Плетнев Никита Сергеевич, курсант
Военная академия защиты информации
имени генерала армии С. М. Штеменко

Тарасенко Данил Иванович, курсант
Военная академия защиты информации
имени генерала армии С. М. Штеменко

Жеглов Андрей Алексеевич, курсант
Военная академия защиты информации
имени генерала армии С. М. Штеменко

Сычев Андрей Андреевич, студент
Санкт-Петербургский государственный университет

АНАЛИЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ МЕЖАППАРАТНЫХ ЛАЗЕРНЫХ КАНАЛОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОДОВ С МАЛОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ПРОВЕРОК НА ЧЕТНОСТЬ

Аннотация. Рассмотрена межаппаратная лазерная передача информации между космическими аппаратами военного назначения. Основное внимание уделено LDPC-кодированию, мягким оценкам при декодировании и перемежению при кратковременных пачках ошибок. Определены ограничения надежности канала при геометрических потерях, ошибках наведения, вибрациях и шумах приемного тракта.

Ключевые слова: Космический аппарат военного назначения, лазерный канал связи, помехоустойчивое кодирование, коды с малой плотностью проверок на четность, перемежение, вероятность битовой ошибки.

Введение

Современные космические системы военного назначения характеризуются ростом объема передаваемой служебной, телеметрической и целевой информации. Для обмена данными между космическими аппаратами военного назначения (далее – КА ВН) перспективны лазерные линии связи, в которых информационный сигнал переносится оптическим излучением. Узкая диаграмма направленности позволяет концентрировать энергию в ограниченном угловом секторе и повышает пространственную селективность канала. Под пространственной селективностью понимается способность передающей и приемной оптической системы преимущественно работать с излучением заданного направления и ослаблять влияние сигналов, приходящих из других направлений. Это физическое свойство облегчает пространственное разделение каналов, но само по себе не является средством обеспечения конфиденциальности.

В соответствии с ГОСТ Р 50922-2006 безопасность информации определяется через три базовых свойства: конфиденциальность, доступность и целостность [1]. В межаппаратной лазерной линии конфиденциальность связана с предотвращением раскрытия защищаемых данных, целостность – с сохранением данных без несанкционированных либо случайных искажений, доступность – с возможностью получения информации уполномоченным получателем в требуемый момент времени. Помехоустойчивое кодирование непосредственно не заменяет криптографическую защиту и не обеспечивает конфиденциальность. Его назначение состоит в снижении влияния случайных ошибок при передаче.

Цель работы состоит в последовательном анализе причин ошибок при передаче в межаппаратной лазерной линии связи между КА ВН и возможностей их уменьшения за счет кодов с малой плотностью проверок на четность и перемежения.

Основная часть

Межаппаратная лазерная линия формируется передающим и приемным оптическими терминалами, размещенными на двух КА ВН. Передающий тракт преобразует цифровые данные в последовательность модулированного оптического излучения, а приемный тракт собирает часть излучения пучка, преобразует ее фотоприемником в электрический сигнал и выполняет дальнейшую демодуляцию. Для космического участка характерны геометрическое расширение пучка, конечная точность взаимного наведения, вибрации и угловой джиттер платформы, относительное движение аппаратов, фоновое оптическое излучение и собственные шумы приемного тракта. Эти факторы не являются причиной цифровой ошибки, однако они уменьшают достоверность решения демодулятора и тем самым повышают вероятность неверного определения переданного бита.

Обобщенной энергетической характеристикой сигнала после фотоприема является отношение мощности полезной составляющей к мощности шума. В обозначениях, принятых в отечественной теории связи, оно может быть записано как [2]:

$$SNR = \frac{P_c}{P_ш} \quad (1)$$

где SNR – отношение сигнал/шум; Pс – мощность полезного сигнала в рассматриваемой полосе; Pш – мощность шума. Снижение SNR означает уменьшение различимости сигнальных состояний и рост вероятности ошибки при демодуляции.

Для количественной оценки цифровых искажений используется вероятность или экспериментальная частота битовых ошибок. Для конечной последовательности оценка записывается в виде [2]:

$$BER = \frac{N_{ош}}{N_\Sigma} \quad (2)$$

где BER – оценка вероятности битовой ошибки; Nош – число ошибочно принятых битов; $N\Sigma$ – общее число проверенных битов. Для межаппаратного лазерного канала кратковременное ухудшение наведения или увеличение джиттера способно приводить не только к отдельным ошибкам, но и к их группированию в короткие пачки. Такая временная структура ошибок особенно важна при выборе способа помехоустойчивой обработки.

Помехоустойчивое кодирование вводит в передаваемую последовательность контролируемую избыточность. Исходный информационный блок длиной k символов преобразуется в кодовое слово длиной n символов. Относительная скорость кода определяется отношением [3]:

$$R = \frac{k}{n} \quad (3)$$

При уменьшении R доля проверочных символов возрастает. Соответствующая относительная избыточность может быть представлена как:

$$\rho = 1 - R = \frac{n - k}{n} \quad (4)$$

Избыточность дает декодеру дополнительные связи между символами и позволяет обнаруживать и исправлять часть ошибок, однако одновременно уменьшает долю полезной информации в общем кодовом потоке и увеличивает требования к памяти и вычислительным ресурсам. Поэтому результат определяется не только величиной избыточности, но и структурой кода, длиной блока и алгоритмом декодирования [3].

Коды с малой плотностью проверок на четность, или LDPC-коды, относятся к линейным блочным помехоустойчивым кодам. Их название отражает главное свойство проверочной матрицы: большинство ее элементов равны нулю, а единиц сравнительно мало [3, 5]. За счет такой разреженности каждая проверка связывает ограниченное число битов, что позволяет организовать итеративное декодирование без перебора всех возможных кодовых слов. Для корректного кодового слова c выполняется условие:

$$H \cdot c^T = 0 \pmod 2 \quad (5)$$

где H – проверочная матрица кода; c^T – транспонированный вектор кодового слова. Практически это означает, что переданный блок должен одновременно удовлетворять набору проверок на четность. При наличии ошибок часть проверок перестает выполняться, и декодер уточняет вероятностные оценки отдельных битов на нескольких итерациях. В качестве входной информации особенно полезны мягкие оценки демодулятора, которые отражают не только принятое значение бита, но и степень уверенности в этом решении. Итеративный обмен такими оценками обычно описывается как алгоритм распространения доверия.

Последовательность обработки, представленная на рисунке 1, связывает физический и цифровой уровни линии. Кодер формирует избыточное кодовое слово, перемежитель изменяет порядок его символов, модулятор преобразует цифровую последовательность в поток светового излучения для лазерного передатчика. На приемной стороне выполняются обратные операции. Фотоприемник преобразует оптическую энергию в электрический сигнал, демодулятор формирует оценки символов, после чего деперемежитель восстанавливает исходный порядок, а LDPC-декодер использует проверочные связи для исправления части ошибок.



Рисунок 1. Структурная схема межаппаратной лазерной линии КА ВН с LDPC-кодированием

Кратковременные нарушения сопровождения могут формировать несколько соседних ошибочных символов. Для блочного кода такая пачка опаснее такого же числа ошибок, распределенных по разным блокам, поскольку локальная концентрация ошибок способна превысить возможности декодирования. Перемежение сохраняет сами символы, но изменяет их временной порядок перед передачей. После обратной перестановки на приемной стороне одна физическая пачка ошибок распределяется между несколькими кодовыми словами. В каждом отдельном блоке оказывается меньше поврежденных символов, поэтому вероятность успешного декодирования возрастает. Перемежитель сам по себе ошибок не исправляет и не повышает мощность принятого сигнала; его эффект проявляется только совместно с помехоустойчивым кодом. Увеличение глубины перемежения повышает устойчивость к более длинным пачкам, но увеличивает задержку и объем буферной памяти. Иллюстрация распределения ошибок приведена на рисунке 2.

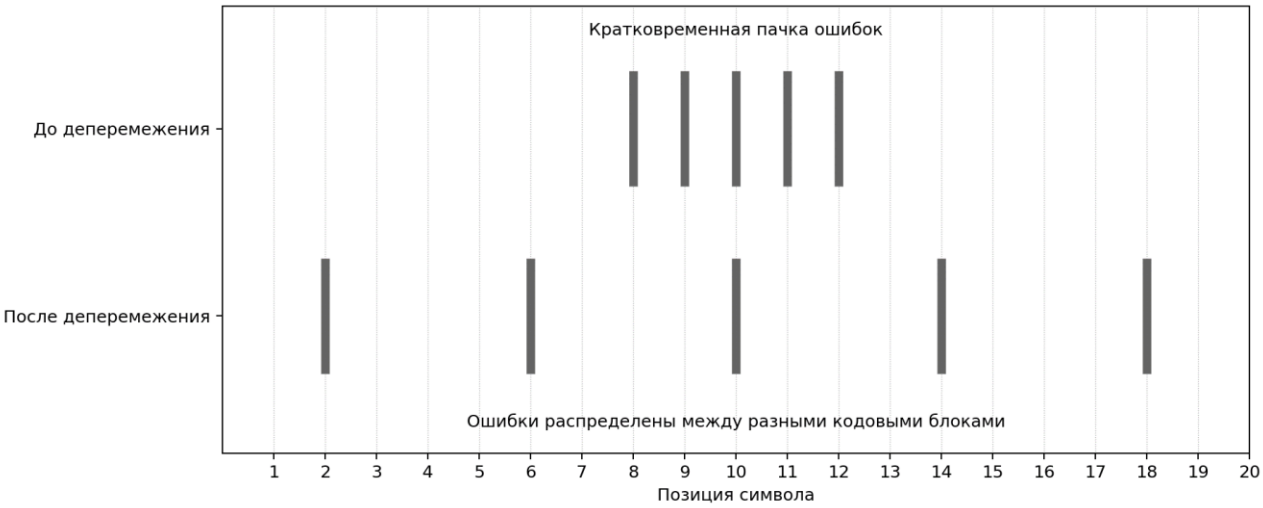


Рисунок 2. Условное распределение кратковременной пачки ошибок после деперемежения

Графовое представление LDPC-кода делает принцип декодирования наглядным. Битовые узлы соответствуют символам кодового слова, а проверочные узлы – уравнениям четности. Ребро показывает, что конкретный бит участвует в конкретной проверке. Разреженность матрицы H означает, что число таких связей существенно меньше максимально возможного. На каждой итерации битовые и проверочные узлы обмениваются уточненными оценками; процесс завершается при выполнении проверок или при достижении заданного числа итераций [3, 5]. Упрощенный граф Таннера представлен на рисунке 3.

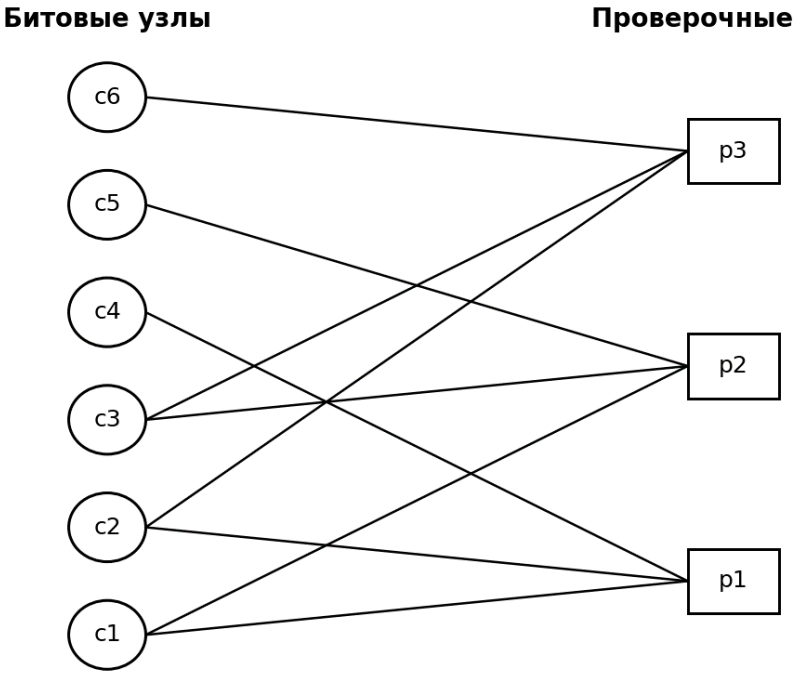


Рисунок 3. Упрощенный граф Таннера для кода с малой плотностью проверок на четность

В межаппаратной лазерной линии КА ВН практический эффект LDPC-кодирования определяется качеством входных оценок. При умеренном ухудшении принятого сигнала избыточность и проверочные связи позволяют восстановить часть искаженных битов. При глубоком снижении принятой мощности, длительной потере наведения либо существенном выходе пучка за пределы приемной апертуры исходной информации на входе демодулятора может оказаться недостаточно, и кодирование не компенсирует физический разрыв канала. Таким образом, LDPC-кодирование рассматривается как цифровой уровень повышения помехоустойчивости, а системы наведения, сопровождения и стабилизации сохраняют самостоятельное значение на физическом уровне.

Результат декодирования удобно характеризовать сравнением вероятности битовой ошибки до и после декодера. В общем виде эффективная работа помехоустойчивого кода соответствует условию:

$$BER_{вых} < BER_{вх} \quad (6)$$

Конкретная величина снижения ошибок не является постоянной характеристикой LDPC-кода. Она зависит от длины и скорости кода, структуры проверочной матрицы, типа модуляции, качества мягких оценок, числа итераций и характера ошибок в канале. По этой причине корректное научное описание не сводит эффективность к единственному универсальному значению выигрыша. С повышением избыточности и числа итераций возрастает вычислительная нагрузка, а накопление кодового блока и перемежение увеличивают задержку. Для систем военного назначения этот компромисс непосредственно связан с доступностью и целостностью информации: уменьшение остаточного числа ошибок повышает достоверность передаваемых данных, но чрезмерная задержка может снижать оперативность их получения.

В контексте трех базовых свойств безопасности информации назначение рассматриваемых средств разделяется однозначно. Конфиденциальность достигается средствами ограничения доступа и криптографической защиты; целостность поддерживается обнаружением и исправлением случайных искажений, а также отдельными механизмами контроля преднамеренной модификации; доступность зависит от сохранения работоспособности физического канала и способности цифрового тракта восстанавливать данные при допустимом уровне помех. Пространственная селективность лазерной линии уменьшает область, из которой эффективно принимается излучение, но не заменяет ни одно из этих средств и не должна трактоваться как самостоятельный принцип информационной безопасности.

Заключение

Межаппаратная лазерная линия между КА ВН представляет собой сочетание высоконаправленного оптического тракта и цифровой системы обработки данных. На физическом уровне ее устойчивость определяется энергетическим запасом, геометрией пучка, точностью наведения и сопровождения, вибрациями, угловым джиттером, фоновым излучением и шумами фотоприемного тракта. На цифровом уровне снижение отношения сигнал/шум проявляется ростом вероятности битовых ошибок, в том числе кратковременных пачек. Коды с малой плотностью проверок на четность используют разреженную проверочную матрицу и итеративное декодирование мягких оценок, что позволяет уменьшать число остаточных ошибок при сохранении достаточной информации на входе декодера. Перемежение дополняет этот механизм, распределяя локальные пачки ошибок между несколькими кодовыми блоками и тем самым повышая эффективность последующего декодирования. С позиции информационной безопасности такое кодирование связано прежде всего с поддержанием целостности и доступности передаваемой информации, тогда как конфиденциальность обеспечивается самостоятельными средствами защиты. Совместное рассмотрение физической устойчивости лазерной линии, LDPC-кодирования и перемежения формирует последовательную модель повышения надежности обмена данными между космическими аппаратами военного назначения без подмены задач помехоустойчивости задачами криптографической защиты.

Список литературы:

1. ГОСТ Р 50922-2006. Защита информации. Основные термины и определения. – Москва: Стандартинформ, 2008.

2. Зюко А. Г., Кловский Д. Д., Коржик В. И., Назаров М. В. Теория электрической связи: учебник для вузов / под ред. Д. Д. Кловского. – Москва: Радио и связь, 1999. – 432 с.

3. Кудряшов Б. Д. Основы теории кодирования: учебное пособие. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2016. – 400 с.

4. Иванов Ф. И., Зяблов В. В. Коды с малой плотностью проверок на четность, основанные на тройках Штейнера и матрицах перестановок // Проблемы передачи информации. – 2013. – Т. 49, № 4. – С. 41–56.

5. Минаев И. В., Мордовин А. А., Шереметьев А. Г. Лазерные информационные системы космических аппаратов. – Москва: Машиностроение, 1981. – 272 с.

6. Сравнительный анализ лазерных оптических и альтернативных каналов передачи информации / Д. И. Тарасенко, Н. С. Плетнев, Д. А. Потягов [и др.]. Социально-экономический форум «Устойчивое развитие сложных систем» (Санкт-Петербург, 4 июня 2026 г.) С. 38-46. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=91667465