

УДК 004.056

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ПРЯМОЙ КОРРЕКЦИИ ОШИБОК

Исайнова Алия Насиповна

issainova.an@gmail.com

Докторантка 1-го курса Евразийского национального университета

имени Л.Н.Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

Научный руководитель – Д.Ж. Сатыбалдина

В последние годы рост новых приложений, таких как облачные вычисления, социальные сети значительно увеличил интернет-трафик. Чтобы справиться с этим ростом многим операторам связи пришлось значительно увеличить скорость передачи данных. В условиях постоянно увеличивающейся скорости передачи также увеличивается необходимость исправления пакетных ошибок и бороться с дополнительными нарушениями, такими как нелинейные эффекты, некомпенсированная хроматическая дисперсия и дисперсия режима поляризации [1, 2]. Одним из наиболее эффективных способов обеспечения надежной доставки сообщений, позволяющим сократить число перезапросов и уменьшить время сборки данных на прикладном уровне, является применение технологии прямой коррекции ошибок (Forward Error Correction, FEC), которые используют упреждающий метод исправления ошибок.

В настоящее время разработаны и доступны на современном рынке FEC-системы с различной степенью избыточности, сложности реализации, усиления кодирования, производительности ошибок по битам (bit error rate, BER), способности исправления пакетных ошибок и минимальным уровнем ошибок [3, 4]. Целью данной работы статьи является предоставление обзора методов FEC, анализ их основных параметров, эволюции FEC - систем.

Кодирование с контролем ошибок является дисциплиной теории информации, введенной Клодом Элуудом Шенноном в 1948 году [5]. В своей исторической работе Шеннон показал, что шум канала ограничивает скорость передачи, а не вероятность ошибки. Следовательно, можно спроектировать систему связи с использованием кодирования с

контролем ошибок с максимальной скоростью. Данные могут передаваться по шумному каналу связи определенной полосы пропускания без ошибок. Контроль ошибок кодирования направлена на разработку методов кодирования для обнаружения ошибок и восстановления исходных безошибочных данных. На рисунке 1 показана блок-схема системы передачи данных, где блоки кодера и декодера канала отвечают за кодирование и декодирование передаваемой и получаемой последовательности данных. Вклад Шеннона состоял в том, чтобы доказать существование таких кодов и это стало отправной точкой для изучения кодирования с контролем ошибок. С тех пор много исследований было посвящено оптимизации методов кодирования и декодирования для контроля ошибок в шумной среде.

Одним из наиболее широко используемых методов контроля ошибок является прямое исправление ошибок. Как и большинство методов контроля ошибок, основная идея FEC заключается в добавлении некоторой избыточности к исходному сообщению, которое получатели могут использовать для проверки целостности доставленного сообщения и восстановления поврежденных данных. Таким образом, часть эффективной скорости передачи ограничена. Однако ключевой метрикой для этих кодов является кодовая скорость R , которая выражает отношение скорости передачи в битах без FEC к скорости передачи в битах с FEC ($R = k/n$, где k битов информации, n битов данных, $n-k$ являются избыточными).

В общем случае, FEC могут быть разделены на блочные, сверточные и комбинацию этих кодов. Коды FEC с кодовыми словами конечной и постоянной длины называются блочными кодами. Кодовые слова длиной n формируются путем ассоциирования $n-k$ кодовых символов четности с k входными кодовыми символами. С другой стороны, сверточные коды применяются к входным данным непрерывно. Символы входного кода попадают в одно и то же кодовое слово, пока не будет принято решение переключиться на следующее кодовое слово. Поэтому результирующие кодовые слова могут иметь неодинаковую длину [6].

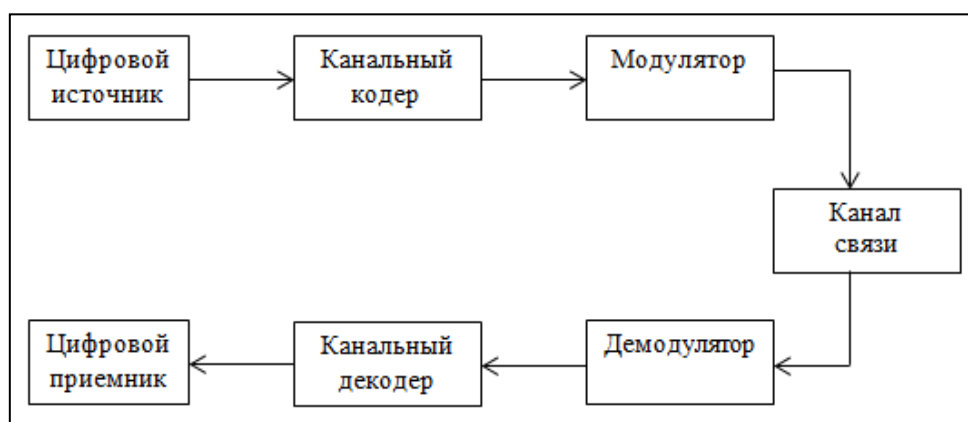


Рисунок 1 – Структурная схема системы передачи данных

Другое разделение систем FEC определяется методом декодирования с «жестким» решением (Hard-Decision, HD) и с «мягким» решением (Soft-Decision, SD). Декодирование HD выполняется с использованием единого уровня квантования для дискретизации битов, тогда как для обнаружения SD устанавливаются 2^{N-1} пороговые значения решения (N – номер бита квантования). Эти промежуточные уровни между «0» и «1» указывают на надежность решения и обеспечивают признак того, как далеко сигнал находится от пересечения порога (см. рисунок 2).

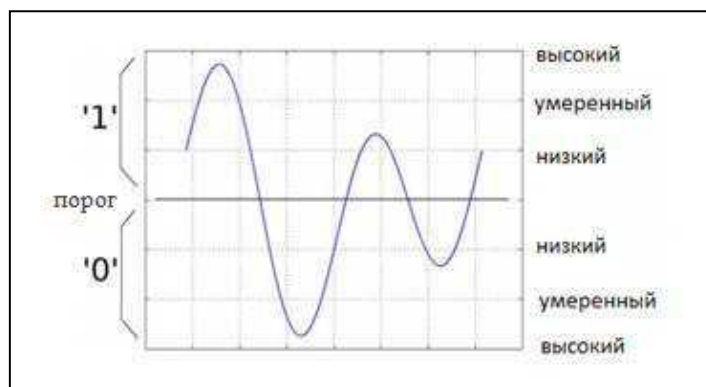


Рисунок 2 – «Жесткое» решение и «мягкое» решение декодирования. Предполагается биполярное сигнальное созвездие. Количество уровней квантования относится к выборке принятого отфильтрованного сигнала и влияет на производительность коррекции кода.

Производительность цифровой системы характеризуется частотой ошибок по битам (BER). Хотя BER может быть определен как число ошибок, совершаемых в секунду, такое определение делает зависящую от битовой скорости BER. Обычно BER определяется как средняя вероятность неверной идентификации битов. Следовательно, значение BER, равное 10^{-6} , соответствует в среднем одной ошибке на миллион битов [7]. Кроме того, производительность кода передачи данных, используемого в канале с аддитивным белым гауссовским шумом, выражается через вероятность ошибки символа канала как функцию E_b/N_0 формы сигнала канала. Согласно соглашению E_b - это средняя энергия на бит данных, тогда как N_0 обозначает спектральную плотность мощности шума (E_b/N_0 не зависит от скорости передачи данных и ширины полосы). Распространено судить о коде не по уменьшению частоты ошибок по битам, а по уменьшению E_b/N_0 , необходимого для обеспечения указанной частоты ошибок по битам. Уменьшение требуемого E_b/N_0 при той же частоте ошибок по битам называется коэффициентом усиления кодирования. Например, простая двоичная система связи по аддитивному каналу гауссовского шума, использующая биполярное созвездие сигналов, работает с частотой появления ошибок по битам 10^{-5} при E_b/N_0 9,6 дБ. При добавлении достаточно сильного кода в систему связи отношение E_b/N_0 может быть уменьшено. Если для кода требуется всего 6,6 дБ для коэффициента ошибок по битам 10^{-5} , то мы говорим, что код имеет коэффициент кодирования 3 дБ при коэффициенте ошибок по битам 10^{-5} (см. рисунок 3) [8]. Разница между усилением кодирования и чистым выигрышем при кодировании (Net Coding Gain, NCG) заключается в том, что последний также учитывает тот факт, что расширение полосы пропускания, необходимое для схемы FEC, связано с повышенным шумом в приемнике. Например, если произошло увеличение скорости на 7% из-за FEC, скорость передачи данных должна была увеличиться на 7% для передачи как данных, так и FEC [9].

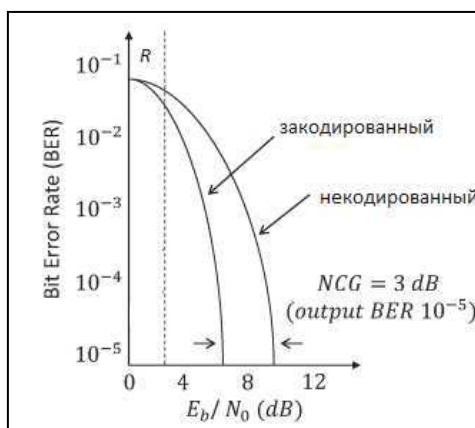


Рисунок 3 – Иллюстрация понятия усиления кодирования [9].

Поколения кодов FEC. Рассмотрим прогресс методов прямого исправления ошибок от методов первого поколения к современным схемам FEC. Коды FEC классифицируются по 3 поколениям, и их характеризуют коэффициенты усиления кодирования примерно 6 дБ, 8 дБ и более 10 дБ, соответственно. На рисунке 4 показана эволюция FEC за прошедшие годы [10].

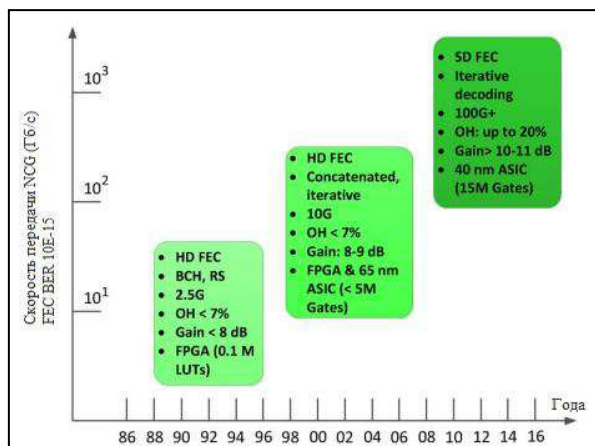


Рисунок 4 – Эволюция FEC Net [10].

Коды FEC 3-го поколения с высокими возможностями коррекции соответствуют потребностям сетей нового поколения. В системах связи с высокой скоростью передачи данных задача состоит в том, чтобы реализовать коды с низкой избыточностью, которые способны исправлять случайные и пакетные ошибки.

FEC первого поколения: использование блочных кодов с жестким решением, таких как коды Хэмминга, БЧХ (Бозе, Чаудхури и Хоккенгем) и Рида-Соломона (RS). Коды RS, которые являются наиболее распространенными представителями этой эпохи, характеризуются «максимальным расстоянием Хэмминга» (Maximum Distance Separable, MDS) и подходят для уменьшения ошибок в форме пакета из-за их недвоичной структуры. Коды Рида – Соломона (RS) (255, 239) (каждое кодовое слово содержит 255 байтов кодового слова, из которых 239 байтов являются данными, а 16 байтов – байтами четности) были рекомендованы для передачи данных на большие расстояния для оптической связи. Эти коды были успешно использованы в системах связи и обеспечивали скорость передачи данных до 5 Гбит/с [10].

Помимо алгоритмов, основанных на жестких решениях, коды FEC второго поколения обеспечивают лучшую эффективность кодирования с использованием каскадных кодов наряду с методами чередования, итеративного и сверточного декодирования. Схема конкатенации основана на идее увеличения расстояния Хэмминга путем формирования внутреннего и внешнего контуров в схеме кодирования и может быть выполнена последовательным или параллельным способом.

FEC третьего поколения: использование когерентного обнаружения в системах связи и быстрый рост технологий интегральных схем делают возможным применение FEC с мягким решением (Soft-Decision). Основная причина их ограниченного использования в сетях заключается в том, что до недавнего времени многочисленные ограничения технологий и ASIC (Application-Specific Integrated Circuit, специализированные интегральные схемы) препятствовали их широкому внедрению на аппаратном уровне. Другими словами, вычислительная производительность этих кодов и технологические ограничения прошлого не позволяли реализовывать такие схемы для очень высоких скоростей передачи сетей. Другим сдерживающим фактором была недоступность необходимых аналого-цифровых преобразователей. Аналого-цифровые преобразователи появились после внедрения систем когерентного обнаружения, и все еще остаются дорогостоящими.

Следовательно, применение технологии упреждающей коррекции ошибок позволяет существенно снизить коэффициент ошибок BER и таким образом увеличить бюджет мощности сетевой линии.

Будущие исследования связаны с подбором оптимальных параметров составляющих сверточных кодеров и декодеров многопорогового декодирования, исследованием влияния устройств перемежения и прокалывания на эффективность декодирования [11 – 13].

Список использованных источников

1. T. Mizuochi Recent progress in forward error correction and its interplay with transmission impairments // IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., vol. 12, no. 4, pp. 544–554, Jul./Aug. 2006.
2. B. Smith and F. Kschischang Future prospects for FEC in fiber-optic communications // IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., vol. 16, no. 5, pp. 1245–1257, Sep./Oct. 2010.
3. T. Mizuochi and Y. Miyata LDPC-based advanced FEC for 100 Gbps transmission // in Dig. IEEE/LEOS Summer Top. Meet., Jul. 2008, pp. 217–218.
4. T. Mizuochi Next generation FEC for optical communication // in Conf. OFC/NFOEC, Feb. 2008, pp. 1–33.
5. C. E. Shannon (1948, Jul.–Oct.). A mathematical theory of communication. Bell Syst. Techn. J.[Online].27(3), pp. 379–423. Available: <http://cm.bell-labs.com/cm/ms/what/shannonday/shannon1948.pdf>
6. A. Tychopoulos, O. Koufopoulou, and I. Tomkos FEC in optical communications—A tutorial overview on the evolution of architectures and the future prospects of outband and inband FEC for optical communications // IEEE Circuits Devices, vol. 22, no. 6, pp. 79–86, Nov./Dec. 2006.
7. G. P. Agrawal Fiber-Optic Communication Systems // 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2002.
8. R. Blahut, Algebraic Codes for Data Transmission // Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press. [Online]. Available: <http://books.google.gr/books?id=eQs2i-R9-oYC>
9. «Optical Transport Network (OTN) tutorial» ITU, Geneva, Switzerland. [Online]. Available: <http://www.itu.int/ITU-T/studygroups/com15/otn/OTNtutorial.pdf>
10. Soft-Decision FEC: Key to High-Performance 100 G Transmission. [Online]. Available: http://www.huawei.com/ilink/en/solutions/broader-smarter/morematerial-b/HW_112021
11. Zolotarev, V., Ovechkin, G., Issainova, A., Satybaldina, D., Tashatov, N. Effective multithreshold decoding algorithms for wireless communication channels // In Proceedings of International Conference on Application of Information and Communication Technologies, AICT 2016 -, art. no. 7991760. ISBN: 978-150901840-6 (2016) doi: 10.1109/ICAICT.2016.7991760
12. Золотарев В.В., Сатыбалдина Д.Ж., Исайнова А.Н., Амангельдиев А.Н. Исследование характеристик полярных кодов для квантового распределения ключа// Сборник докладов V Международной научно-практической конференции «Интеллектуальные информационные и коммуникационные технологии – средство осуществления третьей промышленной революции в свете Стратегии «Казахстан-2050». - Нур-Султан, 2018. - Стр. 229-232.
13. Сатыбалдина Д.Ж., Ташатов Н.Н., Исайнова А.Н. Программные средства коррекции ошибок в телекоммуникационных системах // Монография. - Нур-Султан: ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, 2018. - 544 стр.