

УДК 629.78 DOI 10.30894/issn2409-0239.2018.5.3.39.44

## Возможности применения интерливинга в адаптивном канале передачи данных измерений

**Д. И. Косарев**, аспирант, *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**Т. Т. Мамедов**, к. т. н., *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**В. А. Благодарев**, к. т. н., *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** В данной работе проведен обзор универсальной аппаратно-программной реализации алгоритма интерливинга для помехозащищенной передачи графической информации низкого разрешения с борта метеоспутников, созданной на основе рекомендаций Координационной группы по метеорологическим спутникам. Рассмотрены вопросы проведения эксперимента с целью оценки возможности создания универсального адаптивного алгоритма интерливинга.

Приведены параметры международного формата LRPT и рекомендуемый порождающий полином для вычисления контрольной суммы (CRC), применяемой при кодировании и декодировании измерительной информации.

Рассмотрен пример генерации проверочных слов (P и Q) путем побитового сложения по модулю 2 контрольной суммы CRC, обеспечивающих исправление как одиночных ошибок, так и двойных ошибок в слове.

**Ключевые слова:** помехозащищенное кодирование, передача информации, ПЛИС, порождающий полином

## Application of Interleaving in the Adaptive Channel for Measurement Data Transfer

**D. I. Kosarev**, postgraduate student, *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russia

**T. T. Mamedov**, Cand. Sci. (Engineering), *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russia

**V. A. Blagodirev**, Cand. Sci. (Engineering), *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russia

**Abstract.** This paper provides an overview of the universal hardware and software implementation of the interleaving algorithm for noise-protected transmission of low-resolution graphical information from a meteorological satellite based on the recommendations of the Coordination Group for Meteorological Satellites. The questions of carrying out the experiment with the purpose of evaluating the possibility of creating a universal adaptive algorithm of interleaving are considered.

The parameters of the international LRPT format and the recommended generating polynomial for calculating the checksum (CRC) used for encoding and decoding the measurement information are given.

An example of generation of test words (P and Q) is considered by bitwise modulo 2 addition of the CRC checksum, which provide correction of both single errors and double errors in the word.

**Keywords:** noise-resistant encoding, information transfer, FPGA generating polynomial

В процессе разработки и реализации радиолиний для передачи цифровых информационных потоков важно обеспечивать устойчивость к действию естественных и преднамеренных помех. Многие ошибки, возникающие в результате внешнего воздействия на радиосигнал, не одиночны по времени и возникают пачками. В подобных случаях длительности воздействующего мешающего сигнала достаточно для возникновения ошибок в нескольких подряд идущих битах.

Для сохранения целостности передаваемой информации применяются разнообразные алгоритмы помехозащищенного кодирования. Чаще всего они представляют собой комплекс нескольких методов, направленных на уменьшение потерь полезной информации при передаче, которые в совокупности дают положительный результат.

Применение алгоритмов помехозащищенного кодирования вошло в практику достаточно давно и применяется как совокупность различных методов, описанных в рекомендациях CCSDS. Наиболее часто применяются код Рида–Соломона совместно с интерливингом, в данном случае примером может служить международный формат LRPT [1] для передачи метеорологической информации с низкоорбитальных КА.

Формат LRPT (Low Rate Picture Transmission) обеспечивает переход от аналогового формата АРТ передачи ограниченного объема метеорологических данных с ухудшенным пространственным разрешением к цифровому, что повышает качество информации и обеспечивает возможность ее выдачи на средства отображения (принтеры, мониторы). Передача данных в формате LRPT построена на принципе пакетной телеметрии CCSDS, см. [2].

В формате LRPT поле проверочных символов не является обязательным. Оно должно содержать контрольную сумму (CRC). Рекомендуется вычислять CRC с использованием порождающего полинома вида

$$G(x) = X^{16} + X^{12} + X^1 + 1,$$

при этом как кодер CRC, так и декодер должны запускаться из состояния «все единицы». Допускается вместо описанной процедуры вычисления контрольной суммы использовать простой метод проверки на четность.

Метод интерливинга для защиты от воздействия пачечных ошибок заключается в перемежении битов или байт информации по заданному закону непосредственно перед передачей в эфир. После приема информация восстанавливается в обратной последовательности; если на нее было произведено воздействие пачечной помехи, то потери информации будут не значительны и ее можно будет обработать стандартными алгоритмами защиты от ошибок. Сами алгоритмы интерливинга могут меняться в зависимости от задачи и сферы его применения.

Работает метод интерливинга следующим образом. Например, исходный поток данных разбивается на фрагменты по 8 символов в каждом (байтовая структура). В рассматриваемом случае они будут называться словами-измерениями.

Для повышения помехоустойчивости передачи данных к последовательности из четырех слов во время операции кодирования добавляются два проверочных слова P и Q. Объединенные в единую последовательность, они представляют собой «предложение», состоящее из 48 бит (рис. 1).

Далее в лингвистическом модуле каждые 24 предложения объединяются в строку длиной в 1152 бита ( $24 \times 48 = 1152$ ), после чего над ней производится операция интерливинга (перемежения) для перераспределения слов ошибочного предложения по строке так, чтобы в каждом предложении находилось не более двух ошибочных слов.

Операция перемежения выполняет две функции. Первая — исправляет пачки ошибок при передаче цифровой информации, возникающие при сбоях ТМИ во время отделения элементов конструкции ракеты (кратковременные нарушения линии передачи информации). Вторая — дополнительная защита информации от несанкционированного доступа (НСД).

48 битовых предложений объединяют попарно (96 бит в строке), и для них формируется проверочный код CRC, посредством которого определяется наличие ошибок в предложении. При декодировании вычисленный заново CRC-код должен побитово совпадать с исходным CRC-кодом для соответствующих двух предложений, восстановленных при приеме информации. При этом любая ошибка в них вызовет несовпадение слов CRC с вероятностью  $P = (1 - 1/65\,536)$ . Исходный CRC-код



Рис. 1. Схема информационного предложения

Исходная последовательность																			
1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	...	1	2	3
После перемежения																			
5	6	1	8	3	4	2	7	5	6	1	8	3	4	2	7	...	5	6	1
После воздействия пачечных помех																			
5	6	1	8	3	4	2	7	5	6	1	8	3	4	2	7	...	5	6	1
Восстановленная последовательность																			
1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	...	1	2	3

Рис. 2. Пример воздействия пачечной помехи на последовательность битов, защищенных интерливингом

(алгоритм интерливинга) для каждого канала задается заранее.

Общая структура строки показана на рис. 2.

Для повышения помехозащищенности дополнительно генерируются проверочные слова P и Q. Проверочное слово P генерируется путем побитового сложения по модулю 2 всех четырех информационных слов предложения:

$$P = A + B + C + D.$$

Например, для исходных слов, представленных ниже [2],

$$\begin{aligned} A &= 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0, \\ B &= 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 1, \\ C &= 1\ 0\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0, \\ D &= 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0, \end{aligned}$$

слово P будет формироваться побитовым сложением по модулю 2, начиная с младшего бита ( $0 + 1 + 0 + 0 \equiv 1 \pmod{2}$ ) до старшего ( $1 + 0 + 1 + 1 \equiv 1 \pmod{2}$ ), в результате чего в итоге получается проверочное слово-вектор:

$$P = 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1.$$

Слово P является вектором проверки на четность для каждого из 8 бит исходных слов, и с его

помощью можно исправить по одной ошибке, появившейся в предложении, при условии точного знания номера слова, в котором ошибка произошла.

Слово Q генерируется умножением каждого слова (A, B, C, D) в предложении на порождающую матрицу T в соответствующей степени:

$$Q = T^4 \times A + T^3 \times B + T^2 \times C + T \times D.$$

При этом порождающая матрица T имеет вид:

$$T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Степени этой порождающей матрицы имеют вид:

$$T^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$T^3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$T^4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Вычисление кодовых конструкций дает следующие значения:

$$T^4 \times A = 10100110,$$

$$T^3 \times B = 01111101,$$

$$T^2 \times C = 11111001,$$

$$T \times D = 01000101.$$

Сложением соответствующих бит по модулю 2 получаем проверочное слово Q:

$$Q = 01100111.$$

В рассматриваемом примере все 48 бит предложения представляются в виде строки:

$$\underbrace{11001010}_A \underbrace{01001111}_B \underbrace{10111110}_C \underbrace{10100010}_D \underbrace{10011001}_P \underbrace{01100111}_Q.$$

Исправление одной ошибки, обнаруженной системой CRC в слове данных, осуществляется формированием синдрома по слову P:

$$S_p = A + B + C + D + P,$$

при этом правильное значение слова вычисляется путем побитового сложения по модулю 2-го слова, содержащего ошибку, и синдрома по P.

Если в предложении было две ошибки — одна в слове данных, а другая в слове Q, — то предложение рассматривается как несущее одну ошибку (Q отбрасывается).

Для двух ошибок, обнаруженных системой CRC в предложении, если одна из них находилась в слове данных, а другая в слове P, вычисляется синдром по слову Q:

$$S_q = T^4 \times A + T^3 \times B + T^2 \times C + T \times D + Q.$$

После этого синдром по Q умножается на матрицу, обратную порождающей матрице в степени, соответствующей номеру ошибочного слова. Результат этой операции суммируется по модулю 2 с ошибочно переданным словом, что приводит к восстановлению истинного значения.

Для двух ошибок, найденных системой CRC в словах данных (A, B, C, D), вычисляются синдромы как по P, так и по Q:

$$S_p = A + B + C + D + P,$$

$$S_q = T^4 \times A + T^3 \times B + T^2 \times C + T \times D + Q,$$

и решается система уравнений  $S_p$  и  $S_q$  относительно исправляемого слова  $E_i$ , в итоге будет получено решение

$$E_i = M(j-i) \times (S_p + T^{(j-4)} \times S_q),$$

где  $i$  — номер первого слова, в котором обнаружена ошибка;

$j$  — номер второго слова, в котором обнаружена ошибка;

$M(j-i)$  — матрица, обратная матрице  $(I + T^{(j-i)})$ ;

$I$  — единичная матрица.

Полученный корректирующий вектор суммируется по модулю 2 с соответствующим ошибочным словом, и одновременно с этим суммируется с синдромом по P, образуя исправляющий вектор для второго ошибочного слова, который, будучи просуммированным со вторым поврежденным словом, дает возможность восстановить все слова данных в полном объеме.

Интерливинг можно проводить как побитово, так и словами (по 8 бит) в предложении, при этом чем длиннее предложение, для которого производится перемежение и вычисляются синдромы, тем выше вероятность восстановления информации.

Необходимо заметить, если кадр (предложение) невелик, то интерливинг сможет эффективно

защитить информацию только от коротких пачечных помех. Для длинных пачечных помех противодействие интерливингом будет более эффективно только в большом кадре, в свою очередь аппаратная реализация в этом случае усложняется и возникает большая задержка при передаче информации.

Учитывая обозначенные выше ограничения, алгоритмы интерливинга могут меняться в зависимости от задачи и сферы его применения.

Изыщным решением поставленных разноплановых задач может стать создание устройства программно-аппаратной реализации универсального алгоритма интерливинга, которое, в зависимости от поставленной задачи, могло бы изменять длину кадра интерливинга, а следовательно, и количество линий задержки. Данное решение позволило бы оптимизировать затраты ресурсов на кодирование и декодирование информации.

На данный момент координационной группой по метеорологическим спутникам (Coordination Group for Meteorological Satellites (CGMS)) был выпущен документ LRPT/AHRPT Global Specification, который содержит рекомендации по кодированию, сжатию и передаче графической информации с низким (LRPT) и высоким (AHRPT) разрешением с борта КА. С учетом данного документа была создана аппаратура иностранных КА «Metop-A», «Feng Yun FY-3A, B, C» [3] и отечественных космических аппаратов метеорологической серии, причем на одном из них впервые в мировой практике был реализован международный формат LRPT с применением интерливинга. Передача информации в цифровом виде позволила увеличить разрешение. Так, при передаче трех каналов сканера AVHRR в формате LRPT, данные которых усечены до 8 бит и сжаты примерно в 8 раз, обеспечивается пространственное разрешение данных AVHRR — 1,1 км вместо 4 км в режиме АРТ.

Одним из методов, предложенных для улучшения качества передаваемой информации, в вышеупомянутом документе является алгоритм интерливинга. Он был реализован следующим образом.

Устройство [4–6] представляет собой набор сдвиговых регистров, в котором каждый поступающий на вход бит записывается в следующий по порядку регистр, а биты, поступившие ранее, сдвигаются на один такт. Устройство содержит 36 вет-

вей задержки (В). Величина элементарной задержки (М), то есть размерность базового сдвигового регистра, равна 2048 бит. Задержка в первой ветви устройства равна нулю, во второй — 2048, а в последней —  $35 \times 2048 = 71\,680$  тактов.

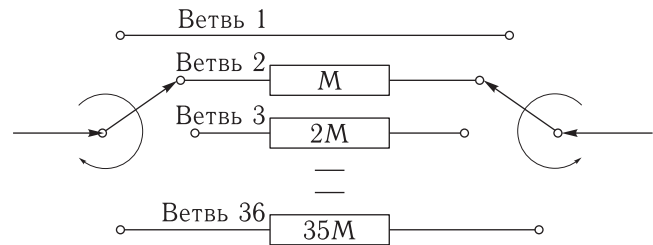


Рис. 3. Блок-диаграмма алгоритма интерливинга

Для решения данной задачи была использована программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) фирмы Actel AGL250 емкостью 250 тыс. вентилей и 2 микросхемы CY7C107D статической RAM-памяти 1 Мбит (1 Мбит  $\times$  1), так как реализовать хранение временной информации средствами ПЛИС оказалось невозможно.

Адресное пространство ОЗУ для простоты визуализации и работы с ним можно условно разбить на два диапазона от А0-А8 и А9-А19. Первый диапазон назовем блоками, второй — адресом бита в блоке. Таким образом, мы получаем на одной микросхеме 512 блоков, размер одного блока равным 2048 битам. Выбранное деление удобно для решения поставленной задачи, так как размер единичного блока равен размеру базового сдвигового регистра. Таким образом, первая микросхема ОЗУ используется полностью, во второй микросхеме задействованы 118 блоков (23%).

В программной реализации алгоритма ведется последовательный опрос каждой ветви интерливинга. Задается номер блока и адрес бита, производится его считывание, затем он выдается на выход, и в тот же момент по данному адресу производится запись пришедшего бита. В следующий раз к одной и той же ячейке памяти обращение произойдет спустя некоторое количество тактов, обусловленное задержкой по данной ветви. В каждой ветви номера блоков отличаются друг от друга на 36. В случае если ветвь интерливинга «пройдена», то алгоритм возвращается к адресу первого блока и бита в текущей ветви. В программе используется единый



счетчик номера бита в блоке и единый счетчик номера ветви, что позволяет значительно сэкономить вычислительные ресурсы.

Представленная реализация обладает модернизационным запасом, который позволяет оперативно изменять прошивку ПЛИС и увеличивать либо уменьшать количество линий задержки и кадр интерливинга. Вышеупомянутое свойство полезно для создания адаптивного алгоритма интерливинга, длина кадра которого могла бы изменяться в зависимости от помеховой обстановки в канале связи «космический аппарат–наземная станция приема». Для внедрения представленного решения необходимо знать:

1. Диапазон помех, возникающих в канале связи.
2. Частоту возникновения помех.
3. Характер помех.

Это возможно понять при исследовании канала связи. Целесообразно разделить его на два этапа:

1. Математическое моделирование.
2. Физическое моделирование.

Этап математического моделирования заключается в сборе теоретического материала по свойствам возникающих помех, созданию математической модели кодера интерливинга, канала связи и приемного устройства.

На данном этапе практический интерес может представлять изучение эффективности ранее предложенного алгоритма применительно к каналам связи с большей скоростью передачи информации. На первом этапе необходимо изучить модели с периодически возникающими пачечными помехами одинаковой величины. Путем последовательного изменения длительности помехи и частоты ее возникновения определить граничные условия существующего метода. Затем следует повысить скорость передачи данных и повторить предложенный выше эксперимент, после чего изменить параметры алгоритма:

- сначала увеличить, потом уменьшить длину кадра интерливинга относительно исходной (изменить число ветвей задержки, изменить величину элементарной задержки);
- увеличить интервал следования маркера синхронизации.

По результатам эксперимента необходимо выбрать оптимальные граничные параметры применения алгоритма, создать математическую модель обратной связи и исследовать ее в условиях лаборатории на макете аппаратуры.

Физическое моделирование осуществляется на лабораторном макете канала связи с имитацией помеховой обстановки.

## Список литературы

1. Шмельков К.И., Стрижевский В.А. и др. Разработка технических требований к системе передачи данных с низкоорбитальных КА в международном формате LRPT. М.: ФГБУ «НИЦ “Планета”»; Росгидромет, 2003. 54 с.
2. <http://www.ccsds.org/> (дата обращения: 20.08.2018).
3. Coordination Group for Meteorological Satellites Direct Broadcast Services LRPT/AHRPT Global Specification, CGMS Secretariat EUMETSAT, Am Kavaleriesand 31, P.O. Box 100555, D-64205 Darmstadt, Germany, 1998.
4. CDMA: кодирование и перемежение. Коды для системы CDMA — ключевое понятие, поскольку эта технология основана на кодовом разделении каналов / Л. М. Невдяев. <http://www.osp.ru/nets/2000/12/141602/> (дата обращения: 15.08.2018).
5. Перемежение (Interleaving). <http://celnet.ru/peredez.php> (дата обращения: 15.08.2018).
6. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: ИД «Вильямс», 2003. 1104 с.