полосу опорного канала. Были получены погрешности измерения GDD в зависимости от геофизических факторов. Результаты полученных измерений приведены в табл. 1.

Из представленных данных видно, что максимальные погрешности $\delta(\text{GDD}_r)$ наблюдаются в зимний период времени, 6...15%, а минимальные — летом, 2...8%. Днем ошибки примерно вдвое меньше, чем ночью. Результаты предельного расширения полосы с применением адаптивной инверсной фильтрации дисперсии представлены в табл. 2.

Видно, что применение адаптивной инверсной фильтрации позволяет получить опорные трансionoсферные каналы с широкополосностью до 20...25%, если относительные ошибки из-

мерения $\delta(\text{GDD}_r)$ не превышают 15 ... 5% соответственно.

Таким образом, каждая последующая итерация рассмотренного подхода позволяет увеличить коэффициент широкополосности опорного трансionoсферного канала почти в два раза по сравнению с предыдущей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развиты методы, модели и комплексы средств с применением технологий искусственного интеллекта, позволяющие увеличить предельную широкополосность систем спутниковой радиосвязи в условиях внутримодовой дисперсии среды. Показано, что применение адаптации и адаптивной инверсной фильтрации требует развития средств сенсорной диагностики опорного трансionoсферного канала. Поэтому для экспериментальных оценок параметров внутримодовой дисперсии групповой задержки модернизированы пассивные радиосенсоры путем реализации в их составе эквалайзера инверсной фильтрации. Для обработки сенсорных данных созданы соответствующие алгоритмы и программное обеспечение, реализующее режимы их анализа, машинного обучения и эквалайзирования.

Выполнена экспериментальная верификация предлагаемого подхода. Установлено, что без адаптации предельной полосы частот канала к из-

менчивости ПЭС удается создать опорные каналы с коэффициентом широкополосности не более 4.5%. Адаптация к изменениям ПЭС позволяет получить каналы с полосой до 11.5%. Самая большая широкополосность может быть достигнута путем адаптивной инверсной фильтрации с применением интеллектуальных методов: модели эквализации с ошибкой, метода машинного обучения и метода обработки больших данных. В этом случае достигается широкополосность до 20...25%.

Применение полученных результатов на практике позволит увеличить эффективность систем спутниковой связи в части обеспечения их дополнительной помехоустойчивости и скрытности.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-29-00622).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов Д.В., Иванов В.А., Кислицын А.А., Рябова М.И.* // Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер. Радиотех. и инфокоммуникац. системы. 2021. № 3. С. 14. <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2021.3.14>
2. *Furman W., Nieto J., Koski E.* // The 10th Nordic Conf. on HF Communications. At Fårö, 2013. P. 4.
3. *Растягаев Д.В., Палкин Е.А., Лукин Д.С. и др.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2021. Т. 64. № 8–9. С. 590.
4. *Бова Ю.И., Крюковский А.С., Кутуза Б.Г., Лукин Д.С.* // РЭ. 2019. Т. 64. № 8. С. 752.
5. *Бова Ю.И., Крюковский А.С., Лукин Д.С.* // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Т. 12. № 12. С. 22.
6. *Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В., Овчинников В.В.* // Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер. Радиотех. и инфокоммуникац. системы. 2021. № 1. С. 6. <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2021.1.6>
7. *Ivanov V.A., Ivanov D.V., Ryabova N.V. et al.* // Radio Sci. V. 54. № 1. P. 34. <https://doi.org/10.1029/2018RS006636>
8. *Ovchinnikov V.V., Ivanov D.V.* // Proc. 2020 XXXIII General Assembly and Sci. Symp. Int. Union of Radio Sci. 2020. P. 1. <https://doi.org/10.23919/URSIGASS49373.2020.9232379>
9. Federal Communications Commission. Revision of part 15 of the commission's rules regarding ultra wide-band transmission systems. First report and order. FCC 02 48. —, Washington, DC, Feb., 2002. URL: <https://www.fcc.gov/document/revisionpart-15-commissions-rules-regarding-ultra-wideband>.
10. *Ivanov D.V., Ivanov V.A., Ryabova N.V., Ovchinnikov V.V.* // Proc. 2022 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). Arkhangelsk. 29 Jun.–01 Jul. N.Y.: IEEE, 2022. Paper № 9840991. <https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO55067.2022.9840991>
11. *Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В., Овчинников В.В.* // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 11. С. 166. <https://doi.org/10.18127/j00338486-202211-23>
12. *Ivanov D.V., Ivanov V.A., Ryabova N.V. et al.* // Proc. VI Int. Conf. Kaliningrad. 2018. V. 1. P. 81.
13. *Ясюкевич Ю.В., Мыльникова А.А., Демьянов В.В. и др.* // Вестник Поволж. гос. технол. ун-та. Сер. Радиотех. и инфокоммун. системы, 2013. № 3. С. 18.
14. *Kislitsin A.A., Ryabova N.V., Konkin N.A.* // Proc. 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). Svetlogorsk. 01–03 Jul. N.Y.: IEEE, 2020. Paper № 9166091. <https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166091>
15. *Кислицын А.А.* Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер. Радиотех. и инфокоммуникац. системы. 2019. № 3. С. 6.
16. *Ivanov D.V., Ivanov V.A., Ryabova N.V. et al.* // Proc. 12th European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP 2018). London. 09–13 Apr. N.Y.: IEEE, 2018. Article No. cp.2018.0473. <https://doi.org/10.1049/cp.2018.0474>