

## **ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ КОДИРОВАНИЯ ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ**

*Статья посвящена актуальным проблемам кодирования в линиях связи в присутствии паттерн-эффекта – эффекта зависимости частоты ошибок при передаче информации. Цель статьи, анализировать новые методы кодирования на использование нелинейных свойств передаче информации по оптоволоконным каналам связи, для повышения пропускной способности оптических линий. Предмет исследования являются методы кодирования информации. В статье рассмотрено применение методов кодирования информации на примере волоконно-оптической линии связи. Произведен анализ полученных результатов и сделаны выводы о применимости данных кодов. Проведённая работа по реализации методов кодирования позволяет использовать не только ВОЛС, но и в любой другой, где наблюдается явление паттерн-эффекта, что говорит о широкой применимости работы. Практические значимости результатов того, что стоимость прокладки нового волоконного кабеля многократно превосходит стоимость замены приёмно-передающего оборудования в уже проложенной линии.*

*Ключевые слова: оптические линии, энтропия, паттерн-эффект, RLL-коды, информация, модуляция, кодирования.*

Omorova Saltanat Toronbekovna - senior lecturer,  
Osh technological university

## **EFFECTIVENESS OF CODING METHODS FOR FIBER-OPTICAL COMMUNICATION LINES**

*The article is devoted to actual problems of coding in communication lines in the presence of the pattern of effect - the effect of the dependence of the error frequency in the transmission of information. The purpose of the article is to analyze new methods of coding for the use of nonlinear properties of information transfer over fiber-optic communication channels, to increase the capacity of optical lines. The subject of research is methods of information coding. The article deals with the application of information coding methods using the example of a fiber-optic communication line. The analysis of the obtained results is made and conclusions are made about the applicability of these codes. The work carried out on the implementation of coding methods makes it possible to use not only fiber-optic lines, but also in any other where the phenomenon of the pattern effect is observed, which indicates the wide applicability of the work. The practical significance of the results of the fact that the cost of laying a new fiber cable many times exceeds the cost of replacing the receiving and transmitting equipment in the already laid line.*

*Key words: optical lines, entropy, pattern-effect, RLL- of code, information, modulation, encryptions.*

При увеличении мощности передаваемых информационных импульсов в оптоволоконных линиях начинают играть большую роль так называемые нелинейные эффекты. Кроме физического они имеют еще и информационное влияние, которое проявляется в виде зависимости количества ошибок при передаче информации от вида

самой информации — так называемым паттерн-эффектом (patterning effect) [1]. Примером паттерн-эффекта служит существование битовых последовательностей, которые передаются с ошибкой гораздо чаще, нежели остальные.

Каждый год количество передаваемой между абонентами информации очень быстро увеличивается, поэтому остро стоит проблема улучшения средств передачи данных [1]. При этом основным средством передачи являются волоконно-оптические линии связи. В современном мире 70% всего и 99% межконтинентального трафика передается через них. Пропускная способность оптических линий все время растет и в настоящее время достигает порядка 20 Тбит/с. В лабораторных условиях удается продемонстрировать скорость передачи данных выше 100 Тбит/с.

Особенно заметным паттерн-эффект становится при высоких скоростях передачи информации, так как на физическом уровне появляется межсимвольное взаимодействие (ISI — inter-symbol interference) и ряд других физических эффектов такие как дисперсионное уширение импульса, четырех волновое взаимодействие и фазовая кроссмодуляция [2]. Эти эффекты приводят к нелинейной зависимости информационных свойств канала от вида самой информации. Поэтому устранение негативных последствий нелинейных эффектов играет важную роль в развитии средств передачи данных.

Одним из способов решения этой проблемы — помехоустойчивое кодирование (FEC - Forward Error Correction), которое увеличивает избыточность сообщения, добавляя служебную информацию с помощью которой может быть восстановлено первоначальное сообщение. Многие методы хорошо справляются с исправлением небольшого количества ошибок для линий связи с невысоким BER (Bit Error Rate — количество ошибок в потоке данных по отношению к общему числу бит в потоке), но перестают работать или требуют высокой избыточности для линий связи с высоким  $BER > 0.1$  и выше. Так же для многих методов при высокой избыточности растет сложность кодирования/декодирования, а с ней и стоимость оборудования [3].

Широко известными кодами с ограничениями являются RLL-коды (Run-Length Limited — коды с ограничением длины серий одинаковых битов). Данные коды описываются правилом наличия в слове между двумя «единицами» не менее, но не более «нулей». Эти коды можно разделить на две части: основанные на нумерации комбинаторных объектов и использующие специфические кодирующие конструкции.

В отличие от большинства сред передачи информации, оптические волокна обладают рядом свойств, интенсивность проявления которых зависит от интенсивности использования волокна. Специфика природы сигнала в волоконном световоде начинает проявляться при увеличении мощности передаваемых информационных импульсов. В этом случае на передачу данных начинают оказывать значительное воздействие так называемые нелинейные эффекты. Именно факт зависимости влияния данных эффектов от мощности передаваемого сигнала и отличает их от других, «линейных», эффектов. Роль нелинейностей в волоконной оптике неоднозначна. С одной стороны, они ограничивают дальность и скорость передачи информации, с другой же их использование способно улучшить характеристики линий связи.

Влияние нелинейных эффектов носит не только чисто физический, но и информационный характер. В информационном плане они проявляются зависимостью количества ошибок при передаче информации от вида самой информации — так называемым паттерн-эффектом (patterning effect). Как показали исследования [2,4], во многих случаях влияние паттерн-эффекта велико настолько, что пренебрегать им при разработке систем передачи данных нельзя. Особенно он заметен при больших скоростях передачи информации в силу того, что в этом случае на физическом уровне наблюдается межсимвольное взаимодействие (ISI — inter-symbol interaction), выражающееся во влиянии передачи одного символа на передачу его «соседей», а также ряд других эффектов, таких, как дисперсионное уширение импульса, четырех-

волновое взаимодействие, фазовая кроссмодуляция. И хотя взаимодействие соседних импульсов несложно объяснить вполне «линейными» соображениями, а именно тем фактом, что с увеличением скорости передачи данных уменьшается длительность импульсов и становится более вероятно их перекрытие, суммарное воздействие других эффектов приводит к нелинейной зависимости информационных свойств канала от рода самой информации, передаваемой по нему. Наиболее ярко это видно при анализе статистики ошибок, собранной при моделировании процесса передачи данных по оптоволокну [3,4], которая свидетельствует о том, какие битовые сочетания являются самыми «неподходящими» для передачи (иными словами, данные сочетания имеют максимальную вероятность быть принятыми с ошибкой).

Нелинейности оказывают существенное воздействие на свойства линии связи и, очевидно, что ввиду постоянного уплотнения информации в волокне влияние нелинейных эффектов в будущем может поставить ещё более серьёзные препятствия на пути роста пропускной способности оптоволоконных линий, ввиду того, что уплотнение сигнала является одной из причин усиления влияния нелинейностей. Именно поэтому их отрицательное действие на передаваемый сигнал необходимо по возможности подавлять на физическом уровне. Для этой цели могут быть использованы как физические, так и информационные методы. Так, специальные устройства могут предотвращать перекрытие соседних импульсов в определённом диапазоне частот передачи данных. В более общем случае межсимвольное взаимодействие (ISI) может быть частично подавлено с помощью использования специальных форматов модуляции данных [4,2].

Однако физические методы не всегда могут эффективно предотвращать влияние на сигнал нелинейных взаимодействий, поэтому в ряде случаев целесообразно решать проблему информационными методами. Для этого стоит заметить, что нелинейные искажения могут дать дополнительную информацию для принимающей стороны, в самом простом случае в виде статистики ошибок по различным передаваемым сигналам. Такую информацию можно использовать для того, чтобы преобразовать передаваемые данные определённым образом с целью снижения степени их искажённости при передаче по волокну. Схожую задачу решают не только в оптике, она имеет приложения в магнитной записи и в спутниковой связи, однако в этих областях, как правило, такие подходы посвящены устранению перекрытия соседних импульсов, а также сохранению синхронизации при обработке большого количества символов в один приём. Преобразование данных, заключающееся в их модулировании, то есть в представлении их на информационном уровне символами определённого вида, называется кодированием с ограничениями (или ограниченным кодированием). Применению подходов теории кодирования для улучшения характеристик волоконно-оптических каналов и посвящена данная работа.

**Цели работы.** Разработка и анализ новых методов кодирования информации, направленных на использование нелинейных свойств среды при передаче информации по оптоволоконным каналам связи, для повышения пропускной способности оптических линий. Разработка программного обеспечения, включающего в себя алгоритмы, основанные на построенных методах. Анализ схем взаимодействия предложенных в работе кодов с другими типами помехоустойчивых кодов. Оценка эффекта от применения кодов с помощью существующих моделей передачи данных по оптоволоконным линиям связи.

#### **Научная новизна и значимость статьи:**

1. Получены рекуррентные соотношения, по которым можно определить количество заданных триплетов в произвольном бинарном слове длины  $n$ . На основе выведенных соотношений путём нумерации последовательностей построен блочный код для удаления определённого количества паттернов из сообщения; данный код может

работать с блоками большой длины и является оптимальным при неограниченном возрастании длины блока.

2. Предложен метод адаптивного кодирования, позволяющий снизить количество ошибок в канале при наличии в нём паттерн-эффекта произвольной природы. Данный метод позволяет с помощью кодов небольшой избыточности (до 10%) существенно снизить количество ошибок в канале с паттерн-эффектом, который может иметь место на практике. Этот факт проверен и отражён в работе, в качестве подтверждения приведён пример.

3. Предложен код, обобщающий метод адаптивного кодирования для больших блоков данных. Код основан на использовании предложенных в работе математических методов нумерации последовательностей. Для данного кода показано, что операции декодера могут быть эффективно распараллелены.

4. Показано, что построенные коды с ограничениями могут эффективно дополнить используемые в связи помехоустойчивые коды, поскольку они, обладая простотой кодирования/декодирования, позволяют снизить нагрузку на корректирующие коды за счёт снижения числа ошибок, причины, появления которых обусловлены влиянием нелинейностей в оптоволокне.

Практическая проведённая работа по реализации алгоритмов кодирования позволяет их применить в реальных системах связи, в частности при модернизации уже функционирующих линий волоконно-оптической связи, что является практически значимым результатом в силу того, что стоимость прокладки нового волоконного кабеля многократно превосходит стоимость замены приёмно-передающего оборудования в уже проложенной линии.

При построении и анализе алгоритмов кодирования применялись идеи и методы теории вероятностей, комбинаторики, дискретной математики, теории алгоритмов и теории случайных процессов.

Алгоритмы кодирования были реализованы в виде библиотечных процедур для ЭВМ. В ходе выполнения работы также использовалась модель оптоволоконного канала связи, разработанная сотрудниками ИВТ СО РАН. С помощью модели были проведены численные эксперименты, позволившие найти характеристики построенных автором алгоритмов, наблюдаемые при применении алгоритмов на практике.

Достоверность результатов, полученных в работе, основана на строгом математическом описании разработанных алгоритмов и на их теоретическом анализе. Обоснованность выводов прикладного характера подтверждается результатами практического применения разработанных алгоритмов.

#### **Выводы:**

В работе были построены и проанализированы ограниченные коды, направленные на улучшение качества передачи информации по нелинейному волоконно-оптическому каналу. Анализ асимптотических свойств кодов со слабыми ограничениями может быть использована для нахождения кодовой ёмкости для кодов в случае различных ограничительных условий.

Особенно целесообразно разработано и анализировано коррекции ошибок работает на грани своих возможностей, поскольку тогда предложенный способ кодирования позволит существенно усилить возможности коррекции, так как большинство корректирующих кодов имеют свойство размножать ошибки в случаях, когда их становится больше некоторого порогового значения.

#### **Литература:**

1. **Гроднев, И.И.** Волоконно-оптические системы передачи и кабели: Справ. [Текст]/ А.Г. Мурадян, Р.М. Шарафутдинов. // - М.: Радио и связь, 2003.
2. **Иванова, В.И.** Оптические системы передачи. Учеб. для вузов [Текст] / Под ред. - М.: Радио и связь, 2004.

3. **Портнов, Э.Л.** Оптические кабели связи и пассивные компоненты волоконно-оптических линий связи [Текст]: учеб. для вузов – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 486 с.
4. **Розеншер, Э.** Оптоэлектроника [Текст] / Б. Винтер // – М.: Техносфера, 2006. – 595 с.
5. **Скидин А.С.** Разработка эффективных методов кодирования для повышения пропускной способности современных линий волоконно-оптической связи // Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. – Красноярск: СФУ. – 2011. – 21 с.
- Фриман Р.** Волоконно-оптические системы связи. [Текст]– М.: Техносфера, 2003