

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАНАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ФКМ СИГНАЛА ДЛЯ ИОНОСФЕРНЫХ КВ РАДИОЛИНИЙ

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

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

## INFLUENCE OF CHANNEL MODEL PARAMETERS ON THE CHARACTERISTICS OF THE PCM SIGNAL FOR IONOSPHERIC HF RADIO LINKS

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

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

**Аннотация.** Разработан и программно-аппаратно реализован алгоритм оценки влияния параметров канальной модели на характеристики сложного сигнала с фазо-кодовой манипуляцией для ионосферных КВ радиолоний. Имитация радиоканала осуществлялась с использованием модели Ватерсона на устройстве имитатора ВИРД.464971.001 РЭ. Для синтеза излучаемого сигнала и обработки принятого сигнала созданы алгоритмы, реализованные в программной среде GNU Radio. Получены оценки искажений характеристик сложного сигнала на примере ФКМ в зависимости от параметров канальной модели Ватерсона.

**Ключевые слова:** КВ радиоканал, модель Ватерсона, фазо-кодо манипулированный сигнал, код Баркера, корреляционная функция.

**Abstract.** An algorithm for estimating the influence of channel model parameters on the characteristics of a complex signal with phase-code manipulation for ionospheric SW radio lines was developed and implemented in hardware and software. The simulation of the radio channel was carried out using the Watterson model on the device of the VIRД.464971.001 RE simulator. Algorithms implemented in the GNU Radio software environment have been created to synthesize the emitted signal and process the received signal. Estimates of distortions of the characteristics of a complex signal are obtained using the example of phase CM depending on the parameters of the Watterson channel model.

**Keywords:** SW radio channel, Watterson model, phase-code-manipulated pulse, Barker code, similar function

### ВВЕДЕНИЕ

Распространение коротких радиоволн (КВ) характеризуется набором связанных между собой явлений, обусловленных высокой изменчивостью среды распространения — ионосферой. Эта изменчивость должна учитываться разработчиками эффективных высокоскоростных цифровых систем КВ связи [Иванов и др., 2017]. Способность качественной оценки инженерных решений создаваемых радиосредств в реальных каналах связи на этапе проектирования является необходимым для сокращения цикла разработки [Ivanov et al, 2016]. Факторы, влияющие на распространение сигналов в КВ радиоканалах могут быть описаны с помощью различных моделей, одной из которых является модель Ватерсона. По сравнению с другими, она достаточно проста и широко используется в имитаторах. Для проведения имитационного моделирования необходимо создать искусственную тестовую среду распространения КВ радиоволн в ионосфере, которая может воспроизводить реальные условия. Ключевым этапом разработки эффективных сигнально-кодовых конструкций и протоколов для высокоскоростных цифровых систем связи КВ диапазона является определение степени влияния ионосферы на характеристики радиоканала.

**Цель:** разработка, программно-аппаратная реализация и верификация алгоритма оценки влияния параметров канальной модели на характеристики сложного сигнала на примере ФКМ для КВ радиолоний.

Алгоритм оценки влияния параметров канальной модели Ватерсона на характеристики сложного сигнала для КВ радиолоний состоит из 3-х основных этапов.

На 1-м этапе производится синтез сложного входного сигнала на примере фазо-кодо-

манипулированного (ФКМ) сигнала. ФКМ сигнал представляет собой импульс, манипулируемый кодом Баркера длиной 13. Для 2-х позиционной фазовой манипуляции 0 и 180 градусов амплитуда модулирующего сигнала принимает значения +1 и -1. Импульсы длительностью 541,7 мкс, состоящие из 13 чипов (битов), длительностью 41,7 мкс периодически повторяются через 5,3 мс. Синтезированный ФКМ сигнал записывается в файл в формате .wav.

На 2-м этапе алгоритма производится имитация прохождения сигнала через КВ канал по модели Ватерсона.

На 3-м этапе сигнал с выхода имитатора подается на вход приемника. В приемнике происходит сжатие ФКМ импульса при вычислении корреляции принятого сигнала с известным передаваемым импульсом. В цифровом виде процесс корреляции может быть выполнен с использованием БПФ. Данная операция является быстрой сверточной обработкой (FCP — Fast Convolution Processing). Выходной сигнал согласованного фильтра может быть математически описан сверткой между его входным сигналом и импульсной характеристикой  $y(t) = s(t) \cdot h(t)$ , где  $s(t)$  — входной сигнал,  $h(t)$  — импульсный отклик согласованного фильтра. Из свойств преобразования Фурье  $FFT\{s(t) \cdot h(t)\} = S(f) \cdot H(f)$ . Тогда сжатый дискретный сигнал можно вычислить  $y = IFFT\{S \cdot H\}$ , где  $IFFT$  — обратное БПФ.

**1. Синтез сложного ФКМ сигнала в программной среде GNU Radio.** Для реализации 1-го этапа алгоритма моделирования в программной среде GNU Radio был синтезирован и сохранен в

формате .wav файл ФКМ импульса, который затем использовался как входной сигнал имитатора КВ радиоканала. Исходные данные: последовательность Баркера длиной 13 чипов, длительность чипа 83,3 мкс, период 10,6 мс. Параметры .wav файла: частота дискретизации 48 кГц, разрядность 16 бит, моно. На рис. 1 представлена схема синтеза ФКМ импульса, созданная в программной среде GNU Radio.

**2. Моделирование влияния канальных параметров на сложный ФКМ сигнал на базе имитатора, реализованного по модели Ватерсона.** Имитация радиоканала осуществлялась согласно модели Ватерсона с использованием устройства имитатора ВИРД.464971.001 РЭ. Синтезированный ФКМ сигнал в виде .wav файла подавался на вход имитатора КВ сигналов. В данном исследовании модель Ватерсона была реализована для различных условий прохождения сигналов, причем параметры каналов задавались в соответствие с их классификацией CCIR Recommendation 520-2 [CCIR Recommendation 520-2] (табл.1). В имитаторе Ватерсона существует возможность задания следующих параметров каналов: число лучей (от 1 до 4); уровни лучей (амплитуды) (от 0 до 10); относительные задержки лучей (от 0 до 15 мс); фазовый сдвиг первого луча (от -5 до 5 рад); доплеровское смещение частоты сигнала каждого луча (от -2500 до 2500 Гц); доплеровское рассеяние частоты сигнала каждого луча (от 0 до 30 Гц); коэффициенты отношения зеркальных составляющих лучей к рассеянным (от 0 до 10); коэффициенты асимметрии лучей (от 0 до 10). Были исследованы искажения сложного ФКМ сигнала при трех разных состояниях канала: «хорошем», «удовлетворительном» и плохом, их параметры приведены в таблице 1.

На рис. 2 представлена визуализация с устройства имитатора каналов: осциллограммы входного сигнала, спектра входного сигнала, осциллограммы выходного сигнала, спектра выходного сигнала и АЧХ канала, импульсной характеристики канала.

Сигнал после имитатора, записывался в .wav-файл с такими же параметрами для последующего

анализа в программе GNU Radio, реализующей алгоритм сжатия сложного ФКМ сигнала.

**3. Алгоритм и его реализация в программной среде GNU Radio сжатия искаженного сложного ФКМ сигнала.** Разработан алгоритм и реализующая его схема в программной среде GNU Radio сжатия прошедшего КВ радиоканал сложного ФКМ сигнала (рис.3).

Влияние канальных искажений на импульсы кода определяется на основе его функции автокорреляции, поскольку в отсутствие шума выходной сигнал согласованного фильтра пропорционален автокорреляции кода [Иванов и др.,2013]. Учитывая функцию автокорреляции определенного кода, ширина главного лепестка (ширина сжатого импульса) и уровни боковых лепестков являются двумя факторами, которые необходимо учитывать для оценки характеристик сжатия импульсов кода. В случае двоичных фазовых кодов относительно длинный импульс шириной  $t'$  делится на  $N$  меньших чипов; каждый имеет ширину  $\Delta t = t'/N$  [Mark Richards, 2005].

**4. Верификация разработанного алгоритма и оценка влияния параметров канальной модели на искажение характеристик сложного ФКМ сигнала.** Получены графики исходного импульса и корреляционных функций на выходе системы сжатия в приемнике при различных условиях прохождения сигнала в каналах имитатора. Исходный импульс и его корреляционная функция показывают идеальный канал без искажений. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что в зависимости от состояния радиоканала, которое задается его параметрами, происходит искажение принятого сигнала. В результате чего изменяется его корреляционная функция по сравнению с исходной. В «хорошем» канале многолучевость практически не проявляется и рассеяние по задержке минимально. В удовлетворительном и плохом канале наблюдается 2-х лучевое распространение сигнала. Отношение главного лепестка корреляционной функции к боковым у исходного сигнала равно 13,

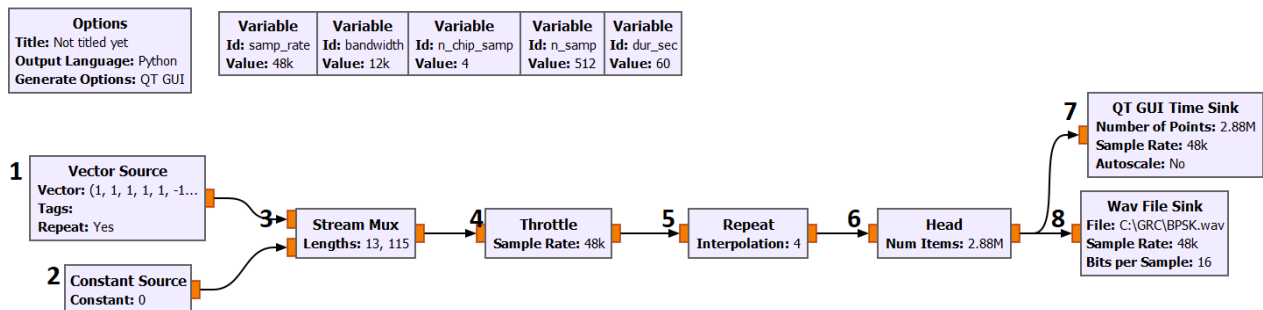


Рис. 1. Алгоритм и реализующая его схема синтеза ФКМ сигнала в программной среде GNU Radio

Таблица 1.

Задание параметров КВ каналов в имитаторе в соответствии с CCIR Recommendation 520-2

Настройки канала	хороший канал		удовлетворительный канал		плохой канал	
	1-й луч	2-й луч	1-й луч	2-й луч	1-й луч	2-й луч
Уровень	1	1	1	1	1	1
Допл.рассеяние, Гц	0,1	0,1	0,5	0,5	0,5	0,5
Фаз.сдвиг, рад	0	задержка 0,5 мс	0	задержка 1 мс	0	задержка 1 мс
Зеркал./рассеян.	0	0	0	0	0	0
Козф.ассим.	1	1	1	1	1	1



Рис. 2. Осциллограммы устройства имитатора КВ каналов для 4-х каналов

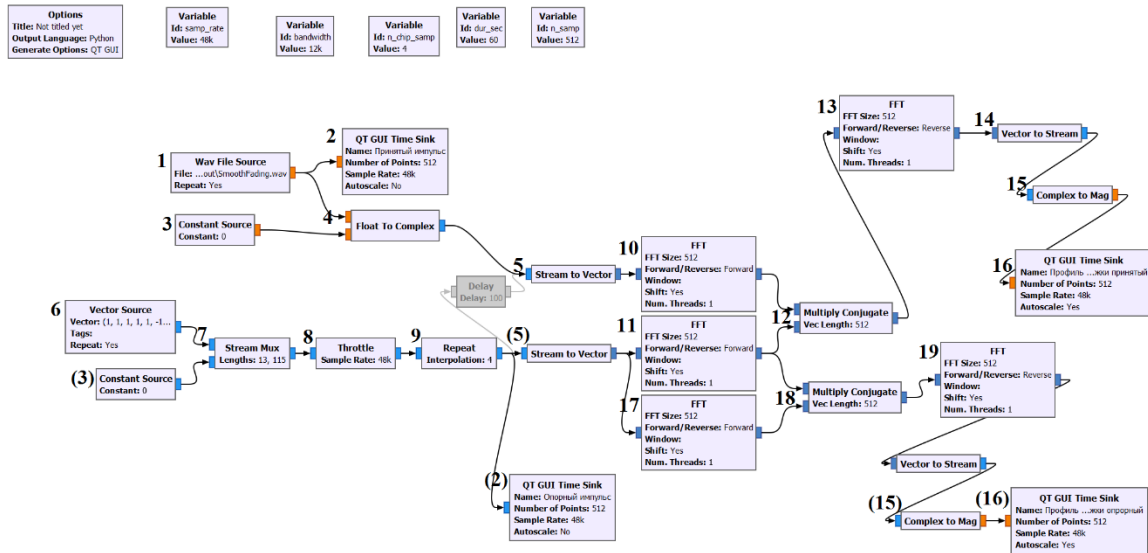


Рис. 3. Схема в программной среде GNU Radio сжатия прошедшего КВ радиоканала ФКМ сигнала

что соответствует длине кода Баркера. У хорошего канала отношение главного лепестка корреляционной функции к боковым  $\sim 8$ ; у удовлетворительного  $\sim 7$ ; у плохого  $\sim 5,1$ .

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Разработан и программно-аппаратно реализован алгоритм оценки влияния параметров канальной

модели на характеристики сложного сигнала для ионосферных КВ радиолоний. Имитация радиоканала выполнена с использованием модели Ватерсона на устройстве имитатора ВИРД.464971.001 РЭ. Для синтеза излучаемого сложного сигнала и обработки принятого сигнала разработаны алгоритмы, реализованные в программной среде GNU Radio. Получены оценки искажений характеристик сложного сигнала

на примере ФКМ в зависимости от параметров канальной модели Ватерсона.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда, проект № 23-19-00145.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

Иванов Д.В., Иванов В.А., Елсуков А.А. и др. ФКМ ионозонд, созданный по технологии SDR с применением универсальной аппаратной платформы. // Радиолокация, навигация, связь: XXIII Международная научно-техническая конференция, Т. 2., Воронеж, 18–20 апреля 2017 г., Воронеж, 2017. С. 567–574.

Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В. и др. SDR-ионозонд с непрерывным ЛЧМ-сигналом на платформе USRP // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2013. № 3. С. 80–94.

Ivanov D.V., Ivanov V.A., Ryabova N.V., Elsukov A.A. Software-defined radio technology in the problem concerning with the successive sounding of HF ionospheric communication channels // Journal of Communications Technology and Electronics. 2016. V. 61, № 7. P. 767–775.

Mark Richards, Fundamentals of Radar Signal Processing, McGraw Hill, 2005. 528 p.

CCIR Recommendation 520-2. Use of High Frequency Ionospheric Channel Simulators.