

Увеличение помехоустойчивости декаметрового радиоканала в системах дальнемагистральной радиосвязи

А. И. Рыбаков

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

lexeus.r1@gmail.com

Аннотация. В контексте нашего исследования объектом выступают современные отечественные системы декаметровой радиосвязи (ДКМ). Мы сосредотачиваем внимание на этих системах с целью выявления узких мест, а также возможностей для улучшения показателей качества передачи информации. Данная работа направлена на анализ актуальных вопросов, связанных с эффективностью существующих решений в области ДКМ радиосвязи. Предметом нашего исследования являются модели и методы функционирования радиолиний систем ДКМ радиосвязи. Такой подход позволит глубже осветить вопросы взаимодействия различных факторов, влияющих на помехоустойчивость систем радиосвязи. Среди факторов, которые мы намерены исследовать, находятся характерная частота сигналов, влияние ионосферных условий, а также особенности реализации алгоритмов обработки сигналов. Основной вывод, полученный в результате анализа результатов моделирования радиолинии, указывает на то, что увеличение длины преамбулы в системах ДКМ значительно способствует повышению помехоустойчивости дальнемагистральной связи. Данный феномен открывает новые перспективы для улучшения характеристик существующих систем в условиях изменчивой ионосферы, где стабильность и надежность связи подвергаются серьезным испытаниям. Перспективы нашего исследования представляют собой актуальную задачу в области дальнемагистральной декаметровой радиосвязи.

Ключевые слова: дальнемагистральная система связи, отношение сигнал/шум, помехоустойчивость, декаметровая радиосвязь, эквалайзер, преамбула, адаптивные фильтры

1. АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе осуществляется исследование конфигурации эквалайзера для декаметровых (ДКМ) радиолиний, направленное на повышение его помехоустойчивости. Примененные методы обеспечивают научно обоснованный подход к настройке эквалайзера, что содействует оптимизации характеристик системы. Имитационное моделирование в среде MatLab предоставляет возможность тестирования различных вариантов конфигурации эквалайзера в условиях рэлеевского канала, что подтверждает правильность сделанных выборов.

Имитационное моделирование в среде MatLab стандарта MIL-STD-188-110D, в разделе D, представлены четырнадцать форм сигналов для применения в линиях связи, каждая из которых поддерживает различные скорости передачи данных и

полосы пропускания. В частности, форма сигнала 0 предназначена для надежной работы в сложных условиях, часто встречающихся в рамках ДКМ радиолиний, и использует коды Уолша для временного распространения сигнала, формируя тем самым с расширенным спектром прямой последовательности (DSSS) [1] и обеспечивая скорость передачи данных от 75 до 1200 бит/с в диапазоне полосы пропускания от 3 до 48 кГц. Данный сигнал обозначается как сигнал Уолша. Стандарт MIL-STD-188-110D включает двенадцать форм сигналов, среди которых waveform 0 был специально разработан с использованием Walsh direct sequence spectrum (Walsh DSS) для функционирования в условиях тяжелых радиоканалами ДКМ. Одним из распространенных подходов к созданию надежных форм сигналов является временное распределение энергии сигнала с целью повышения его избыточности. Этот метод приводит к формированию сигнала DSSS, что позволяет приемнику эффективно различать многолучевые компоненты и минимизировать межсимвольные помехи в условиях частотно-селективных каналов [2]. Технологии с расширенным спектром также обеспечивают возможность работы при значительно меньших затратах. Дополнительные методы, такие как расширенный спектр с несколькими несущими на основе фильтров [3], и разбивка последовательностей, учитывающих доплеровскую устойчивость [4], также вызывают растущий интерес в последние годы. Тем не менее, конструкция приемника для сигнала 0 в основном остается традиционной, как в случае классического приемника Rake [5], который демонстрирует низкую эффективность в устранении межсимвольных помех (ISI). В последние годы появился целый ряд усовершенствованных алгоритмов для каналов с двойной избирательностью затухания, включая рекурсивный алгоритм наименьших квадратов (RLS) [6] и алгоритм приближительного передачи сообщений (AMP) [7] для оценки канала (CE), а также алгоритм сообщения [8] и ортогональный алгоритм AMP (OAMP) [9] для выравнивания.

При поиске оптимальных алгоритмов обработки сигналов необходимо опираться на определенные статистические модели сигналов и шумов. Чаще всего в формировании таких моделей используются концепции линейности, стационарности и нормальности (гауссовости). Однако указанные принципы не всегда выполняются в реальных условиях, что может значительно влиять на качество приема сигнала. Адаптивные фильтры предоставляют возможность системам автоматически подстраиваться под

статистические параметры входного сигнала, не требуя предварительного задания каких-либо моделей.

II. СТРУКТУРА ЭКВАЛАЙЗЕРА

Эквалайзер функционирует как цифровой адаптивный фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ), коэффициенты которого настраиваются с использованием субоптимального алгоритма, направленного на компенсацию фазовых искажений принимаемого радиосигнала. Структура эквалайзера может принимать как линейную, так и нелинейную форму. Линейный эквалайзер представляет собой КИХ-фильтр, функционирующий как линия задержки с отводами, которая сохраняет отсчеты принятого сигнала, поступающие с каждым новым тактом работы системы. В каждом такте эквалайзер вычисляет взвешенную сумму значений, полученных от линии задержки, и обновляет эти значения к следующему такту [10]. Линейный эквалайзер способен снижать межсимвольную интерференцию, однако только при ненулевом значении импульсной характеристики ДКМ радиоканала. В случае нулевого значения эквалайзер, напротив, будет усиливать шум. Нелинейный эквалайзер с обратной связью представляет собой аналогичную линию задержки, аналогичную линейному эквалайзеру, к которой добавляется дополнительная линия задержки для обратной связи [10]. Благодаря обратной связи такой эквалайзер эффективно снижает уровень межсимвольной интерференции в частотно-селективных каналах радиосвязи, в то время как при нулевой импульсной характеристике канала шум не усиливается. На рис. 1 представлен эквалайзер с обратной связью [10].

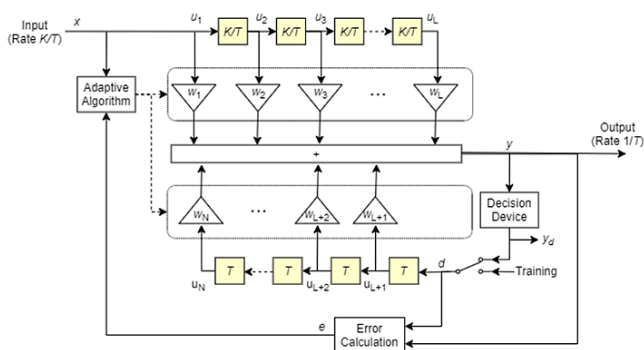


Рис. 1. Структура нелинейного эквалайзера с обратной связью

III. АЛГОРИТМЫ РАБОТЫ ЭКВАЛАЙЗЕРА. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для линейной и нелинейной структур эквалайзеров применимы разные алгоритмы, в соответствии с которыми производится установка весовых коэффициентов [11].

Устанавливаемые весовые коэффициенты зависят от:

- значения весовых коэффициентов на предыдущем периоде;
- сигнала на входе;
- сигнала на выходе;
- эталонного сигнала.

Наиболее эффективным, с точки зрения применения в каналах ионосферной радиосвязи, является алгоритм RLS DFE [12] (рекурсивный алгоритм наименьших квадратов с обратной связью), он же будет фигурировать в дальнейшем исследовании. Исследование производительности эквалайзера производилось на базе программной среды моделирования Matlab Simulink.

Численными показателями производительности эквалайзера является расчетное количество битовых ошибок (далее – BER) [13]. Переменными значениями, которыми устанавливаются параметры эквалайзера, являются:

- длина линии задержки в прямом направлении (Forward Taps);
- длина линии задержки в обратной связи (Feedback Taps);
- количество отводов линии задержки (Reference Taps);
- коэффициент обновления взвешенной суммы значений линии задержки (Forgetting Factor) [14].

Исследование производится для информационной скорости 600 бит/с с модуляцией BPSK для Рэлеевского двухлучевого радиоканала с разницей хода лучей 5×10^{-4} с. Длины преамбулы – 50, 70 и 100 бит.

Значение длины линии задержки в обратной связи (Feedback Taps) влияет только на компенсацию межсимвольной интерференции и для первичного исследования производится поиск оптимальной длины линии задержки в прямом направлении (Forward Taps), поскольку именно Forward Taps определяет возможность компенсации фазовых искажений. Значение Feedback Taps устанавливается равным 1.

Результат расчета показывает, что наименьшее количество ошибок, для всех длин преамбулы, находится при значении Forward Taps равным 10. Изменение значения Feedback Taps на значение более 10 не несет изменений на значении 11, при значении 12 и более эквалайзер перестает корректно восстанавливать сигнал (декодирование невозможно) [14].

IV. ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ НАСТРОЕК ЭКВАЛАЙЗЕРА

Моделирование с модуляцией BPSK производился для эквалайзера со следующими параметрами:

- Forward Taps = 10;
- Feedback Taps = 1;
- Reference Taps = 10.

Информационная скорость: 600 бит/с. Разница хода лучей Рэлеевского двухлучевого радиоканала – 5×10^{-4} с.

Сформированный сигнал с преамбулой 50 бит, модуляцией BPSK, информационной скоростью 600 бит/с и технической скоростью 1800 бит/с.

На рис. 2 представлена зависимость BER от отношения сигнал/шум (далее – ОСШ), при длинах преамбулы от 10 до 100 бит.

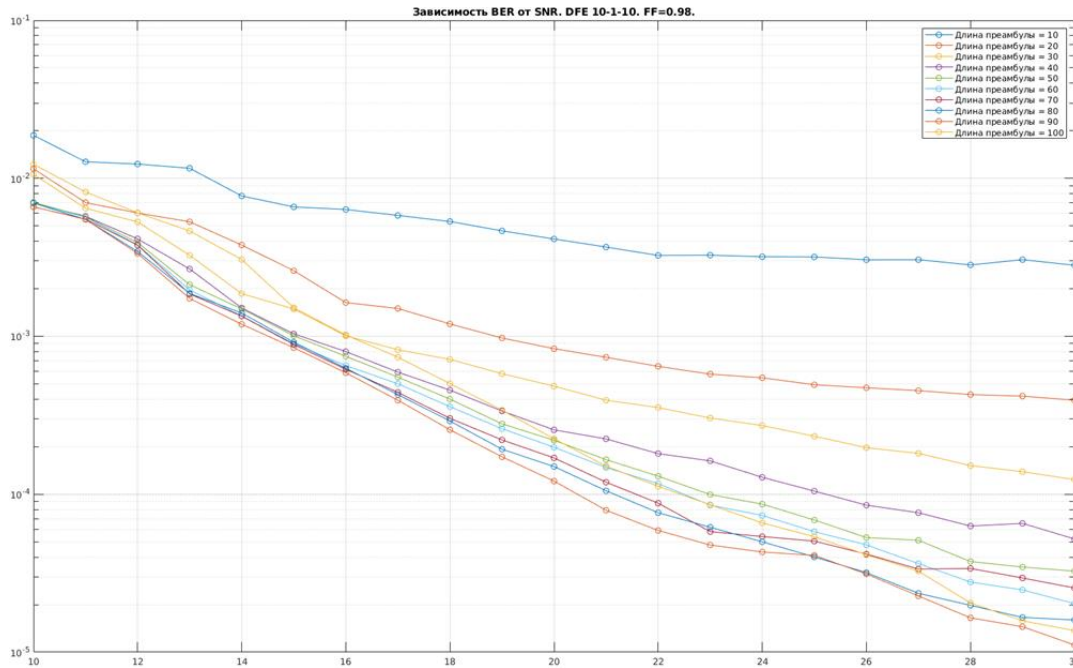


Рис. 2. Зависимость BER от ОСШ для длины преамбулы от 10 до 100 бит (модуляция BPSK)

На рис. 2 видно, что при использовании преамбулы длиной от 10 бит BER хуже значения 10^{-3} и не удовлетворяет минимальным требованиям качества цифровой связи [15], [16], при котором BER должен быть не хуже 10^{-3} . Начиная с длины преамбулы 20 бит, качество связи начинает быть приемлемым, но с ОСШ 19 дБ. В диапазоне длины преамбулы от 50 до 100 бит достижение уровня BER 10^{-3} происходит в диапазоне ОСШ от 13,5 до 15 дБ. Из чего можно сделать вывод, что для заданных условий распространения радиосигнала и скорости передачи данных, наиболее оптимальная

длина преамбулы равна 50 бит. Повышение длины линии задержки в обратной связи постепенно ухудшает производительность эквалайзера (повышается количество ошибок), вследствие чего оптимальная длина линии задержки в обратной связи целесообразно определить в условиях реального радиоканала. Моделирование с модуляцией QPSK производилось для таких же настроек эквалайзера и параметров ДКМ радиолинии, что и для BPSK [17], [18]. На рис. 3 представлена зависимость BER от ОСШ, при длинах преамбулы от 10 до 100 бит.

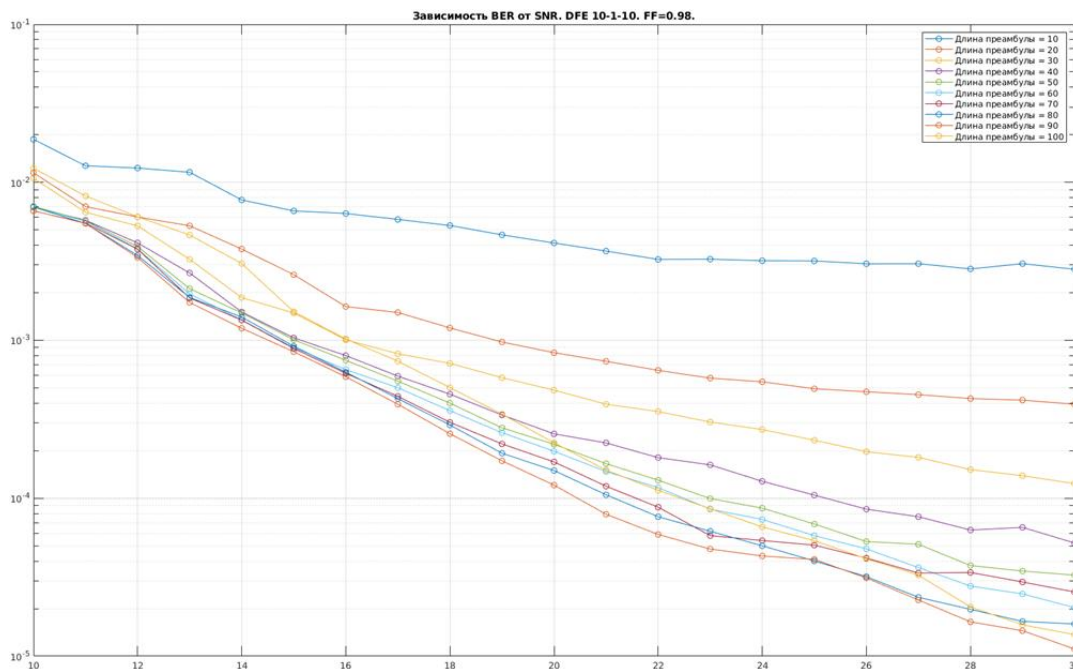


Рис. 3. Зависимость BER от ОСШ для длины преамбулы от 10 до 100 бит (модуляция QPSK)

На рис. 3 видно, что для наиболее эффективной работы (удовлетворяющей BER не хуже 10^{-3}) эквалайзера требуется длина преамбулы 120 бит,

дальнейшее увеличение длины преамбулы до 150 бит не несет значительного повышения производительности. При такой длине преамбулы уровень BER равный 10^{-3}

достигается при ОСШ равной 18,5 дБ. В соответствии с заданными условиями распространения радиосигнала и скоростью передачи данных, оптимальная длина преамбулы равняется 50 бит для модуляции BPSK и 150 бит для модуляции QPSK. Увеличение длины линии задержки в цепи обратной связи постепенно приводит к деградации производительности эквалайзера, что выражается в увеличении числа ошибок. В связи с этим целесообразно определять оптимальную длину линии задержки в условиях реального радиоканала [19], [20].

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальная апробация модели ДКМ радиолинии включает анализ различных длин преамбул, а оценка отношения сигнал/шум (ОСШ) на входе приемника помогает адаптировать длину преамбулы в зависимости от фоновых шумов. Результаты демонстрируют, что увеличение длины преамбулы положительно сказывается на помехоустойчивых качествах системы. Исследование сосредоточено на моделях и методах функционирования радиолиний ДКМ, а полученные результаты имеют практическое значение для оптимизации существующих систем радиосвязи в условиях изменяющейся ионосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Воробьев О.В., Рыбаков А.И. Вариант реализации двунаправленной связи в смс (системе метеорной связи). Описание программно-аппаратного комплекса смс // материалы VII Международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфокоммуникаций в науке и образовании». 2017. С. 128.
- [2] Воробьев О.В., Рыбаков А.И. Разработка мобильной системы информационного обеспечения с использованием каналов метеорной связи // материалы VI Международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфокоммуникаций в науке и образовании». 2016. С. 177.
- [3] Грудинская Г.П. Распространение радиоволн: монография. М.: Высшая школа, 1975. 280 с.
- [4] Зюко А.Г., Фалько А.И., Панфилов И.П. [и др.]. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации. Москва: Радио и связь, 1985.
- [5] Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Коржик В.И., Назаров М.В. Теория электрической связи: Учеб. для вузов. / Под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 1999. 432 с.
- [6] Кларк Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи. М.: Мир, 1987.
- [7] Блейхут Р.Э. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки. М.: Мир, 1986.
- [8] Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. М.: Техносфера, 2005.
- [9] Попов Н.А., Пятаков А.И. Расчет территориального распределения уровней сигнала на многоскачковых радиотрассах от КВ передатчика средней мощности с антенной «Ромб» // Автоматизация процессов управления. 2009. № 1 (15).
- [10] Прокис Дж. Цифровая связь. М.: Радио и связь, 2000.
- [11] Сидоренко А.А. Адаптивное помехоустойчивое кодирование // Материалы X международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации». Владимир Суздаль, 2013. Т. 1. С. 152-154.
- [12] Самойлов А.Г., Сидоренко А.А. Применение кодов РС в каскаде с двоичными кодами с целью повышения эффективности борьбы с независимыми ошибками // Проектирование и технология электронных средств. 2014. № 3. С. 2-7.
- [13] Сидоренко А.А. Адаптивное помехоустойчивое кодирование // Материалы X международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации». Владимир Суздаль, 2013. Т. 1. С. 152-154.
- [14] Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра. М.: Радио и связь, 2001.
- [15] Черный Ф.Б. Распространение радиоволн: монография. М.: Сов. Радио, 1972. 464 с.
- [16] Ахметьянов К.К., Глушков В.А., Дормидонтов А.В., Нестеренко А.Г. Теория электрической связи / под общ. ред. Васильева К.К. Ульяновск: УлГТУ, 2008. 382 с.
- [17] Hunt B.T., Haab D.B., Sego T.C., Holschuh T.V., Moradi Hunt H. Examining the Performance of MIL-STD-188-110D Waveform 0 Against FBMC-SS Over Skywave HF Channels // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2022. Vol. 71, No. 11.
- [18] Zhang Z., Jin Z., Li Y., Song G., Wang Y. Multi-Stage Receiver of MIL-STD-188-110D Waveform 0 for High-Frequency Communication // IEEE Communications Letters. 2024. Vol. 28, No. 5.
- [19] MIL-STD-188-110D – Interoperability and Performance Standards for Data Modems. 27 APRIL 2000.
- [20] Мартышевская Д.А., Полушин П.А. Моделирование сверточного метода обработки сигналов при межсимвольной интерференции // XXI МНК студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии»: Сб. докладов. Томск: ТПУ, 2015. С. 437.