

На правах рукописи



АДИЕВ Тимур Ильдарович

**ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ В СИСТЕМАХ
С ОРТОГОНАЛЬНЫМ ЧАСТОТНЫМ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ
(НА ПРИМЕРЕ PLC-СИСТЕМ)**

**Специальность:
05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Уфа – 2015

Работа выполнена на кафедре телекоммуникационных систем ФГБОУ ВПО
«Уфимский государственный авиационный технический университет»

Научный руководитель: кандидат техн. наук, доцент
Тлявлин Анвар Зуфарович
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный
авиационный технический университет»

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, с.н.с.
Коровин Валерий Михайлович
ОАО «Башнефтегеофизика»,
главный геофизик

канд. техн. наук
Конюхова Валентина Михайловна
Елабужский филиал ФГБОУ ВПО
«Казанский национальный
исследовательский технологический
университет им. А.Н. Туполева», доцент
кафедры Информационных технологий

Ведущая организация: **ФГБОУ ВПО «Башкирский
государственный университет»,
г. Уфа**

Защита диссертации состоится 15 мая 2015 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д-212.288.07 на базе ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» по адресу: 450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» и на сайте www.ugatu.su.

Автореферат разослан «__» _____ 2015 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р. техн. наук, доцент



И.Л. Виноградова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

В течение последнего десятилетия высокими темпами развиваются высокоскоростные технологии, растет предложение и увеличивается спрос на услуги цифрового широкополосного доступа. Потребность бизнеса и населения в телекоммуникационных услугах растет из года в год, и в настоящее время наблюдается тенденция к дальнейшему увеличению числа пользователей данных услуг. А значит, существует и необходимость в создании и развитии новых сравнительно недорогих телекоммуникационных сетей. В последнее время большой интерес вызывает возможность повышения эффективности использования существующих кабельных инфраструктур, в частности линий сети электропитания. Системы передачи данных по промышленным и бытовым электропроводам, т.н. PLC-системы (Power Line Communication), являются достойной альтернативой различным технологиям беспроводной связи. Это связано с тем, что частотный спектр в линиях электросети, в отличие, например, от жестко регламентированного радиоэфира, практически свободен. К тому же на надежность связи в проводах не влияют различные препятствия, такие как, например, железобетонные перекрытия.

Для участков линии электропитания характерной особенностью является их разветвленность и неоднородность. Если рассматривать участок линии от трансформаторной подстанции до непосредственной абонентской розетки, то зачастую участки кабельной инфраструктуры представляют собой соединения кабелей различных типов, которые в свою очередь могут быть изготовлены из различных токопроводящих материалов. Точки соединения элементов кабельной сети выполняются сварочными, болтовыми, муфтовыми соединениями. Оплетка различных типов кабелей меняется в зависимости от условий прокладки кабеля и его технологического предназначения. Таким образом, вся сеть представляет собой явно неоднородную линию передачи с имеющимися в ней локальными неоднородностями (узлы соединений). Прибегнув к определенным приближениям, в результате которых электромагнитные процессы можно исследовать с помощью теории цепей с распределенными параметрами с применением обобщенной системы телеграфных уравнений или обобщенной системы уравнений длинной электрической линии в данной работе рассмотрены процессы, протекающие в PLC-сетях.

Основой современной технологии PLC на физическом уровне является мультиплексирование с ортогональным частотным разделением (Orthogonal frequency-division multiplexing – OFDM). Также на сегодняшний день OFDM широко применяется в проводной связи: в ADSL и VDSL системах; в системах цифрового кабельного телевидения стандарта DVB-C, DVB-C2; в беспроводной связи: в стандартах IEEE 802.11 и HIPERLAN/2; наземных системах мобильного телевидения DVB-H, T-DMB, MediaFLO, системах цифрового телевидения DVB-T и DVB-T2; системах цифрового радиовещания DRM; в беспроводных системах связи стандарта Flash-OFDM; системах связи стандартов LTE, IEEE 802.20, IEEE 802.16e (Mobile WiMAX), WiBro, IEEE 802.15.3a и прочих системах радиосвязи.

Как видно, спектр применения технологии OFDM достаточно велик. Как и любая другая телекоммуникационная система, OFDM-система подвержена влиянию помех различного рода, обусловленных средой распространения, наличием других источников сигнала, погодными условиями и прочими факторами, оказывающими влияние на качество связи. Для компенсации межсимвольной интерференции (МСИ) в системах с OFDM применяется метод добавления защитного интервала (ЗИ, Guard Interval – GI). Однако применение данного защитного интервала, при сохранении заданных параметров системы и заданных мощностях оборудования, существенно снижает полезную пропускную способность всей системы в целом. В рамках проводимого исследования, предлагается производить дробно-интервальную предварительную коррекцию цифрового сигнала, которая предполагает установку корректирующего цифрового фильтра на передающей стороне PLC-системы.

В диссертационной работе была поставлена задача компенсации межсимвольной интерференции в цифровых каналах систем передачи информации с ортогональным частотным мультиплексированием путем применения коррекции сигнала на передающей стороне PLC-системы. В работе аналитически рассматривается способ определения импульсной характеристики кабельного канала для метода совместного применения предварительной коррекции и ортогонального частотного мультиплексирования. Получаемые дискретные комплексные значения приближенной импульсной характеристики аналогового прототипа позволяют вычислить комплексные коэффициенты корректирующего фильтра на передающей стороне. Также в ходе исследований была разработана имитационная модель PLC-системы (язык программирования MatLab), в которой рассматривается случай применения предкоррекции при наличии априорной информации о передаточной функции канала.

Степень разработанности темы.

В конце XX века ряд компаний реализовал первые большие проекты в области передачи сигналов по электросети. В процессе эксплуатации были выявлены серьезные проблемы. Работа электротранспорта, многочисленных электродвигателей и бытовых приборов вызывала в незащищенных от высокочастотных излучений проводах помехи, которые приводили к резкому снижению достоверности передачи данных. В 2000 г. ведущие производители электронного оборудования (Cisco, Compaq, Enikia, Intel, Intellon, Motorola, 3Com, Texas Instruments и др.), заинтересованные в развитии PLC-технологии, объявили о создании альянса HomePlug Power Line Alliance.

Исследованиям в области передачи данных по линиям электропитания посвящены работы таких ученых, как: R. Lehnert, R. Hrasnica, A. Haidine, K. Dostert, S. Mudrievskiy, G. Bumiller, A. Muji, N. Suljanovi, M. Zajc, J. Tasi, Охрименко В. и многих других. Современные PLC-системы начали развиваться относительно недавно, но интерес к ним неизменно возрастает. Однако для систем передачи данных по линиям электросети в наибольшей степени характерны искажения сигнала, вызванные частотной зависимостью параметров канала на ширине спектра передаваемого сигнала и эффектом многолучевого распространения.

Исследованиям в области компенсации МСИ в цифровых сигналах при воздействии помех и разработке подходов к решению задачи компенсации искажений в каналах связи посвящены работы таких ученых, как: Андреев В.А., Кисель В.А., Кловский Д.Д., Курицын С.А., Мишин Д.В., Тамм Ю.А., Тихонов В.И., Шахгильдян В.В., Ericson T., Forney G.D., Gerstacker W., Graf K.P. и многих других.

Объектом исследования являются цифровые системы широкополосного доступа на основе технологии передачи данных по сетям электропитания в условиях эффекта многолучевого распространения, приводящего к возникновению межсимвольной интерференции.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы компенсации межсимвольной интерференции при передаче цифровых сигналов по сетям электропитания.

Целью работы является повышение эффективности использования систем передачи информации по сетям электропитания за счет компенсации межсимвольной интерференции.

Задачи исследования. Для достижения поставленной в работе цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработка математической модели кабельной сети передачи электроэнергии как существенно-неоднородной многопроводной линии.
2. Разработка метода, обеспечивающего снижение вероятности ошибки при приеме PLC-сигнала за счет компенсации межсимвольной интерференции, основанного на применении коррекции сигнала на передающей стороне.
3. Разработка алгоритма реализации предварительной коррекции в системах связи PLC, а также соответствующих программных и схемотехнических решений.
4. Разработка программного обеспечения, моделирующего систему передачи сигналов по линиям электропитания. Проведение численных экспериментов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана модель для исследования кабельной сети передачи электроэнергии как существенно-неоднородной многопроводной линии, которая в *отличие* от известных моделей, позволяет учитывать взаимные влияния линий при расчетах напряжений и токов, а также учитывает участки кабеля, представляющие собой как сосредоточенные, так и распределенные неоднородности.
2. Разработан метод, обеспечивающий снижение вероятности ошибки и увеличение пропускной способности при приеме PLC-сигнала за счет компенсации межсимвольной интерференции, *отличающийся* от существующих методов тем, что в нем применяется предварительная дробно-интервальная коррекция совместно с ортогональным частотным мультиплексированием.
3. Разработан алгоритм реализации предварительной коррекции в системах связи PLC, который в *отличие* от известных алгоритмов позволяет

реализовать тестирование и подстройку системы коррекции для устройств, применяющих ортогональное частотное мультиплексирование.

4. *Впервые* получены результаты проведенного имитационного моделирования реализующего предварительную коррекцию совместно с ортогональным частотным мультиплексированием для систем передачи по линиям электропитания.

Теоретическая и практическая ценность

Исследование с помощью теории цепей с распределенными параметрами с применением обобщенной системы телеграфных уравнений или обобщенной системы уравнений длинной электрической линии процессов, протекающих в PLC-сетях, а также компенсация МСИ путем предварительной коррекции на передающей части представляет большой теоретический и практический интерес при анализе и проектировании современных PLC-систем. Практическая значимость материалов диссертационной работы подтверждается их применением в учебном процессе на кафедре телекоммуникационных систем ФГБОУ ВПО «Уфимского государственного авиационного технического университета».

Методология и методы исследования.

В работе использовались теоретические и экспериментальные методы исследований из областей математической физики, теории цепей с распределенными параметрами, математического анализа, теории цифровой обработки сигнала, теории распространения электромагнитных волн, дифференциального исчисления, численные методы моделирования. Применены методы математического моделирования, в том числе компьютерного.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Модель для исследования кабельной сети передачи электроэнергии как существенно-неоднородной многопроводной линии, *основанная* на теории цепей с распределенными параметрами с применением обобщенной системы уравнений длинной электрической линии, которая *позволяет* учитывать взаимные влияния линий при расчетах напряжений и токов, а также учитывает участки кабеля, представляющие собой как сосредоточенные, так и распределенные неоднородности.

2. Метод компенсации МСИ в каналах передачи данных по линиям электропитания, основанный на совместном применении коррекции сигнала и OFDM - модуляции на передающей стороне, *позволяющий* снизить вероятность ошибки и увеличить пропускную способность при приеме PLC-сигнала.

3. Алгоритм реализации предварительной коррекции в сетях PLC и разработанные соответствующие программные решения, *основанные* на методе компенсации МСИ в каналах передачи данных по линиям электропитания.

4. Блок-схема передающего устройства системы передачи информации по линиям электропитания, *основанная* на алгоритме реализации предварительной коррекции в сетях PLC.

5. Результаты имитационного моделирования PLC-системы, реализующей OFDM-модулятор с дробно-интервальным предкорректором, которые *позволяют* сделать выводы об эффективности применения коррекции.

Достоверность и обоснованность результатов обусловлены корректным использованием существующего и разработанного математического аппарата, вводимые допущения мотивированы фактами, известными из практики, и подтверждается соответствием результатов проведенного имитационного моделирования, полученных в диссертационной работе, теоретическим положениям.

Апробация результатов. Основные результаты работы обсуждались на: Международной научно-практической конференции «Перспективное развитие науки, техники и технологий», Курск, 2011; Всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения», Уфа, 2012; XV Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций», Казань, 2014, а также на семинарах кафедры телекоммуникационных систем УГАТУ.

Результаты работы применены при выполнении научно-исследовательского проекта, реализованного в рамках гранта Минобрнауки России по федеральной целевой программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

Публикации. Результаты диссертационной работы отражены в 9 публикациях, в том числе в 3 статьях в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, и в 6 публикациях в сборниках материалов международных и всероссийских конференций. Также по результатам выполненной работы получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, списка использованных сокращений и приложений. Содержит 124 стр. машинописного текста, из которых основной текст составляет 98 стр., 30 рисунков, библиографический список из 102 наименований, приложения на 9 стр.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении дана общая характеристика диссертационной работы. Обоснована актуальность темы, раскрыты научная новизна и практическая значимость работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту. Описана структура диссертации и приведено ее краткое описание.

В первой главе проанализирована структура современных PLC-систем, рассмотрено развитие и текущее состояние в сфере исследования технологии, приведена классификация по назначению и дано краткое описание видов PLC-систем, изложены основные принципы действия и функционирования устройств, вовлеченных в систему. Произведен анализ преимуществ и недостатков систем передачи по сетям электропитания и выявлены проблемы, возникающие в системах. В частности это искажение широкополосного сигнала вследствие частотной зависимости параметров канала и эффекта многолучевого распространения, приводящее к МСИ в принимаемом сигнале.

В главе также рассмотрено описание формирования OFDM символов на физическом уровне на основе стандарта МСЭ (рекомендация IUT-T G.9960). В

главе описаны преимущества и недостатки систем с OFDM, приведены краткий обзор и характеристики основных подходов и методов, применяемых в настоящее время в цифровых системах связи для компенсации искажений сигнала. Проведя обзор основных подходов и методов, применяемых в настоящее время в цифровых системах связи для компенсации искажений сигнала, сделан вывод о возможности применения компенсации МСИ в заданном частотном диапазоне совместно с технологией OFDM. Анализ показал, что наиболее перспективным методом коррекции является дробно-интервальная, которую планируется применять совместно с ортогональным мультиплексированием в сетях PLC.

Вторая глава диссертационного исследования посвящена проблеме математического описания и анализа электромагнитных процессов в сетях PLC-систем.

Для участков линии электропитания характерной особенностью является их разветвленность и неоднородность. Если рассматривать участок линии от трансформаторной подстанции до непосредственной абонентской розетки, то зачастую участки кабельной инфраструктуры представляют собой соединения кабелей различных типов. Точки соединения элементов кабельной сети выполняются сварочными, болтовыми, муфтовыми соединениями. Таким образом, вся сеть представляет собой явно неоднородную линию передачи с имеющимися в ней локальными неоднородностями.

В процессе анализа рассматривается многопроводная линия длиной l , состоящая из n цепей и содержащая неоднородности, носящие как сосредоточенный, так и распределенный характер (Рисунок 1).

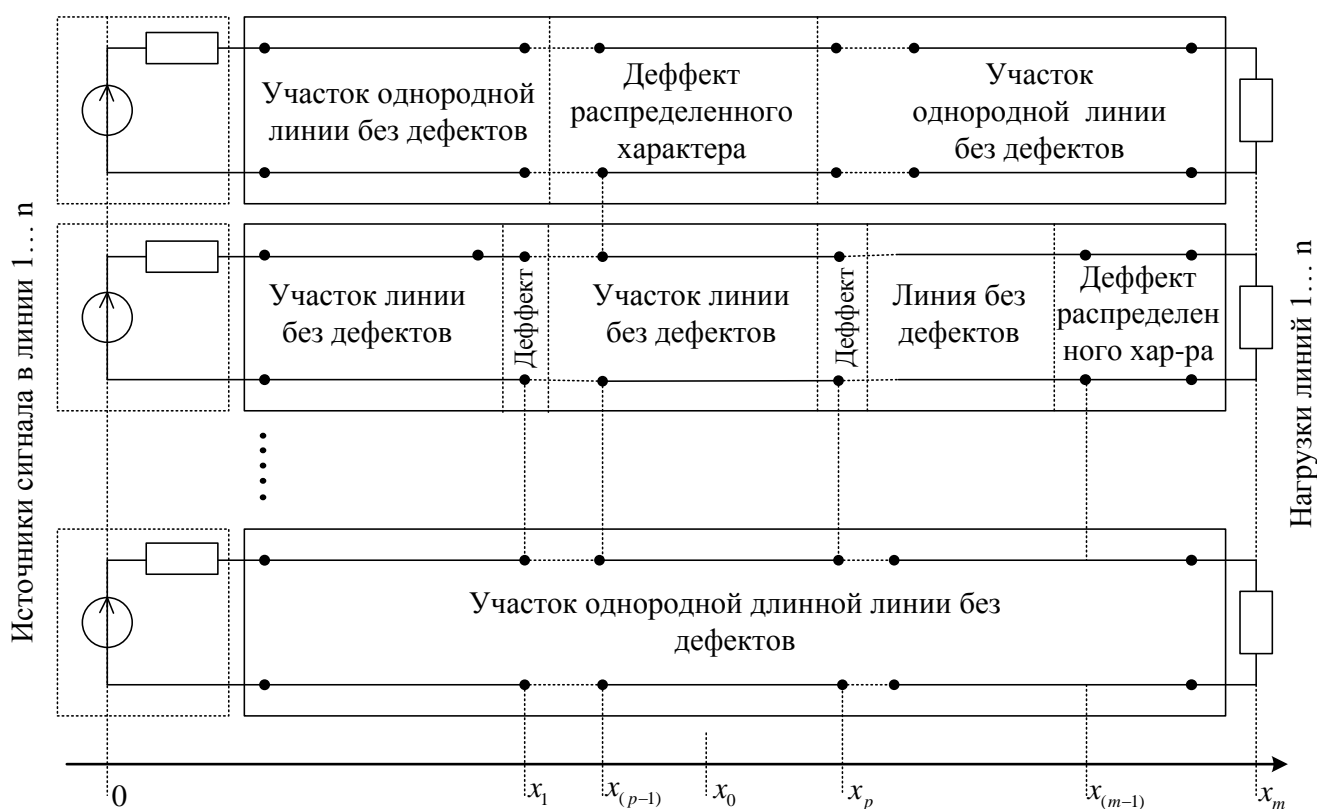


Рисунок 1 – Существенно-неоднородная многопроводная линия

Для того чтобы проанализировать какое влияние вносят данные неоднородности на качество сигнала и каким образом неоднородности в одной линии влияют на все остальные исследуемую линию подвергли преобразованию, а именно в места неоднородностей поместили четырехполюсники с А-параметрами.

1. В случае если в точке $x = x_k$ i -ой цепи содержится дефект, имеющий сосредоточенный характер, то в точку $x = x_k$ i -ой цепи помещается четырехполюсник с А-параметрами описывающими данный дефект.

$$\mathbf{A}^{(i,k)} = \begin{vmatrix} A_{1,1}^{(i,k)} & A_{1,2}^{(i,k)} \\ A_{2,1}^{(i,k)} & A_{2,2}^{(i,k)} \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где i – номер цепи ($1 \leq i \leq n$), k – порядковый номер четырехполюсника, считая от начала линии. В остальные цепи $r \neq i$ помещаются четырехполюсники с А-параметрами

$$\mathbf{A}^{(r,k)} = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad (2)$$

2. В случае если точка $x = x_r$ i -ой цепи является началом участка линии с дефектом распределенного характера, то в точку $x = x_r$ всех цепей линии помещаются четырехполюсники с А-параметрами, определяемыми выражением (2).

3. В случае, если точка $x = x_v$ i -ой цепи является концом участка линии с дефектом распределенного характера, то в точку $x = x_v$ всех цепей линии помещаются четырехполюсники с А-параметрами, определяемыми выражением (2).

В случае если некоторая точка содержит дефект сосредоточенного характера в одной из цепей и одновременно является началом либо концом дефекта распределенного характера в той же, либо другой цепи, то для этой точки выполняется правило 1.

В результате преобразований линия будет содержать $n(m-1)$ четырехполюсников в точках x_1, x_2, \dots, x_{m-1} (по n четырехполюсников в каждой точке) и nm участков, описываемых либо первичными параметрами цепей, на которых они расположены, в случае, если участки не содержат дефектов с распределенными параметрами, либо, в противном случае, первичными параметрами, описывающими дефекты с распределенными параметрами. Для удобства принимается $x_m = l$.

Указанная линия описывается следующей системой уравнений

$$\begin{aligned} -\frac{\partial \mathbf{u}^{(k)}(x,t)}{\partial x} &= \mathbf{L}^{(k)} \frac{\partial \mathbf{i}^{(k)}(x,t)}{\partial t} + \mathbf{R}^{(k)} \mathbf{i}^{(k)}(x,t) - \boldsymbol{\xi}^{(k)}(x,t), \\ -\frac{\partial \mathbf{i}^{(k)}(x,t)}{\partial x} &= \mathbf{C}^{(k)} \frac{\partial \mathbf{u}^{(k)}(x,t)}{\partial t} + \mathbf{G}^{(k)} \mathbf{u}^{(k)}(x,t) - \boldsymbol{\zeta}^{(k)}(x,t), \end{aligned} \quad (3)$$

Решение уравнений приведено при ненулевых начальных условиях, то есть при условии, что в момент времени $t=0$ напряжение и ток в линии были распределены определенным образом. Далее производя преобразование Лапласа системы (3) по переменной t , и вводя обозначения для комплексного сопротивления, проводимости, коэффициентов распространения и путем определения граничных условий, мы приходим к следующим выражениям: (4) и (5).

$$U_i^{(p)}(x,s) = \left[U_i^{(p)}(x_0,s) - \Psi_i^{(p)}(x_0,s) \right] \times \cosh \left[\Gamma_{i,i}^{(p)}(s)(x-x_0) \right] - Z_{i,i}^{B(p)}(s) \left[I_i^{(p)}(x_0,s) + \Phi_{i,i}^{(p)}(x_0,s) \right] \times \sinh \left[\Gamma_{i,i}^{(p)}(s)(x-x_0) \right] + \Psi_i^{(p)}(x,s), \quad (4)$$

$$I_i^{(p)}(x,s) = - \frac{U_i^{(p)}(x_0,s) - \Psi_i^{(p)}(x_0,s)}{Z_{i,i}^{B(p)}(s)} \times \sinh \left[\Gamma_{i,i}^{(p)}(s)(x-x_0) \right] + \left[I_i^{(p)}(x_0,s) + \Phi_{i,i}^{(p)}(x_0,s) \right] \times \cosh \left[\Gamma_{i,i}^{(p)}(s)(x-x_0) \right] + \Phi_{i,i}^{(p)}(x,s). \quad (5)$$

Из данных выражений определяется напряжение и ток без учета взаимного влияния. Напряжения и токи с учетом взаимного влияния определяются из выражения (6).

$$\begin{aligned} & \frac{d^2}{dx^2} U_i^{(p)}(x,s) - \left[\Gamma_{i,i}^{(p)}(s) \right]^2 U_i^{(p)}(x,s) = \\ & = \Omega_i^{(p)}(x,s) - \sum_{k=1, k \neq i}^n U_k^{(p)}(x,s) \sum_{j=1}^n Z_{i,j}^{(p)}(s) Y_{j,k}^{(p)}(s), \quad (6) \\ & i = 1, 2, \dots, n. \end{aligned}$$

Таким образом, описанное выше решение позволяет находить изображение Лапласа функций, согласно которым изменяются напряжение и ток в исследуемой кабельной линии. При заранее известной априорной информации о кабельной инфраструктуре полученные результаты позволяют определить параметры сигнала - напряжения и токи в существенно-неоднородной многопроводной линии в любом сечении, которой и являются сети передачи данных по линиям электропитания. Также полученные результаты дают возможность для анализа причин искажений передаваемых сигналов в цифровых системах передачи информации.

Однако в реальных условиях интерес в основном представляют оригиналы указанных функций. Ввиду достаточной сложности найденных изображений выразить их оригинал через элементарные функции не представляется возможным. В связи с этим на кафедре телекоммуникационных систем ведется дальнейшая работа по нахождению значения оригинала функции по заданному изображению.

В третьей главе разрабатывается метод, обеспечивающий снижение вероятности ошибки при приеме OFDM-сигнала в PLC-системе за счет компенсации межсимвольной интерференции, основанный на применении коррекции сигнала на передающей стороне.

Для определения характеристики фильтра необходимо знать импульсную характеристику линии передачи. Для этого линия подвергается периодическому тестированию. Предполагается, что тестирование происходит с определенной периодичностью (не более времени корреляции передаточной функции канала) и анализируемый кадр включается в основном потоке полезной информации, передаваемой по линии. Во временной области под кадром понимается один OFDM-символ, состоящий из N поднесущих ортогональных в частотной области (Рисунок 2).

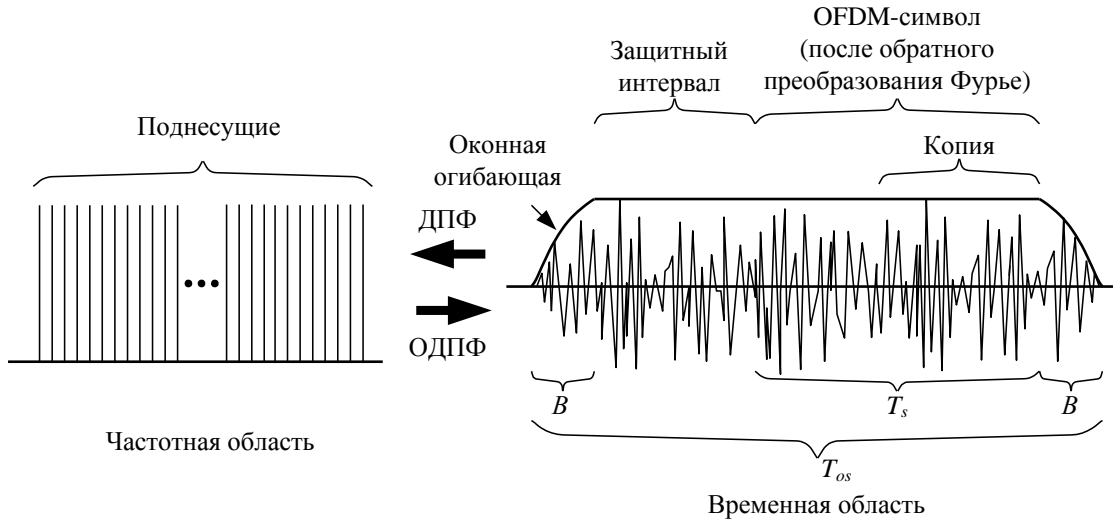


Рисунок 2 – Тестовый кадр OFDM сигнала с защитным интервалом

Для тестирования линии передачи достаточно использования одного тестового символа OFDM сигнала с добавленным защитным интервалом (ЗИ). Использование для тестирования одного символа оправдано тем, что на приемной части есть возможность восстановления защитного интервала, который в свою очередь является началом тестового символа. Вычитание восстановленного ЗИ из тестирующего OFDM-символа дает возможность полностью исключить влияние соседних импульсов при анализе тестового сигнала.

Аналитически сигнал OFDM выглядит следующим образом:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=0}^{N-1} X_{n,k} \cdot g_k(t - nT_{os}), \quad (7)$$

$$g_k(t) = \begin{cases} w(t) \cdot e^{i2\pi f_k t}, & t \in [0, T_s] \\ 0, & t \notin [0, T_s] \end{cases}, \quad (8)$$

$$f_k = k/T_s,$$

где n – номер символа OFDM сигнала; k – номер ортогональной поднесущей сигнала; N – общее количество поднесущих; $X_{n,k}$ – комплексные значения потока полезных данных, модулирующие k -ую поднесущую; T_{os} – период следования символов с учетом защитного интервала; T_s – длительность символа без защитного интервала; $w(t)$ – форма огибающей выходного OFDM-символа.

$w(t)$ определяет существование функции на заданном интервале от 0 до T_s . Согласно рекомендациям МСЭ, в качестве окна $w(t)$ рассматривается

симметричный трапецеидальный импульс. После преобразования $g_k(t)$ по Лапласу получено изображение данной функции. Далее получен тестовый OFDM сигнал для одного символа в операторной форме:

$$S_0(p) = \frac{U_0}{\beta} \sum_{k=0}^{N-1} \left(\frac{X_k}{(p - i\omega_k)^2} \left(1 - e^{-(p-i\omega_k)\beta} - e^{-(p-i\omega_k)(\beta+T_s)} + e^{-(p-i\omega_k)(2\beta+T_s)} \right) \right) \quad (9)$$

Таким образом, получен сигнал на входе линии передачи. Очевидно, что реакция линии на тестирующий сигнал до момента его прихода в точку $x=l$ при нулевых начальных условиях будет равна 0. Поэтому, как $\tilde{s}_l(t)$ обозначен сигнал на выходе линии, сдвинутый влево по оси времени на величину Θ . В свою очередь, для принятого тестирующего сигнала получено следующее выражение:

$$\tilde{S}_l(p) = \frac{1}{p} S[0] + \sum_{m=1}^M \frac{1}{p} \left(\tilde{S}_l[m\delta] - \tilde{S}_l[(m-1)\delta] \right) e^{-pm\delta} \quad (10)$$

где $m = 1, 2, \dots, M$; δ – интервал дискретизации выходного сигнала; $M = \lceil T_{os} / \delta \rceil$, где $\lceil \cdot \rceil$ – операция целой части.

Согласно теореме отсчетов, чтобы избежать влияния ошибки из-за неточности или потери синхронизации на приемной стороне канала, интервал дискретизации должен удовлетворять следующему условию:

$$\delta \leq T_s / 2N. \quad (11)$$

Поскольку сигналы $s_0(t)$ и $\tilde{s}_l(t)$ известны с приближенной точностью, можно ставить лишь задачу о нахождении приближенного решения для $h_p(t)$.

Для нахождения импульсной характеристики линии $h_p(t)$:

$$h_p(t) = L^{-1} \left\{ \frac{\lambda \tau S_0(p)}{\tilde{S}_l(p)} \right\} \quad (12)$$

где $L^{-1}\{\cdot\}$ – оператор обратного преобразования Лапласа; τ – тактовый интервал корректирующего фильтра.

Таким образом, подставив выражения для тестирующего сигнала на передаче и на приеме в выражение для нахождения импульсной характеристики, получено следующее выражение:

$$h_p(t) = \frac{\lambda \tau U_0}{\beta} \cdot L^{-1} \left\{ \frac{p}{S[0] + \sum_{m=1}^M \left(\tilde{S}_l[m\delta] - \tilde{S}_l[(m-1)\delta] \right) e^{-pm\delta}} \times \sum_{k=0}^{N-1} \left(\frac{X_k}{(p - i\omega_k)^2} \left(1 - e^{-(p-i\omega_k)\beta} - e^{-(p-i\omega_k)(\beta+T_s)} + e^{-(p-i\omega_k)(2\beta+T_s)} \right) \right) \right\} \quad (13)$$

Как известно, аналитически обратное преобразование Лапласа производится посредством интеграла Меллина-Фурье. Приближенное вычисление $h_p(t)$ может быть выполнено с помощью численного интегрирования, например в результате применения составной квадратурной формулы Ньютона-Котеса степени η . Получаемые дискретные комплексные значения приближенной ИХ аналогового

прототипа $h_p[n\tau]$ позволяют сразу вычислить комплексные коэффициенты b_q корректирующего фильтра:

$$b_q = \text{round}\left(h_p[q\tau] \cdot \frac{U_{\max}^{\text{in}}}{U_{\max}^{\text{out}}} \cdot 2^v\right), \quad q = 0, 1, \dots, Q-1, \quad (14),$$

где порядок фильтра Q должен обеспечивать обработку временного интервала не менее длительности ИХ аналогового прототипа. В выражении (11): U_{\max}^{in} и U_{\max}^{out} – максимальные значения напряжения на входе и выходе корректора соответственно; v – количество разрядов, отводимых на дробную часть коэффициентов фильтра; $\text{round}(\cdot)$ – операция округления до целого. В результате возможен синтез корректирующего фильтра по общему алгоритму независимо от вида передаточной функции аналогового прототипа. Скорректированный сигнал на выходе фильтра будет выглядеть следующим образом:

$$y_0[n\tau] = \sum_{q=0}^{Q-1} b_q f_0[n\tau - q\tau] \quad (15)$$

В главе также: оцениваются характеристики цифровой системы передачи, такие как спектральная эффективность OFDM-сигнала; возможность применения коррекции в системах использующих OFDM; для модернизации существующих протоколов и внедрения коррекции посредством тестирования канала приведена последовательность определения параметров корректирующего фильтра на сеансовом уровне модели OSI, а также алгоритм тестирования кабельной линии.

Четвертая глава посвящена разработке программных и схемотехнических решений соответствующих алгоритму реализации предварительной коррекции совместно с OFDM-модуляцией в PLC-системах. В ходе исследований была разработана имитационная модель PLC-системы (язык программирования MatLab), в которой рассматривается случай применения предкоррекции при наличии априорной информации о передаточной функции канала. Частотные зависимости $R(\omega)$, $L(\omega)$, C , $G(\omega)$ первичных параметров кабельной линии считываются программой из соответствующей таблицы формата *.txt, измеренные с определенной погрешностью в лабораторных условиях для кабелей марки ВВГ. В качестве исходных данных системы вводятся: тип модуляции, созвездие QAM, количество битов полезного сигнала, размер блока OFDM, длина защитного интервала, длина кабеля, сопротивление нагрузки и сопротивление источника на линию. В программе смоделированы: передающая часть системы (OFDM-модулятор), предкорректор (корректирующий фильтр), канал передачи, приемная часть системы (OFDM-демодулятор). На основе имеющегося алгоритма и программного кода осуществляется приближенное вычисление частотного коэффициента передачи канала, импульсной характеристики линии и коэффициентов корректирующего фильтра. Работа программы заканчивается построением графика вероятности появления символьной ошибки (SER) от уровня шума. Для сравнительного анализа проводились следующие вариации с обработкой сигнала: применение коррекции с действующим блоком добавления защитного интервала (ЗИ), применение коррекции без ЗИ, случай без коррекции,

но с включенным ЗИ. Длительность ЗИ варьировалась для определения зависимости SER от длительности ЗИ.

По результатам имитационного моделирования для модуляций QPSK, QAM-16, QAM-64, QAM-128 и QAM-256 можно сделать следующий вывод: с применением корректора происходит снижение вероятности появления символьной ошибки по сравнению со случаем его отсутствия более чем в 5 раз. Также стоит отметить, что совместное применение коррекции с ЗИ показывает наилучшие значения для величины символьной ошибки при заданном значении сигнал-шум. Результаты экспериментального моделирования также подтверждают увеличение вероятности появления ошибочного символа в зависимости от усложнения типа цифровой модуляции. Но при этом возрастает и скорость передачи информации. Для случая применения коррекции при уменьшении длительности ЗИ уровень SER остается неизменным, что позволяет говорить о возможности увеличения пропускной способности канала до 25%.

Таким образом, разработанная имитационная модель сделала возможным проводить анализ систем передачи информации по линиям электросети. На основании результатов её работы можно уверенно утверждать, что применение дробно-интервальной предварительной коррекции совместно с OFDM модулятором позволило бы оптимизировать процесс компенсации МСИ и, следовательно, повысить эффективность использования PLC-систем.

В заключении изложены основные результаты работы.

В приложениях приведены: акты внедрения результатов работы в проектах ЗАО «Учебно-методический центр при Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» и в учебном процессе ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, исходный код программы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана модель для исследования кабельной сети передачи электроэнергии как существенно-неоднородной многопроводной линии. Описанная модель позволяет находить изображение Лапласа функций, согласно которым изменяются напряжение и ток в исследуемой кабельной линии. При заранее известной априорной информации о кабельной инфраструктуре полученные результаты позволяют определить параметры сигнала - напряжения и токи в существенно-неоднородной многопроводной линии в любом сечении, которой и являются сети передачи данных по линиям электропитания. Также полученные результаты дают возможность для анализа причин искажений передаваемых сигналов в цифровых системах передачи информации.

2. Разработан метод, обеспечивающий снижение вероятности ошибки при приеме PLC-сигнала за счет компенсации межсимвольной интерференции, а также позволяющий увеличить пропускную способность канала до 25%, основанный на применении коррекции сигнала на передающей стороне.

3. Сделан вывод о возможности реализации корректирующего цифрового фильтра в виде программируемого процессора или микроконтроллера с минимальной тактовой частотой 60 МГц.

4. На основе разработанного метода предложены: алгоритм реализации предварительной коррекции для систем связи по линиям электропитания; элементы протокола необходимые для процесса коррекции; блок-схема для реализации передающего устройства PLC-системы.

5. Разработано программное обеспечение на основе предложенного алгоритма для реализации предварительной коррекции совместно с OFDM для PLC-систем. Программное обеспечение позволило провести моделирование процесса передачи информации от источника к приемнику через кабельную линию при наличии априорной информации о передаточной функции канала.

6. Представлены результаты имитационного моделирования, показывающие эффективность предложенного алгоритма реализации предварительной коррекции, полученные с помощью разработанного ПО. Применение коррекции позволило снизить вероятность появления ошибочного символа более чем в 5 раз, по сравнению с результатами, полученными для системы без применения коррекции.

Перспективы дальнейшей разработки темы. В рамках дальнейших исследований планируется разработка прототипов устройств, на основе полученных в исследовании программных и схемотехнических решений, для передачи сигналов по линиям электропитания реализующих предварительную коррекцию на передающей стороне совместно с OFDM.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах из списка ВАК

1. О дробно-интервальной предварительной коррекции цифрового сигнала в каналах связи/ Султанов А.Х., Тлявлин А.З., Багманов В.Х., Любопытов В.С., Адиев Т.И. // Вестник УГАТУ: науч. журнал Уфимск. гос. авиац. ун-та. УГАТУ. 2013. Т. 17. № 2 (55). С. 3-13.

2. Прохождение сигнала по существенно-неоднородной многопроводной линии/ Тлявлин А.З., Ясовеев В.Х., Зайнуллин Р.Ф., Адиев Т.И. // Вестник УГАТУ: науч. журнал Уфимск. гос. авиац. ун-та. УГАТУ. 2013. Т. 17. № 4 (57). С. 135-142.

3. Синтез корректирующего фильтра для OFDM-сигнала/ Тлявлин А.З., Любопытов В.С., Адиев Т.И. // Электротехнические и информационные комплексы и системы: науч. журнал Уфимск. гос. ун-та эконом. и сервиса. УГУЭС. 2014. Т. 10. № 2. С. 62–67.

Патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014661125. Система с ортогональным частотным мультиплексированием с применением предварительной коррекции/ Тлявлин А.З., Адиев Т. И. Роспатент. М.: Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 23.10.2014.

В других изданиях

5. Система регулирования освещения с применением технологии передачи информации по электропроводам/ Тлявлин А.З., Адиев Т.И., Любопытов В.С. // Перспективное развитие науки, техники и технологий: Международная научно-практическая конференция. Курск: ЮЗГУ, 2011. С. 236-238.

6. Передача сигналов по линиям электроснабжения / Тлявлин А.З., Адиев Т.И.// Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: XII Международная научно-техническая конференция. Казань: КГТУ, 2011. С. 136-138.

7. Неоднородная линия электроснабжения как среда передачи информации / Адиев Т.И.//Мавлютовские чтения: материалы Всероссийской молодёжной научной конференции. Уфа: УГАТУ, 2012. С. 98-99.

8. Применение дробно-интервальной предварительной коррекции в системах передачи данных по линиям электропитания /Адиев Т.И. // Актуальные проблемы науки и техники: сборник научных трудов VIII Всероссийской зимней школы-семинара аспирантов и молодых ученых. Уфа: УГАТУ, 2013. С. 11-13.

9. Совместное применение предварительной дробно-интервальной коррекции и мультиплексирования с ортогональным частотным разделением в сетях PLC /Адиев Т.И., Тлявлин А.З., // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: XIV Международная научно-техническая конференция. Самара: ПГУТИ, 2013. С. 7-10.

10. Реализация имитационной модели OFDM модулятора с дробно-интервальным предкорректором в PLC-системах/ Тлявлин А.З., Адиев Т.И., Исмагилова А.Р.// Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: XV Международная научно-техническая конференция. Казань: КГТУ, 2014. С. 101-103.

Диссертант

Т.И. Адиев

АДИЕВ Тимур Ильдарович

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ В СИСТЕМАХ
С ОРТОГОНАЛЬНЫМ ЧАСТОТНЫМ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ
(НА ПРИМЕРЕ PLC-СИСТЕМ)

Специальность:

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать __.__.2015. Формат 60×84 1/16
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 0,9.
Тираж 100 экз. Заказ № ____.

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный
технический университет»
Центр оперативной полиграфии
450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12