

РЕАЛИЗАЦИЯ СВЕРТОЧНЫХ КОДОВ НА БАЗЕ ПЛИС

А. А. Никитин

ПАО «Ракетно-космическая корпорация “Энергия” им. С. П. Королева», г. Королев Московской обл.

Введение

Большинство бортовых систем управления космическими аппаратами строятся по многоканальной схеме. Для разработки таких систем лучше всего подходят программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). Они позволяют реализовать несколько идентичных по параметрам каналов на базе одной микросхемы. Схемы управления на базе ПЛИС позволяют добиться наиболее высокой точности синхронизации по сравнению с системами на микроконтроллерах и микропроцессорах.

На функциональность электрических схем систем управления космического аппарата влияет множество внешних факторов. Но самым непредсказуемым фактором, влияющим на все электронные схемы, является радиация.

Целью исследования является разработка алгоритмов и методов защиты ПЛИС от радиационных факторов космического пространства. В данной работе описана реализация одного из корректирующих кодов, а именно сверточного кода, на базе ПЛИС.

1. Отказы в ПЛИС

По типу последствий для радиоэлектронных компонентов радиационные факторы делятся на эффекты, вызванные накопленной дозой, и эффекты одиночных сбоев. Защита от накопленной дозы, влекущей за собой деградацию характеристик полупроводниковых элементов, лежит на плечах разработчика кристалла ПЛИС и соответственно находится вне нашего поля интересов. Поэтому в статье рассматриваются только эффекты одиночных сбоев.

Начнем с анализа физики процессов, протекающих в ПЛИС под действием радиации. Единичные сбои являются следствием попадания тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) и протонов в кристалл ПЛИС. Упомянутые типы частиц могут привести к кратковременным, потенциально катастрофическим или катастрофическим отказам электронных компонентов и систем, провоцируя ряд одиночных эффектов [1]:

- тиристорный эффект (радиационное защелкивание) – Single Event Latchup (SEL);
- переходная ионизационная реакция – Single Event Transients (SET);
- однократный восстанавливаемый сбой – Single Event Upsets (SEU);
- одиночный эффект пробоя подзатворного диэлектрика – Single Event Gate Rupture (SEGR);

– одиночный эффект выгорания – Single Event Burnout (SEB);

– к кратковременным отказам относятся SEU и SET, к потенциально катастрофическим – SEL, а к катастрофическим – SESE, SEB, SEGR и SES.

В работе учитываются кратковременные и потенциально катастрофические отказы, так как их суть сводится к возникновению одного или нескольких бит информации, сформированных на основе ошибочного переключения триггера.

2. Принцип работы и параметры сверточного кодера

Сверточное кодирование является одним из наиболее распространенных видов помехоустойчивого кодирования. Оно применяется в различных системах передачи информации. Но его также можно применять для защиты внутренних микропротоколов ПЛИС от единичных сбоев, вызванных попаданием ТЗЧ.

На рис. 1 представлена упрощенная структурная схема системы с применением сверточного кодирования. В ней источником информации является функциональный модуль, генерирующий входную последовательность $m = m_1, m_2, \dots, m_i, \dots$, где m_i – двоичный бит. Задачей кодера является преобразование каждой последовательности m в последовательность кодовых слов $U = G(m)$. Так как кодер обладает памятью, то каждое кодовое слово входной последовательности является зависимым от соседних бит. Под действием радиационных факторов космического пространства в последовательности входных слов могут происходить ошибки, в результате которых на входе декодера появляется последовательность Z . Задачей декодера в этом случае является определение исходной последовательности, исходя из априорных знаний о структуре кодера и ошибочной последовательности Z .

Для описания сверточного кодера достаточно задать тремя целыми числами k , n и K . Число k показывает количество входных символов, поступающих за один такт на вход сверточного кодера. Число n характеризует общее количество разрядов в соответствующем кодовом слове на выходе кодера, а отношение k/n называется скоростью кода. Она показывает меру избыточности кода. Еще одним важным параметром является длина кодового ограничения K , которая показывает число информационных входных символов, влияющих на выходные символы кодера в каждый момент времени [2].

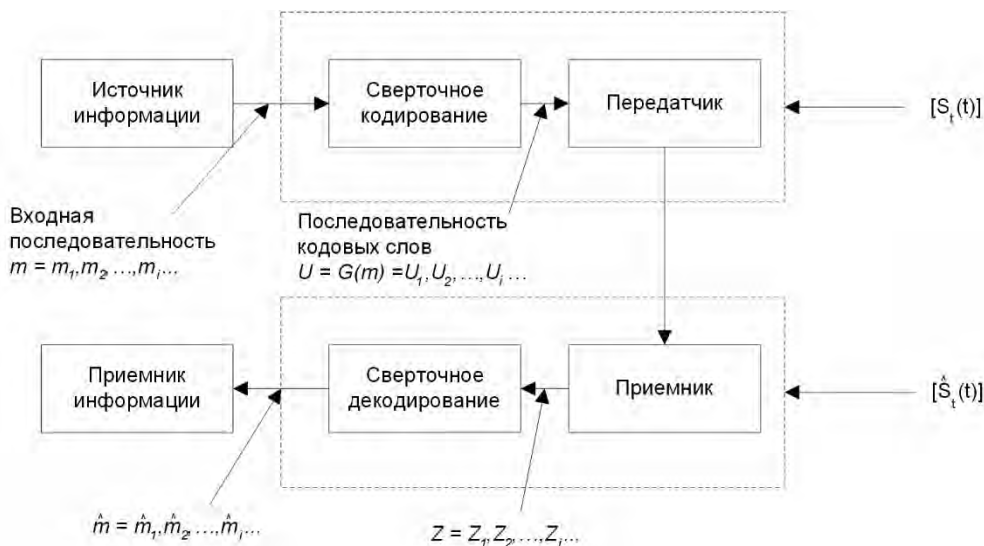


Рис. 1. Структурная схема системы с применением сверточного кодирования

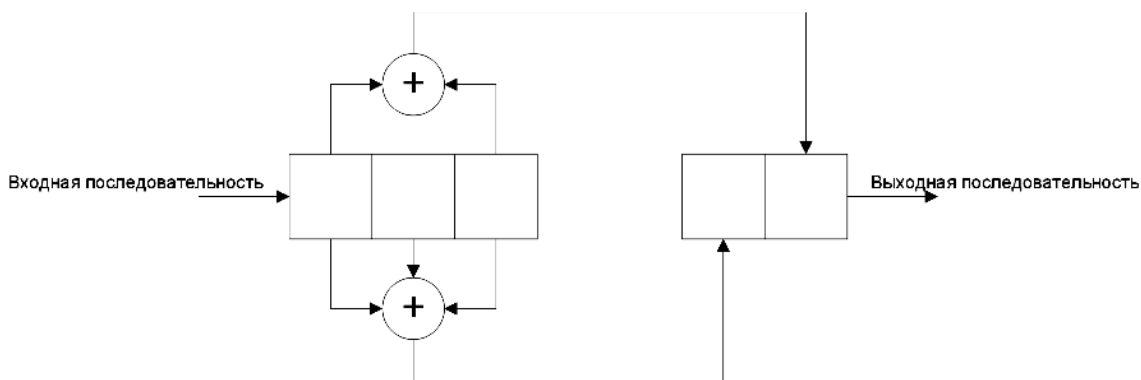


Рис. 2. Сверточный кодер со степенью кодирования 1/2 и $K = 3$

Пример сверточного кодера со степенью кодирования 1/2 и $K = 3$ приведен на рис. 2. Все символы по очереди поступают на вход регистра сдвига. После поступления нового символа происходит операция над словом, хранящемся в сдвиговом регистре. Далее вводится два нулевых входных бита для очистки регистра сдвига.

Для того, чтобы описать сверточный код, необходимо определить кодирующую функцию, то есть функцию, по которой можно по данной входной последовательности символов определить выходную последовательность. Самой наглядной и практичной является решетчатая диаграмма, представленная на рис. 3.

Решетчатая диаграмма показывает все возможные переходы кодера из предыдущего состояния в последующее. Решетка состоит из $2K-1$ узлов, где K – длина кодового ограничения. Каждый узел характеризует состояние кодера, то есть состояние регистра сдвига. При этом одна ветвь соответствует входному нулевому биту, а другая – входной единице. Цифры над переходом обозначают кодовые слова на выходе кодера. Сплошная линия обозначает входной «0», а пунктирная – входную «1».

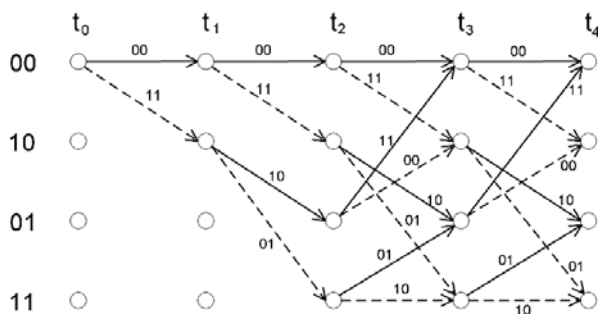


Рис. 3. Пример решетчатой диаграммы сверточного кода

3. Алгоритм сверточного декодирования Витерби

Главным достоинством алгоритма Витерби является то, что в нем не рассматриваются пути, которые согласно принципу максимального правдоподобия не могут быть оптимальными. Алгоритм включает в себя операции вычисления расстояния между принятым сигналом в момент времени t_1 , и всеми путями решетки, которые входят в каждое состояние в момент времени t_1 . Если в одно состояние входят два пути, то выбирается выживающий путь с наименьшей

метрикой. В результате работы декодер постепенно проходит решетку и исключает наименее вероятные пути.

Рассмотрим работу алгоритма Витерби на конкретном примере. В качестве меры расстояния используем метрику Хэмминга. Воспользуемся кодом, изображенным на рис. 2. Предположим, что мы имеем входную информационную последовательность $m = 1101$. После кодирования ее сверточным кодером получаем последовательность $U = 11010100$, которая передается по каналу связи. В результате ошибки, вызванной попаданием ТЗЧ в кристалл ПЛИС, принятая последовательность будет иметь вид $Z = 11011100$, т. е. имеет место искажение одного символа, а именно пятого бита.

На рис. 4 представлена решетчатая диаграмма, в которой над каждой ветвью обозначено расстояние Хэмминга между принятым кодовым символом и кодовым словом, соответствующим данной ветви. Рассмотрим решетку в момент времени t_1 . Переход между состояниями $00 \rightarrow 00$ приводит к появлению на выходе кодового слова 00 , но получено 11 , следовательно, Хэммингово расстояние равно 2. Переход между состояниями $00 \rightarrow 10$ приводит к появлению на выходе кодового слова 11 , что полностью совпадает с полученной последовательностью, и, следовательно, Хэммингово расстояние равно 0. Таким образом помечается вся решетка в последующие моменты времени.

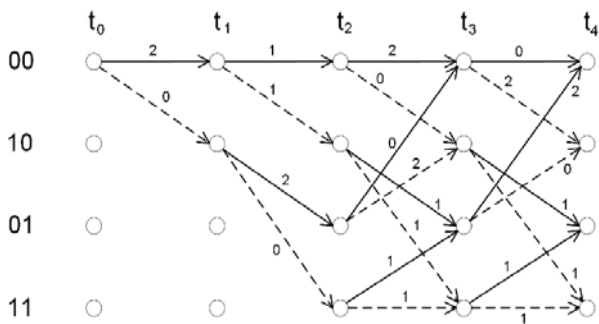


Рис. 4. Решетчатая диаграмма, соответствующая принятой последовательности $Z = 11011100$

В момент времени t_2 из каждого предыдущего состояния выходят еще 2 ветви. Стоит обратить внимание, что до момента t_2 из всего набора ветвей можно выделить ветвь, для которой Хэммингово расстояние равно 0, что говорит о том, что осуществлен переход к правильному значению. Как видно из рис. 5, к моменту времени t_3 мы имеем два перехода с одинаковым значением, что говорит об ошибке в принятом значении. Выбор правильного пути будет осуществлен по результатам следующей итерации определения метрики путей, обозначенных, соответственно, через Γ_{00} , Γ_{10} , Γ_{01} и Γ_{11} .

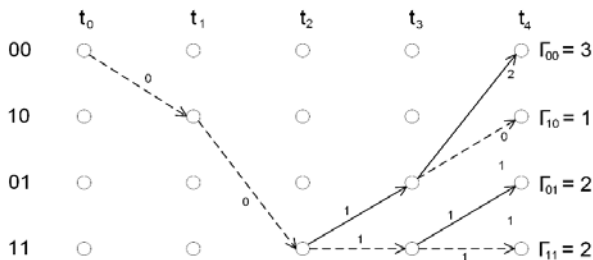


Рис. 5. Решетчатая диаграмма выбора пути при ошибке

4. Реализация декодера Витерби на ПЛИС

Из [3] можно выделить три основные Модели реализации декодера Витерби:

- 1) последовательная реализация;
- 2) параллельная реализация;
- 3) гибридная реализации.

Для реализации на ПЛИС наиболее выигрышной является параллельная реализация, так как она позволяет снизить тактовую частоту за счет параллельности процессов.

Структурная схема параллельной реализации декодера Витерби приведена на рис. 6.

В состав параллельного декодера можно выделить три основных блока:

- блок вычисления метрик путей;
- блок обновления метрик путей;
- блок обратной трассировки путей.

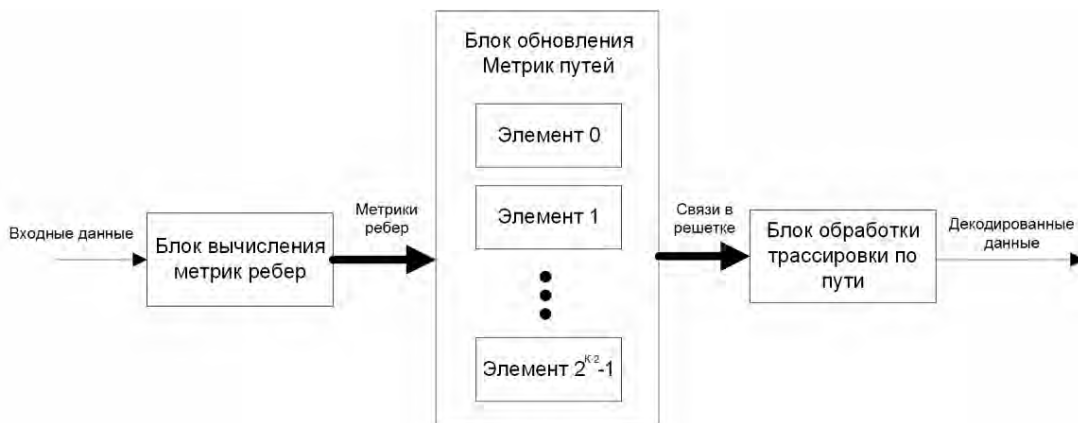


Рис. 6. Структурная схема параллельного декодера Витерби

На первом этапе происходит вычисление метрик ребер. Блок обновления метрик путей в соответствии с полученными метриками ребер вычисляет две или четыре метрики путей. Количество метрик путей зависит от того, получили в момент прихода предыдущего кодового слова несколько путей одинаковые метрики.

В работе реализованы две версии параллельного декодера. Первая версия [4] реализует декодер, вычисляющий все возможные метрики путей, то есть соответствует решетчатой диаграмме, представленной на рис. 4. Вторая версия реализует декодер, определяющий один путь с наименьшей метрикой, называемый выживающим [5, 6]. Вторая версия реализации действует в соответствии с решетчатой диаграммой, представленной на рис. 5.

Первая версия использовалась для отработки блока вычисления метрики ребер и блока обновления метрики путей. Поэтому она реализовывалась на нерезионно-стойкой Actel A3PE1500.

Вторая версия реализовывалась на радиационно-стойкой ПЛИС 5576XC7T производства ОАО «ВЗПП-С», имеющей 1728 логических элементов. Оптимизированная версия заняла 465 логических элементов, что равно 27 процентам. Выбранный кристалл является первым в линейке ПЛИС российского производства, следующие модели радиационно-стойких ПЛИС будут обладать большей емкостью, что позволит использовать разработанный декодер более эффективно.

5. Стенд для тестирования сверточных кодов

Для проверки реализации и получения статистики исправления ошибок был реализован стенд, структурная схема которого представлена на рис. 8 и включает в себя:

- отладочную плату на базе ПЛИС 5576XC7T;
- отладочную плату на базе ПЛИС Actel A3PE1500-PQ208;
- персональный компьютер.

Персональный компьютер по COM-порту пересылает в отладочную плату для ПЛИС Actel ProASIC3 исходные данные, представляющие из себя 5-битовую последовательность. Как показано на рис. 7, на ПЛИС Actel3PE1500 исходные данные кодируются сверточным кодом со степенью кодирования $1/2$ и $K = 3$.

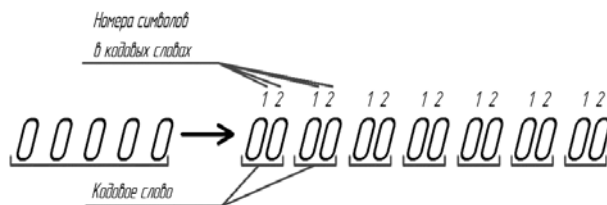


Рис. 7. Формат исходных и закодированных данных

Симулятор ошибок моделирует единичный сбой, вызванный попаданием ТЗЧ. Исходя из возможных сценариев, были выбраны единичные ошибки и двойные ошибки: 11, 101, 1001, 10001, 100001, где 0 – достоверный бит, а 1 – скомпрометированный бит. Выбор двойных ошибок объясняется тем, что один входной бит влияет на три следующих двухбитных кодовых слова. Анализ ошибок производился исходя из расположения скомпрометированных бит по кодовым словам.

Результатом реализации стенда, представленного на рис. 8, стал массив, содержащий все реально возможные варианты ошибок, вызванных радиационными эффектами космического пространства, для всех возможных исходных данных.

Результаты реализации сверточных кодов представлены в таблице, где количество вариантов отказов равно произведению числа возможных вариантов ошибки одного типа на число возможных исходных слов (в условиях тестирования оно равно $2^5 = 32$).

Стоит пояснить, что ошибки четвертого типа исправляются с вероятностью 100 %, если скомпрометированные символы находятся не в соседних кодовых словах.

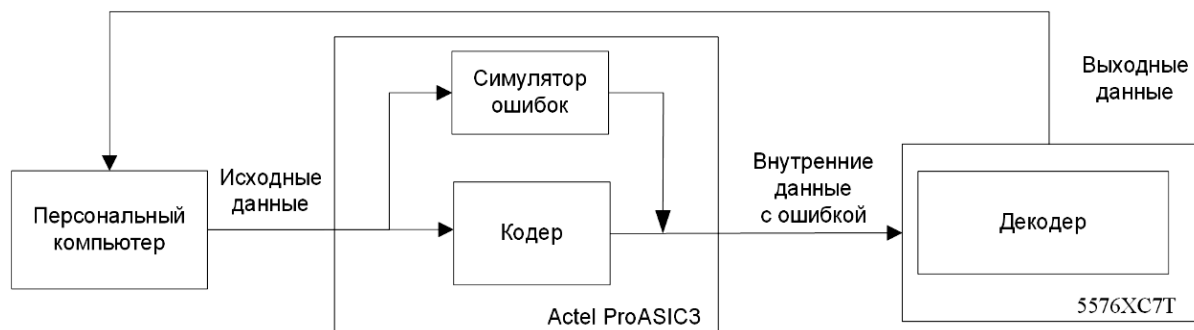


Рис. 8. Структурная схема реализованного стенда

№	Тип ошибки	Кол-во вариантов отказов	Исправленных ошибок, шт.	Исправленных ошибок, %
1	1	384	384	100
2	11	352	0	0
3	101	320	0	0
4	1001	288	144	50
5	10001	256	256	100
6	1000001	224	224	100

Выводы

В работе был рассмотрен один из методов борьбы с единичными отказами в ПЛИС, вызванными попаданием ТЗЧ.

Реализованный декодер занял в единственной радиационно-стойкой ПЛИС российского производства 27 % емкости, что непозволительно много для схемы защиты локального протокола. Но перспективные разработки радиационно-стойких ПЛИС повышенной емкости позволяют применять рассмотренный в работе метод.

Чтобы произошли ошибки типов 11, 101, или 1001, ТЗЧ должна попасть в определенную часть кристалла ПЛИС, имеющего площадь 12,96 мм², два раза за время, кратное одной, двум или трем периодам. Данное стечение обстоятельств является крайне маловероятным. Анализируя результаты тестов (см. таблицу), можно сделать вывод, что вероятность исправления ошибок, вызванных попаданием ТЗЧ в кристалл ПЛИС равно 100 %. Но чтобы попадание одной ТЗЧ вызывало возникновение только одной ошибки, приемопередатчик и декодер должны строиться на принципе независимости выходной информации логических элементов одного такта от другого. Данная задача является отдельной и будет рассмотрена в следующих работах.

Литература

1. Таперо К. И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения : [монография] / В. Н. Улимов, А. М. Членов, К. И. Таперо. 2-е изд. (эл.)– М.: Лаборатория знаний, 2014. С. 297.
2. Синицин Д. В. Повышение помехоустойчивости радиотехнических систем передачи информации с использованием сверточных алгоритмов обработки сигналов [Текст]: дис. канд. тех. наук: 05.12.04: защищена 22.01.14: утв. 15.07.14 / Дмитрий Вячеславович Синицин. – Владимир, 2014. С. 127.
3. Воробьев А. А., Воробьев К. А., Негрозов Е. А. Сравнение различных вариантов реализации декодера Витерби на ПЛИС [Текст]: А. А. Воробьев // Технологи информационного общества. – 2012. № 11. С. 13–16.
4. Кларк Дж., сл. Кейн Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи [Текст] / С. И. Гельфанда; пер. с англ. Б. С. Цыбакова. – М.: Радио и связь, 1987. С. 392.
5. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролируемых ошибки [Текст] / Блейхут Р.; пер. с англ. И. И. Грушко, В. М. Блиновский. – М.: Мир, 1986. С. 576.
6. Морелос – Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применения: пер. с англ. / Р. Морелос – Сарагоса. – М.: Техносфера, 2005. С. 320.