Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 357–359.

УДК 621.396
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-357

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ МОДЕЛИ ИОНОСФЕРНОГО КВ КАНАЛА

Н.В. Рябова, А.М. Станкевич, С.С. Станкевич

Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия, StankevichSS@volgatech.net

SIMULATION OF ADAPTIVE IONOSPHERIC HF CHANNEL MODEL

N.V. Ryabova, A.M. Stankevich, S.S. Stankevich

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia, StankevichSS@volgatech.net

Аннотация. Предложена структура адаптивной широкополосной модели ионосферного КВ-канала, объединяющая статистическую модель Воглера — Хоффмайера и теоретические результаты Д.В. Иванова по негативному влиянию поляризационной дисперсии и дисперсии групповой задержки (GDD). В среде GNU Radio созданы и верифицированы два кастомных блока, учитывающих эффекты внутримодовой дисперсии. Показана возможность адаптивной настройки параметров модели по данным ионосферного зондирования. Отмечена практическая ценность работы для проектирования систем КВ-связи и дальнейшей верификации модели.

Ключевые слова: ионосферный КВ-канал, адаптивная модель, поляризационная дисперсия, GDD, модель Воглера — Хоффмайера, модель Иванова, GNU Radio, имитационное моделирование.

Abstract. The paper proposes a structure of an adaptive wideband ionospheric HF channel model that combines the Vogler–Hoffmeyer statistical model with theoretical results by D.V. Ivanov on polarization dispersion and group delay dispersion (GDD). Two custom blocks have been created and verified in the GNU Radio environment, taking into account the effects of intramode dispersion. The possibility of adaptive adjustment of model parameters based on ionospheric sounding data is shown. The practical value of the work for the design of HF communication systems and for further verification of the model is noted.

Keywords: ionospheric HF channel, adaptive model, polarization dispersion, GDD, Vogler — Hoffmeyer model, Ivanov model, GNU Radio, simulation modeling.

ВВЕДЕНИЕ

Дальняя коротковолновая связь остается востребованной в настоящее время. Решаются проблемы изменчивости среды и широкополосности систем путем развития моделей радиоканала. Известные модели (Ваттерсона, Воглера–Хоффмайера) хорошо описывают межмодовую дисперсию, но наиболее полное описание внутримодовой дисперсии дает гибридная модель Д.В. Иванова. В ней учтены два эффекта: поляризационная дисперсия (интерференция обыкновенной и необыкновенной волн) и дисперсия групповой задержки GDD. Цель работы – развитие и практическая реализация теоретических положений математических моделей внутримодовой дисперсии в среде GNU Radio, создание работающих блоков и объединение их в адаптивную структуру.

РЕАЛИЗАЦИЯ БЛОКОВ МОДЕЛИ ИВАНОВА В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ GNU RADIO

В работах [Иванов, 2006; Иванов и др., 2024] показано, что для широкополосных сигналов (полоса до 1 МГц) необходимо учитывать поляризационную дисперсию: она создает замирания амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) с глубиной до 3–4 дБ и периодом от 20 до 300 кГц. Второй эффект — дисперсия групповой задержки (GDD) — описывает ее зависимость от частоты. Согласно модели [Иванов и др., 2025], частотную характеристику канала можно представить в виде

$$H(\omega) = |H(\omega)|e^{-j\varphi(\omega)} \quad (1),$$

где $\varphi(\omega)$ — фаза. В полосе канала фазу можно разложить в ряд Тейлора вокруг средней частоты $\bar{\omega}$:

$$\varphi(\bar{\omega}+\Omega,t) \approx \varphi(\bar{\omega},t) + \varphi'(\bar{\omega},t)\Omega + \frac{1}{2}\varphi''(\bar{\omega},t)\Omega^2 = \varphi(\bar{\omega},t) + \tau_g\Omega + \frac{1}{2}GDD\cdot\Omega^2$$

$$\tau_g(\bar{\omega}+\Omega,t) \approx d\varphi(\Omega,t)/d\Omega \approx \tau_g(\bar{\omega})\cdot\Omega + GDD(\bar{\omega})\cdot\Omega^2, \quad (2)$$

где Ω— отстройка от средней частоты, $\varphi' = \tau_g$ — групповая задержка (первая производная фазы по частоте), $\varphi'' = GDD$ — коэффициент дисперсии групповой задержки (вторая производная фазы по частоте). Из-за квадратичного члена импульсный сигнал размазывается во времени. На основании этих теоретических моментов, в GNU Radio было создано два кастомных блока.

Первый блок — это БПФ-фильтр с управляемой АЧХ. ЧХ умножается на функцию, имеющую квазипериодические вариации заданной глубины и периода, затем трансформируется во временную область. Второй блок реализует GDD: он также работает через БПФ — к спектру добавляется фазовый множитель

$$exp(j\cdot GDD\cdot\frac{\Omega^2}{2}), \quad (3)$$

после чего выполняется обратное преобразование.

Оба блока были протестированы отдельно. На вход подавался ЛЧМ-сигнал. На выходе блока поляризационной дисперсии в спектре четко наблюдались замирания с заданными параметрами.

Для блока GDD при увеличении коэффициента дисперсии ожидаемо наблюдается расширение ИХ-канала. Таким образом, удалось подтвердить работоспособность каждого из блоков, учитывающих предписания модели Д.В. Иванова.

СБОРКА АДАПТИВНОЙ МОДЕЛИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ ВОГЛЕРА — ХОФФМАЙЕРА И Д.В. ИВАНОВА

В начале в GNU Radio было собрано ПО, отвечающее имитационной модели Воглера — Хоффмайера [Иванов и др., 2025], которая учитывает межмодовую дисперсию (рис. 1). Для имитации доплеровского рассеяния используется фильтрованный гауссов шум.

Далее эта схема была объединена с двумя созданными блоками (п. 1), учитывающими модель Иванова в едином конвейере обработки.

Рассматривались искажения в канале широкополосного сигнала с ЛЧМ, который имел полосу частот 200 кГц. Подключался блок модели Воглера — Хоффмайера, блок поляризационной дисперсии (рис. 2), блок GDD (рис. 3). На выходе канала были включены визуализаторы: спектроанализатор, осциллограф и диаграмма созвездия. Каждый блок можно включать или отключать, что позволяет наблюдать вклад каждого эффекта распространения широкополосного сигнала.

Важная особенность устройства — обеспечение адаптивности созданной имитационной модели. Предусмотрена возможность обновления ключевых параметров (глубина замираний АЧХ, GDD, задержка лучей) через механизм сообщений GNU Radio. В простейшем варианте это делает внешний таймер, но в перспективе на эти входы можно подавать реальные данные от сенсора наклонного ЛЧМ-зондирования разработки ПГТУ. Модель становится адаптивной — она подстраивается под текущее состояние ионосферы.

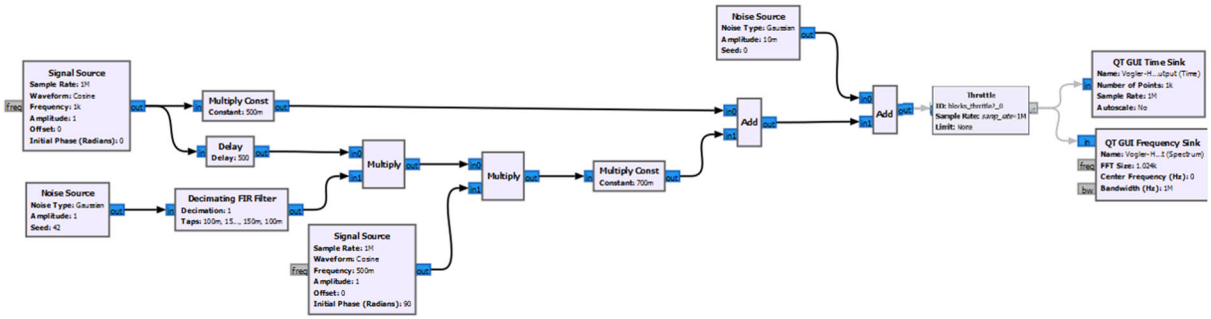

Рис. 1. Модель Воглера — Хоффмайера в GNU Radio

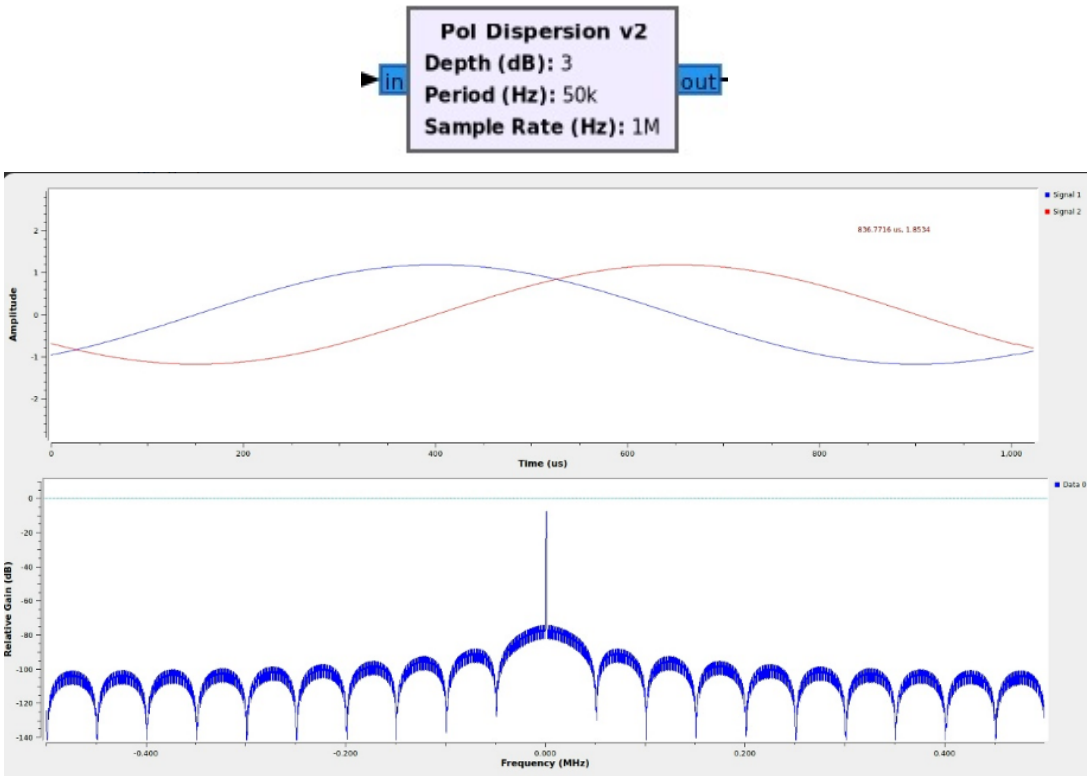

Рис. 2. Пример работы блока Поляризационной дисперсии в GNU Radio

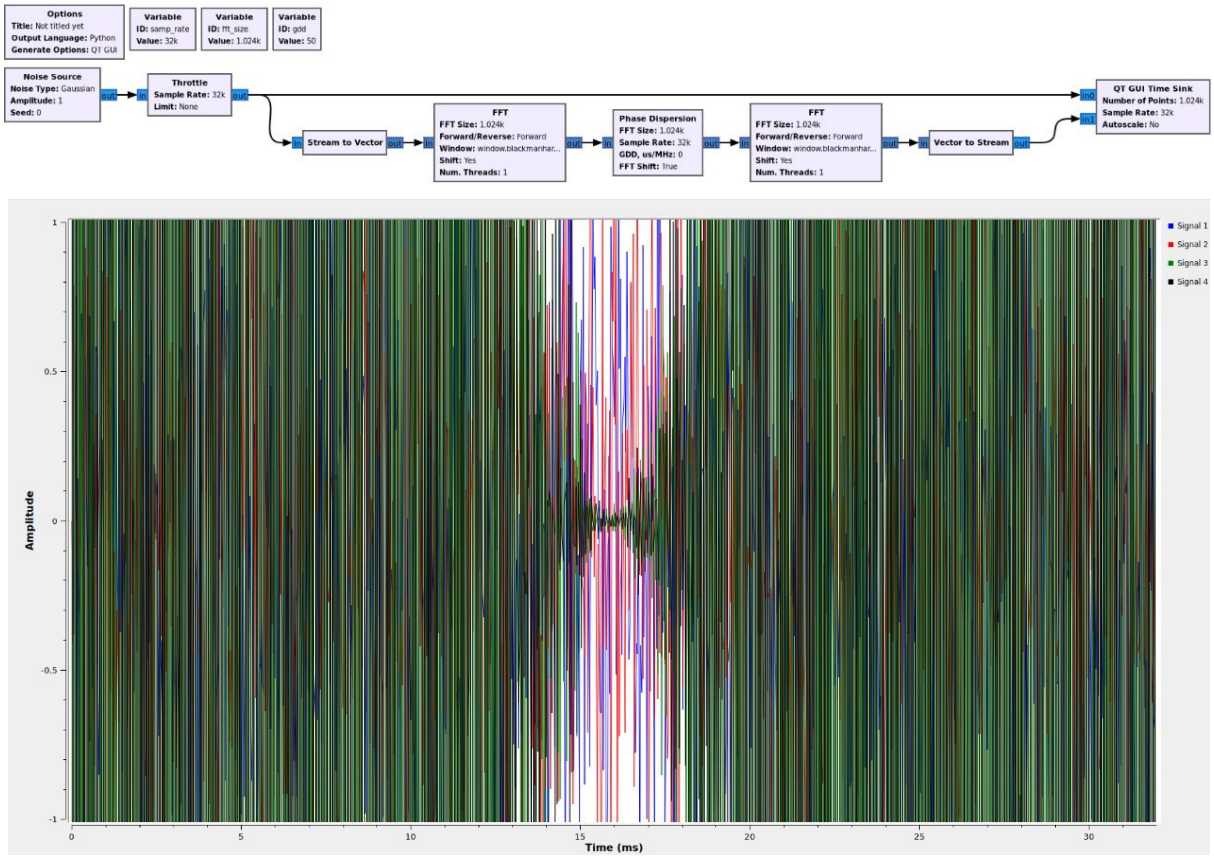

Рис. 3. Схема блока GDD и его тестирование в GNU Radio

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы в среде GNU Radio реализованы два кастомных блока, соответствующих теоретическим описаниям поляризационной дисперсии и GDD, созданным Д.В. Ивановым. Их работоспособность подтверждена отдельными тестами. На основе модели Воглера — Хоффмайера и созданных блоков, реализующих модель Иванова, предложена структура широкополосной модели ионосферного КВ-канала, учитывающей три основных эффекта: межмодовую дисперсию, поляризационную интерференцию и внутримодовую GDD. В эту структуру заложена возможность адаптивной настройки параметров по результатам диагностики КВ-радиоканалов сенсором ПГТУ.

Практическая ценность работы состоит в том, что теоретические результаты модели Иванова воплощены в работающих программных модулях. Они могут быть использованы при проектировании КВ-радиолиний, для отработки алгоритмов коррекции дисперсионных искажений. Дальнейшее развитие — подключение модели к реальным данным сенсорной диагностики для верификации.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 26-19-00555.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Иванов Д.В. Методы и математические модели исследования распространения в ионосфере сложных декаметровых сигналов и коррекции их дисперсионных искажений: Монография. ЙошкарОла: Марийский государственный технический университ, 2006. 148 с.

Рябова Н.В., Бастракова М.И., Павлов В.В. и др. Имитационное моделирование ионосферных КВ-радиоканалов. Ч. 1. Физические и канальные модели // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2025. № 2 (66). С. 21–40. DOI: https://doi.org/10.25686/2306- 2819.2025.2.21; EDN: MOQYES.

Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова М.И. и др. Эффекты дисперсии в ионосферных радиоканалах. Ч. 2. Виды частотно-временнóй дисперсии // Радиотехника. 2024. Т. 88, № 11. С. 63–77. DOI: 10.18127/j00338486-202411-10; EDN EYXDDB.

Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова М.И. и др. Эффекты дисперсии в ионосферных радиоканалах. Ч. 3. Внутримодовая дисперсия и технология широкополосной КВ-связи // Радиотехника. 2025. Т. 89, № 1. С. 24–36. DOI: 10.18127/j00338486-202501-02; EDN: JAAYKT.

Gherm V.E., Zernov N.N., Lundborg B. et al.Wideband scattering functions for HF ionospheric propagation channels // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2001. V. 63, N. 14. P. 1489–1497. DOI: 10.1016/S1364-6826(01)00037-2; EDN QEJXIF.