**3 ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ИМИТАЦИОННО-ОБУЧАЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ ПО ИЗУЧЕНИЮ И ОЦЕНКЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ И КОРРЕКТИРУЮЩИХ СВОЙСТВ КОДОВ ХЭММИНГА**

Анализ диагностических и корректирующих свойств помехоустойчивых кодов является актуальной задачей в связи с необходимостью учета их при оценке надежности автоматизированных систем, выборе наиболее эффективного метода обнаружения и исправления ошибок в различных системах передачи и хранения информации.

Во многих случаях при хранении и передаче информации используется блоковый код Хэмминга, изучение которого предусмотрено рабочими программами учебных дисциплин по соответствующим направлениям подготовки специалистов. К сожалению, на практике, изучение этого вопроса, даже для специалистов по автоматизированным системам специального назначения, заканчивается утверждениями, что код Хэмминга позволяет обнаружить и исправить одиночную ошибку, а также обнаружить ошибку двойной кратности. Для повышения диагностических возможностей применяется расширенный (модифицированный) код Хэмминга, который позволяет, кроме того, обнаружить ошибку тройной кратности.

Очевидно, что в условиях все более широкого применения помехоустойчивого кодирования требуется более глубокое изучение специалистами в области информационных технологий диагностических и корректирующих возможностей (свойств) кодов Хэмминга на основе использования программных моделей, позволяющих представить процесс функционирования канала связи в наглядном виде, а также оценить характеристики этого кода. В статье анализируются проверочные и исправляющие свойства кода Хэмминга, обосновывается структура и методика использования имитационно-обучающей программы для их оценки.

В системах хранения и передачи информации, в которых для обнаружения и исправления ошибок используется код Хэмминга, анализ принятого кода с известной структурой на наличие в нем ошибок осуществляется [1] путем вычисления так называемого *синдрома* . Вычисление компонент синдрома осуществляется на основании специальных проверочных уравнений, основу которых составляют правила арифметики по модулю 2.

Равенство нулю всех компонент синдрома означает, что в поступившем на декодер кодовом слове ошибки отсутствуют. Если же хотя бы одна из компонент не равна нулю, то делается вывод о наличии в принятом кодовом слове ошибки. В последнем случае, в зависимости от принятой в системе стратегии, принятое информационное слово или «стирается», или производится запрос на его повторную передачу. В случае одиночной ошибки использование синдрома позволяет определить позицию в проверяемом слове, в котором она произошла, и исправить ее.

Таким образом, классическими случаями, рассматриваемыми при изучении кода Хэмминга, являются варианты, когда имеет место безошибочная передача информации и исправление действительно искаженного разряда принятого слова. Но в силу формальных правил функционирования декодера возможны и другие варианты:

передача информации с неисправляемой ошибкой;

выдача потребителю ошибочного информационного слова.

В первом случае в канале произошли ошибки, приведшие к новой разрешённой кодовой комбинации, что не позволяет декодеру обнаружить ошибку в кодовой комбинации.

Второй случай связан с реакцией системы на групповые ошибки, когда декодер реагирует на них как на одиночные. В результате на основании сформированного синдрома формируется ошибочное информационное слово, которое выдается потребителю.

Очевидно, что декодер может выдавать потребителю ошибочное информационное слово тогда и только тогда, когда в канале произошли не обнаружимые ошибки, или кратность канальной ошибки превышает корректирующую способность кода.

Эффективность конкретного кода зависит от области его применения и, в особенности, от канала связи. Если информация передается по каналу с аддитивным белым гауссовским шумом, то ошибки в кодовом слове независимы. Если при этом отношение сигнал/шум достаточно велико, то вероятность одиночной ошибки во много раз превышает вероятность ошибок высших кратностей, поэтому, использование в таком канале кода Хэмминга с исправлением однократной ошибки может оказаться весьма эффективным. С другой стороны, в каналах, где преобладают многократные ошибки (например, в каналах с замираниями), исправление одиночных ошибок лишено смысла. При практическом выборе конкретного помехоустойчивого кода необходимо также учитывать скорость его декодирования и сложность технической реализации. Сказанное обосновывает необходимость выбора наиболее эффективного метода обнаружения и исправления ошибок для каждого конкретного канала [2].

Таким образом, с точки зрения выявления и исправления ошибок классическим кодом Хэмминга могут иметь место три варианта приема и декодирования информации:

* в первом случае, декодер выдает потребителю переданное слово, исправляя при этом возникающие в канале ошибки;
* во втором случае, потребителю выдается ошибочное слово, тем не менее, ошибка распознается;
* в третьем случае, имеет место необнаруженная ошибка.

Выявление этих трех случаев в моделирующих программах позволяет получить показатели эффективности помехоустойчивых кодов. Их эффективность оценивается, прежде всего, *вероятностью не обнаружимой ошибки*. При этом считается, что ошибка не обнаруживается, если посланное кодовое слово в канале переходит в другое разрешенное кодовое слово. Указанная вероятность зависит, в первую очередь, от отношения сигнал/шум в канале, на основании которого рассчитывается вероятность битовой ошибки при передаче информации по каналу связи.

Оценка эффективности кода Хэмминга осуществляется в двух режимах: режиме исправления или режиме обнаружения ошибок.

В *режиме исправления ошибок* исправляются все одиночные ошибки в кодовой комбинации, следовательно, вероятность остаточной ошибки при декодировании равна вероятности того, что в кодовой комбинации произойдёт более одной ошибки. Для кода Хэмминга (7,4) эта вероятность определяется на основе выражения:

Для малых *p*

В *режиме обнаружения ошибок* гарантированно обнаруживаются две ошибки, т.е. вероятность необнаруженной ошибки определяется как вероятность того, что в принятой кодовой комбинации будет более двух ошибочных элементов. Для кода Хэмминга (7,4) эта вероятность определяется на основе выражения

Для малых *p*

Очевидно, что помехоустойчивое кодирование позволяет уменьшить вероятность не обнаружимой ошибки на определенную величину. Однако применение кодирования увеличивает эту вероятность за счет увеличения объема передаваемой информации (эта величина определяется характеристиками кода). Поэтому, как правило, производится расчет эффективной скорости передачи с учетом доли информационных бит в кодовом слове [1].

Показатели помехоустойчивого кодирования могут быть повышены за счет применения так называемых расширенных (модифицированных) кодов Хэмминга. Их отличие от классических заключается в дополнении кодового слова дополнительным двоичным разрядом таким образом, чтобы число единиц, содержащихся в каждом кодовом слове, было четно. Коды Хэмминга с проверкой на четность обладают следующими двумя преимуществами:

длины кодов увеличиваются с до что удобно с точки зрения хранения и передачи информации;

минимальное расстояние расширенных кодов Хэмминга равно 4 вместо 3, что дает возможность обнаруживать 3-кратные ошибки и ниже.

Кроме того, благодаря наличию в кодовых словах дополнительного разряда проверки на четность существенно улучшается режим коррекции ошибок. Действительно, если при одиночной ошибке всегда сигналы четности передаваемого и принятого кодового слова не равны между собой, то при двукратной ошибке, наоборот. Это позволяет сформулировать улучшенный алгоритм коррекции ошибок в расширенном коде Хэмминга:

если сигналы четности передаваемого и принятого кодового слова не равны между собой, то производится исправление одиночной ошибки;

если же сигналы четности передаваемого и принятого кодового слова равны между собой и синдром ошибки не равен нулю, то считается, что в канале произошла неисправляемая ошибка и принятое слово или должно быть стерто, или в обратный канал должен быть подан сигнал переспроса.

Таким образом, код Хэмминга с проверкой на четность способен или только обнаруживать ошибки, кратности не выше трех, или исправлять все одиночные ошибки и, одновременно, обнаруживать все двукратные.

3.1 Принцип построения имитационно-обучающей программы

Принцип построения имитационно-обучающей программы основан на передаче демонстрационного текста по каналу с кодированием информации на основе обычного (7,4) и расширенного (модифицированного) кода Хэмминга, имитации появления в канале ошибок определенной кратности, моделировании процесса выявления и исправления ошибок, графическом выводе в соответствующие окна полученных результатов, подсчёте числа ошибок и выводе исходного и принятого текстов в окно для сравнения. Демонстрационный текст позволяет наглядно пронаблюдать за процессом исправления (обнаружения) ошибок, а также увидеть результаты работы декодера на конкретном осмысленном тексте.

При передаче демонстрационного текста каждый символ кодируется примитивным кодом в соответствии с таблицей символов ASCII, затем полученная 8-разрядная комбинация разбивается на две комбинации по 4 разряда, каждая из которых кодируется кодом Хэмминга. Ошибочным считается блок, в котором после декодирования осталась хотя бы одна ошибка. Ошибки в битах подсчитываются непосредственно.

Однако малый объём демонстрационного текста не позволяет получить достоверный конечный результат, т.е. число или частоту ошибок на выходе декодера. Поэтому наряду с демонстрацией осуществляется статистическое моделирование, в процессе которого кодируется, передаётся и декодируется заданное пользователем число кодовых блоков. Ошибочным считается блок, в котором после декодирования осталась хотя бы одна ошибка.

В первом и втором режиме программы демонстрируется функционирование канала с кодированием информации на основе кода Хэмминга (7,4) (рис. 1). В процессе демонстрации программа делает запросы обучающемуся на ввод им получаемых в процессе функционирования канала результатов, которые контролируются программой с выдачей обучающемуся соответствующих сообщений, подсчитывается количество допущенных им ошибок. Таким образом, одновременно с наглядной демонстрацией протекающих в канале процессов, осуществляется контроль усвоения обучающимся их содержания.



Рисунок 1 – Схема контроля передачи данных между регистрами на основе кода Хэмминга

В свою очередь, коды Хэмминга исследуются в двух режимах: обнаружения и исправления ошибок.

В *режиме обнаружения*, если обнаружена ошибка, то делается перезапрос последней кодовой комбинации. Число перезапросов не превышает 8. Если ошибки в кодовой комбинации не обнаружены или превышено число перезапросов, то передаётся следующая кодовая комбинация.

Пользователю (обучающемуся) предлагается, задавая значения p, пронаблюдать за передачей демонстрационного текста, убедиться, что в ошибочно декодированных блоках остались в основном три (четыре) и более ошибок. Объяснить наличие остаточных одиночных и двойных ошибок.

В третьем и четвертом режиме программы осуществляется передача одного слова побитно и блоковая передача текста соответственно. При этом в данных режимах процессу преобразования символа не уделяется внимание. Обучающемуся важно понять, каким образом осуществляется передача слова и текста.

В *режиме исправления* коды Хэмминга позволяют исправить одну ошибку. Пользователь, задав значения p, наблюдает за передачей демонстрационного текста, убеждается, что все одиночные ошибки исправляются.

Реализация и использование имитационно-обучающей программы в соответствии с рассмотренным принципом и методическими рекомендациями позволит обучающимся глубже уяснить процесс функционирования трактов передачи и хранения информации, в которых используются коды Хэмминга, более четко понимать их свойства по выявлению и исправлению ошибок, использовать результаты статистической оценки диагностических и корректирующих характеристик этих кодов при расчете показателей надежности автоматизированных систем и их составляющих.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вернер М. Основы кодирования. Учебник для вузов. – М.: Техносфера, 2004. – 288 с.

2. Чингаева А.М. Исследование линейных блочных кодов. Методическая разработка к лабораторной работе. – Самара, ГОУВПО ПГАТИ, 2004. – 15 с.