

*МАРКОВСКИЙ А.П.,
ТУРЧЕНКО Ю.А.,
КОВАЛЬЧУК А.В.*

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ОШИБОК ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В ЛИНИЯХ С АМПЛИТУДНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

В статье предлагаются подходы к повышению эффективности обнаружения ошибок в линиях с амплитудно-импульсной модуляцией. Предложенные подходы основаны на учете специфических особенностей ошибок, которые возникают в таких линиях. Первый подход состоит в модификации CRC для линий с амплитудно-фазовой модуляцией. Второй подход основан на использовании взвешенных контрольных сумм. Разработан способ формирования компонент взвешенной контрольной суммы. Показано, что предложенная модификация контрольной суммы обеспечивает большую надежность контроля ошибок передачи данных в линиях с амплитудно-импульсной модуляцией по сравнению с CRC.

In paper an approaches for increasing the effectiveness of error detection in computer network channels with Pulse-Amplitude Modulation (PAM) has been proposed. Proposed approaches are based on consideration of special feature of errors which are appearances in line with PAM. The first approach consist of CRC modification specifically for line with PAM. The second approach is base of weighted checksums using. The way for checksum components coding has been developed. It has been shown that proposed checksum modification ensure superior digital data control transformation reliability for channels with PAM in compare to CRC.

Введение

Одним из определяющих факторов прогресса во всех областях человеческой деятельности является развитие информационной интеграции на основе компьютерных технологий и систем телекоммуникаций. Важной проблемой усовершенствования технологий информационного обмена является обеспечение высокой надежности передачи данных в шинах вычислительных систем и линиях компьютерных сетей. В современных условиях актуальность проблемы обеспечения высокой достоверности передачи цифровых данных возрастает. Это обусловлено рядом факторов, наиболее значимым из которых является повышение скорости передачи и, соответственно, увеличение негативного воздействия межсигнальной интерференции. На увеличение числа ошибок, вызванных внешними электромагнитными полями, оказывает влияние резкий рост их интенсивности, обусловленный динамичным расширением использования средств мобильной связи и беспроводных линий передачи данных компьютерных сетей. С другой стороны, продолжается процесс расширения исполь-

зования информационных технологий во всех сферах человеческой деятельности, включая те, которые связаны с техногенным риском, что ужесточает требования, предъявляемые к надежности всех компонент вычислительных систем и компьютерных сетей, включая средства передачи цифровых данных. Принимая во внимание рост объемов передаваемой в вычислительных системах и сетях информации, особенно важным является повышение надежности процессов передачи путем обеспечения гарантированного обнаружения наиболее часто встречаемых ошибок. Таким образом, поступательное развитие техники передачи данных требует адекватного совершенствования средств обеспечения высокой достоверности передачи данных в системах и сетях вычислительной техники.

Для повышения пропускной способности, в компьютерных сетях широко используются линии со спектральной и амплитудной модуляцией цифровых данных [1]. Основной особенностью такой модуляции является то, что передача группы битов контролируемого блока осуществляется одним канальным сигналом. В частности, амплитудно-импульсная модуляция цифровых данных применяется в телефонных и кабельных линиях компьютерных сетей [1,2]. Обнаружение ошибок в таких линиях имеет специфические особенности, которые не в полной мере учитываются существующими средствами обнаружения ошибок. Исходя из этого, важной и актуальной задачей представляется анализ особенностей возникновения ошибок в линиях с модуляцией, а также разработка способов повышения эффективности средств контроля за счет их адаптации к выявленным особенностям.

Непрерывный рост скоростей передачи цифровых данных в современных компьютерных системах с одной стороны имеет следствием увеличение числа ошибок, вызванных межсимвольной интерференцией, а с другой – диктует жесткие требования к производительности средств контроля ошибок: она должна быть соизмеримой с пропускной способностью канала [1]. Эти обстоятельства определяют необходимость радикального повышения надежности средств контроля ошибок, обладающих повышенным быстродействием и допускающих распараллеливание при реализации аппаратными средствами. К таким средствам относится контрольная сумма, надежность обнаружения ошибок с использованием которой уступает циклическим кодам, однако, в отличие от последних может вычисляться параллельно [2].

Таким образом, особенности современного этапа развития и использования компьютерных технологий обуславливают актуальность и практическую важность разработки новых и совершенствования известных средств обеспечения надежности передачи и хранения данных в компьютерных системах.

Анализ современного состояния проблемы обеспечения надежности передачи данных в линиях с амплитудно-импульсной модуляцией

Учитывая относительно небольшую интенсивность возникновения ошибок передачи данных в шинах вычислительных систем и проводных линиях компьютерных сетей, действующими протоколами регламентируется использование технологии ARQ (Automatic Repeat Request), которая предусматривает при обнаружении ошибок повторную передачу контролируемого блока данных. Наиболее распространенными средствами обнаружения ошибок передачи цифровой информации в компьютерных системах и сетях являются циклические избыточные коды (CRC-Cyclic Redundancy Check), и контрольные суммы (CS-Check Sum). CRC с образующим полиномом степени n позволяет обнаруживать все ошибки нечетной кратности, все ошибки кратности 2, а также пачки ошибок, длина которых не превышает n [3]. CS позволяет гарантированно обнаруживать только ошибки нечетной кратности, однако по сравнению с CRC контроль с использованием CS выполняется намного проще и быстрее.

В низкочастотных линиях передачи цифровых данных компьютерных сетей для повышения пропускной способности достаточно часто используется амплитудно-импульсная модуляция (*PAM* – Pulse-Amplitude Modulation). При этом виде модуляции цифровых данных группа из k смежных бит, называемая кодовой группой $X = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$, $\forall j \in \{1, \dots, k\} : x_j \in \{0, 1\}$ модулируется одним канальным сигналом, который может принимать 2^k уровней: от 0 до $(2^k - 1) \cdot s$, где s -шаг дискретизации амплитуды канального сигнала.

При искажении канального сигнала *PAM* принципиально могут быть искажены k битов, образующих кодовую группу. Однако согласно [1] ошибки, возникающие в таких линиях имеют специфические особенности, состоящие в следующем:

- ошибки передачи канальных сигналов в сетях практически независимы и зависимость вероятности их появления от кратности описывается биномиальным законом;
- при возникновении ошибки передачи канального сигнала вероятности искажений отдельных битов k -разрядной кодовой группы, модулируемой одним канальным сигналом неодинаковы.

Действительно, если уровень $U(X)$ канального сигнала при амплитудно-импульсной модуляции определяется двоичным числом, соответствующим двоичному значению кодовой группы $X = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$:

$$U(X) = s \cdot \sum_{j=1}^k x_j \cdot 2^{j-1} \quad (1)$$

то, согласно [1] при возникновении ошибки передачи канального сигнала, обусловленного гауссовым шумом, наиболее вероятно искажение этого сигнала на величину одного шага s дискретизации амплитуды. Определим

эту вероятность как p_1 (через p_0 обозначим вероятность того, что каналный сигнал будет передан правильно). Существенно менее вероятным является изменение под воздействием гауссова шума каналного сигнала на 2 шага дискретизации (обозначим эту вероятность через p_2). Аналогично, обозначим через p_i вероятность изменения, вследствие гауссова шума, каналного сигнала на i -шагов дискретизации). Согласно данным [1] на практике выполняется неравенство:

$$p_0 \gg p_1 \gg p_2 \gg p_3 \gg \dots \gg p_{2^{k-1}}, \quad (2)$$

причем отличие значений вероятностей, входящих в неравенство (2) составляет несколько порядков.

При возникновении ошибок передачи каналных сигналов, вызванных гауссовым шумом, меняются биты кодовой группы X , соответствующей искажаемому каналному сигналу. Важным моментом при этом является то, что вероятности искажения k битов, составляющих кодовую группу X неодинаковы. Так, при наиболее вероятном изменении каналного сигнала на один шаг дискретизации младший бит x_1 меняется всегда, бит x_2 искажается с вероятностью 2^{-1} , бит x_3 изменяет свое значение с вероятностью 2^{-2} и так далее. При изменении под воздействием гауссова шума каналного сигнала на два шага дискретизации безусловно меняется второй бит x_2 кодовой группы, в то время как третий бит x_3 меняется с вероятностью 2^{-1} . При изменении амплитуды каналного сигнала на величину $3 \cdot s$, безусловно меняются младший $-x_1$ и следующий на нем $-x_2$ биты кодовой группы. Исходя из приведенных рассуждений ясно, что старший бит $-x_k$ искажается только при изменении в результате ошибки амплитуды каналного сигнала на $2^{k-1} \cdot s$. С учетом вероятностей p_1, p_2, \dots, p_3 изменения амплитуды каналного сигнала под воздействием гауссова шума на соответствующее число шагов дискретизации, вероятности q_1, q_2, \dots, q_k искажения битов кодовой группы при возникновении ошибки передачи каналного сигнала могут записаны в следующем виде:

$$\begin{aligned} q_1 &= p_1 + p_3 + p_5 + p_7 + \dots \\ q_2 &= \frac{1}{2} \cdot p_1 + p_2 + p_3 + \frac{1}{2} \cdot p_5 + p_6 + p_7 + \dots \\ q_3 &= \frac{1}{4} \cdot p_1 + \frac{1}{2} \cdot (p_2 + p_3) + p_4 + p_5 + p_6 + p_7 + \frac{1}{4} \cdot p_9 + \dots \\ q_4 &= \frac{1}{8} \cdot p_1 + \frac{1}{4} \cdot (p_2 + p_3) + \frac{1}{2} \cdot (p_4 + p_5 + p_6 + p_7) + p_8 + \dots \\ &\dots \\ q_k &= \frac{1}{2^{k-1}} \cdot p_1 + \frac{1}{2^{k-2}} \cdot (p_2 + p_3) + \frac{1}{2^{k-3}} \cdot (p_4 + p_5 + p_6 + p_7) + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

Анализ выражений (2) и (3) показывает, что вероятности искажений различных битов кодовой группы битов при возникновении ошибки передачи соответствующего каналного сигнала существенно различаются.

Наиболее вероятно искажение младшего бита – x_1 кодовой группы, вероятность q_2 искажения второго бита x_2 практически вполнину меньше. При наиболее вероятной ошибке передачи канального сигнала – изменении его амплитуды на величину близкую к s , с вероятностью 0.5 исказится только один бит (младший – x_1) соответствующей кодовой группы. С вероятностью – 0.5 – большее число бит кодовой группы.

Существующие средства контроля ошибок, в частности, CRC не учитывают эту весьма существенную разницу в вероятности искажения битов кодового слова при возникновении ошибки передачи модулирующего канального сигнала. Вполне очевидно, что учет этой разности является потенциальным источником повышения эффективности обнаружения ошибок. Эта возможность на практике может быть реализована путем оптимизации кодирования контрольной информации.

Анализ возможных битовых искажений цифровых данных при их передаче по сетевым линиям с амплитудно-импульсной модуляцией необходимо проводить с учетом возможности многократных искажений канальных сигналов при передаче блока цифровых данных, содержащего m бит.

При однократной ошибке передачи канального сигнала, любые битовые искажения блока передаваемых данных гарантированно обнаруживаются при использовании CRC, если степень n его образующего полинома больше длины k кодовой группы: $n > k$. Это обусловлено свойствами CRC гарантированно обнаруживать ошибки, локализованные в области, длина которой не превышает степени образующего полинома [4].

Рассмотрим, в частности, достаточно вероятный на практике [3] случай двукратной ошибки передачи канального сигнала. Если обозначить через P_c – вероятность ошибочной передачи одного канального сигнала, то вероятность P_2 указанной ситуации при больших значениях m определяется выражением:

$$P_2 \approx \frac{m^2}{2 \cdot k^2} \cdot P_c^2 \quad (4)$$

В рассматриваемом случае, потенциально могут быть искажены $2 \cdot k$ битов блока, не локализованные в одной области. В рамках проводимого анализа предположим наиболее вероятную ситуацию, что в при искажении обоих канальных сигналов, их амплитуда вследствие гауссова шума меняется на s . Такая двойная ошибка передачи канального сигнала гарантированно обнаруживается CRC, если при каждой из них искажению подвергся только один бит соответствующей кодовой группы, вероятность этого равна 0.25. С вероятностью, 0.75 искажено больше, чем два бита, причем не локализованных в одной области. Вероятность необнаружения такой ошибки с использованием CRC составляет 2^{-n} . Следовательно, при применении CRC двойная ошибка передачи канального сигнала обнаруживается с вероятностью $3 \cdot 2^{-(n+2)}$.

Таким образом, использование существующих средств контроля ошибок, в частности CRC, не позволяет эффективно обнаруживать ошибки передачи канальных символов в линиях с амплитудной модуляцией. Фактически гарантированно может быть обнаружена только однократная ошибка передачи канальных символов.

Целью работы является повышение эффективности обнаружения ошибок передачи данных в линиях с амплитудной модуляцией за счет повышения кратности гарантировано обнаруживаемых ошибок передачи канальных символов.

Модификация CRC для повышения эффективности обнаружения ошибок в линиях с амплитудно-импульсной модуляцией

Предлагается способ повышения эффективности использования CRC для контроля ошибок в сетевых линиях с амплитудно-фазовой модуляцией цифровых данных за счет расширения класса гарантированно обнаруживаемых ошибок, а именно – обнаружения двойных ошибок передачи канальных сигналов, а также за счет ускорения вычислений, связанных с контролем ошибок. Способ ориентирован на использование в линиях передачи данных, для которых доминирующим типом искажений импульсов является изменение ε амплитуды импульса на величину, не превышающую $3 \cdot s/2$, где s – значение шага дискретизации импульса при амплитудно-импульсной модуляции.

Сущность предлагаемого способа состоит в том, что вычисление контрольного кода CRC производится только с учетом младшего бита кодовой группы – x_1 с пропуском остальных бит. Тогда, при возникновении однократной ошибки передачи канального сигнала, при условии, что искажение амплитуды составит не более s , такая ошибка всегда будет гарантированно обнаружена. При возникновении двукратной ошибки передачи канальных сигналов, амплитуда которых искажается не более, чем на шаг дискретизации – s , в контролируемой CRC последовательности битов искажаются только два бита. Такое искажение гарантированно обнаруживается при использовании стандартизированного полинома CRC. Для того, чтобы гарантированно обнаруживались однократные ошибки передачи канальных сигналов с изменением ε амплитуды до $7 \cdot s/2$, предлагается вычислять в качестве дополнительного контрольного бита сумму по модулю 2 вторых битов $-x_2$ всех кодовых групп контролируемого блока данных.

Таким образом, в отличие от обычной схемы применения CRC, расширяется класс гарантированно обнаруживаемых ошибок за счет двойных ошибок передачи канального символа. Кроме того, при использовании предлагаемого способа вычисления контрольного кода CRC, в силу того, что обрабатывается только каждый k -тый бит передаваемого блока

данных, соответственно возрастает в k раз скорость реализации вычислений, связанных с контролем ошибок.

Обнаружение многократных ошибок передачи канальных символов с использованием взвешенной контрольной суммы

Неравновероятный характер искажения битов кодовых групп при возникновении ошибки передачи канального сигнала может быть использован для повышения эффективности обнаружения ошибок с применением взвешенной контрольной суммы [5].

Ниже предлагается один из вариантов реализации такой возможности, учитывающей близкие к реальным распределения вероятностей появления ошибок различных классов [2].

Модифицированную взвешенную контрольную сумму блока $B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\} = \{X_1, X_2, \dots, X_t\}$, где $t = m/k$ – количество кодовых групп в блоке, предлагается вычислять в виде суммы по модулю 2 контрольных кодов кодовых групп: $CS = V_1 \oplus V_2 \oplus \dots \oplus V_t$. Контрольный код кодовой группы предлагается формировать состоящим из $\log_2 t + 2$ битов, организованных в три битовых поля: $\log_2 t$ -разрядное поле Z_1 и двух однобитовых полей z_2, z_3 : $V = Z_1 | z_2 | z_3$. Поле Z_1 контрольного кода $V_i, i = 1, \dots, t$, соответствующего i -той в блоке кодовой группе X_i предлагается формировать в виде логического произведения младшего бита x_l^i кодовой группы X_i на разряды двоичного кода порядкового номера W_i кодовой группы в блоке: $V_i = x_l^i \cdot W_i$, где $W_i = \{w_1^i, w_2^i, \dots, w_l^i\}, l = \log_2 t, \forall e \in \{1, \dots, l\}; w_e \in \{0, 1\}$, причем $\sum_{e=1}^l w_e^i \cdot 2^{e-1} = i$. В качестве однобитовых полей z_2 и z_3 предлагается

использовать младший x_l^i и следующий за ним x_{l-1}^i биты кодовой группы X_i соответственно. Использование такой модификации взвешенной Контрольной суммы позволяет гарантированно обнаруживать все ошибки, доминирующие в сетевых линиях с амплитудно-импульсной модуляцией.

При возникновении под воздействием гауссова шума однократной ошибки передачи канального сигнала с большой вероятностью p_1 амплитуда канального импульса изменится на величину ε , лежащую в интервале $s/2 < \varepsilon < 3 \cdot s/2$. Поскольку, при этом исказится младший бит x_1 передаваемой кодовой группы X , то биты поля z_2 соответствующего контрольного кода V на приемнике и передатчике будут отличаться, равно как, будут отличаться и контрольные суммы на приемнике и передатчике. Это значит, что такая ошибка будет безусловно обнаружена.

При возникновении двух ошибок передачи канального сигнала, при которых в обоих случаях изменение ε амплитуды импульса находится в интервале $s/2 < \varepsilon < 3 \cdot s/2$, поля z_2 контрольных сумм на передатчике и приемнике будут идентичными. Покажем, что при этом код поля Z_1 на приемнике и передатчике будут отличаться. Пусть, ошибки имели место при

передаче j -го и i -го канальных сигналов, $i, j \in \{1, \dots, t\}$ (соответственно, кодовых групп – X_i и X_j). Поскольку, значения битов x_1^j на приемнике и передатчике отличны, то поле Z_j контрольного кода V_j на передатчике состоит из l нулевых битов (если на передатчике $x_1^j = 0$), в то время как на приемнике поле Z_1 контрольного кода V_j равно W_j , поскольку $x_1^j = 1$ (или наоборот, в случае, если на передатчике $x_1^j = 1$, а на приемнике $x_1^j = 0$). Аналогично обстоит дело и с контрольными кодами на передатчике и приемнике и для контрольного кода V_i : либо на приемнике поле Z_1 этого кода равно W_i , при том, что на передатчике оно равно нулю, либо наоборот. Из изложенного очевидно, что поле Z_1 суммы по модулю 2 контрольных кодов приемника V_{jS} и передатчика V_{iR} равно W_j , равно как поле Z_1 суммы по модулю 2 контрольных кодов приемника V_{iS} и передатчика V_{jR} равно W_i . Для всех остальных канальных сигналов суммы по модулю 2 контрольных кодов приемника и передатчика равны нулю: $\forall u \in \{1, \dots, t\}, u \neq i, u \neq j: V_{uS} \oplus V_{uR} = 0$. Из этого следует, что поле Z_1 контрольных сумм приемника и передатчика для рассматриваемого случая двойной ошибки будет равно $W_j \oplus W_i \neq 0$. Это означает, что двойные ошибки рассматриваемого типа, которые доминируют по сравнению с другими типами двойных ошибок будут гарантированно обнаруживаться предлагаемой модификацией взвешенной контрольной суммы, в отличие от применения CRC.

При возникновении под воздействием гауссова шума однократной ошибки передачи канального сигнала, с вероятностью $p_2 \ll p_1$ амплитуда канального импульса изменится на величину ε , лежащую в интервале $3 \cdot s/2 < \varepsilon < 7 \cdot s/2$. Поскольку при этом исказится второй бит x_2 передаваемой кодовой группы X , то биты поля z_3 соответствующего контрольного кода V на приемнике и передатчике будут отличаться, равно как, будут отличаться и контрольные суммы на приемнике и передатчике. Это значит, что такая ошибка гарантированно обнаруживается предложенной модификацией взвешенной контрольной суммы.

При возникновении двух ошибок передачи канального сигнала, при которых в одном случае изменение ε амплитуды импульса находится в интервале $s/2 < \varepsilon < 3 \cdot s/2$, а во втором – в интервале $3 \cdot s/2 < \varepsilon < 5 \cdot s/2$. В этом случае искажение битов передаваемого блока также гарантированно обнаруживается с использованием предлагаемой модификации взвешенной контрольной суммы. Действительно, пусть указанные ошибки имели место при передаче j -го и i -го канальных сигналов, $i, j \in \{1, \dots, t\}$ (соответственно, кодовых групп – X_i и X_j). Пусть, например, при передаче j -го канального сигнала изменение ε его амплитуды находится в интервале: $3 \cdot s/2 < \varepsilon < 5 \cdot s/2$, а при изменении i -го канального сигнала – в интервале

$s/2 < \varepsilon < 3 \cdot s/2$. Тогда, при передаче кодовой группы X_i исказится ее второй бит $-x_2^j$, при том, что младший $-x_1^j$ не исказится. При передаче кодовой группы X_i точно исказится ее младший бит $-x_1^i$, в то время, как следующий $-x_2^i$ исказится с вероятностью 0.5. Из изложенного следует, что битовое поле z_2 контрольного кода V_i будет отличаться на передатчике и приемнике, в то время, как для остальных контрольных кодов $V_1, \dots, V_{i-1}, V_{i+1}, \dots, V_l$ значения битового поля z_2 на передатчике и приемнике будут одинаковыми. Следовательно, поле z_2 кода Δ разности контрольных сумм передатчика и приемника не равно нулю, что означает гарантированное обнаружение двукратной ошибки рассматриваемого типа.

Предложенная модификация взвешенной контрольной суммы позволяет также гарантированно обнаруживать ошибки передачи канальных сигналов нечетной кратности, при условии, что изменения ε амплитуды импульсов находится в интервале $s/2 < \varepsilon < 3 \cdot s/2$. Как уже было показано выше, это наиболее вероятное изменение амплитуды, имеющее следствием искажение битов контролируемого блока данных. Важным является то, что при использовании CRC обнаружение ошибок этого класса, при условии, что число ошибочно переданных импульсов больше единицы, не гарантируется: они обнаруживаются с вероятностью, зависящей от степени образующего полинома CRC [4].

Таким образом, предложенная модификация взвешенной контрольной суммы, ориентированная на использование в сетевых линиях с амплитудно-импульсной модуляцией позволяет, за счет оптимизации кодирования контрольной информации, гарантированно обнаруживать доминирующие в таких линиях типы ошибок. По сравнению с традиционно используемыми для обнаружения ошибок в таких линиях CRC предложенный способ обладает следующими преимуществами:

1. Расширением класса гарантированно обнаруживаемых ошибок за счет двукратных ошибок передачи канальных сигналов, а также ошибок передачи канальных сигналов нечетной кратности, которые выявляются CRC с вероятностью $1-2^{-n}$, где n -степень образующего полинома. Действительно, при наиболее часто встречающемся типе двойной ошибке передачи канальных сигналов, когда изменение ε амплитуды двух искаженных импульсов находится в интервале $s/2 < \varepsilon < 3 \cdot s/2$, с вероятностью 0.75 искажаются более, чем 2 бита контролируемого блока. Согласно свойствам CRC, при его применении искажение более, чем 2-х бит может быть обнаружено с вероятностью $1-2^{-n}$.
2. Уменьшение количества контрольных разрядов для относительно коротких блоков передаваемых данных. Если при использовании CRC число контрольных разрядов равно n (на практике, в зависимости от применения стандартов CRC-16 или CRC-31 $n=16$ или $n=32$), то при

использовании предлагаемой модификации взвешенной контрольной суммы число контрольных разрядов равно $2 + \log_2 t$. Например, при контроле передачи блока длиной 64 байта с использованием 8-ми уровневой амплитудно-импульсной модуляции, $t = 2^{11}$, соответственно требуемое число контрольных разрядов равно 13.

3. Ускорение выполнения контроля ошибок передачи данных за счет того, что, во-первых, в предлагаемой модификации контрольной суммы контролируются только 2 младших разряда символа, а во-вторых, за счет того, что при аппаратной реализации существует возможность распараллеливая вычислений, связанных с контролем отдельных фрагментов передаваемого блока.

Выводы

Проведенные исследования, направленные на повышение эффективности контроля ошибок в линиях с амплитудно-импульсной модуляцией цифровых данных показали, что традиционно используемые для обнаружения ошибок технологии CRC не гарантируют обнаружения важных классов ошибок, и в частности, битовых искажений, вызванных ошибками передачи канальных сигналов, кратность которых превышает единицу. Для повышения эффективности обнаружения ошибок в линиях с амплитудно-импульсной модуляцией проанализированы их особенности. При этом, ошибки, возникающие в таких линиях исследованы в двух ракурсах: с точки зрения кратности ошибок передачи канальных сигналов и с точки зрения вероятностных характеристик изменения амплитуды канального импульса, а также влияния этого изменения на искажение отдельных битов кодовой группы, модулируемой одним канальным сигналом. Доказано, что в линиях с амплитудно-импульсной модуляцией вероятности искажений отдельных битов кодовой группы при ошибке передачи модулирующего канального сигнала сильно отличаются, соответственно отличается объем информации, который связан с их искажением. Это открывает потенциальные возможности повышения эффективности средств обнаружения средств в таких линиях за счет оптимизации кодирования контрольной информации.

Предложен способ повышения эффективности применения CRC для контроля ошибок в сетевых линиях с амплитудно-импульсной модуляцией цифровых данных за счет расширения класса гарантированно обнаруживаемых ошибок, а именно - обнаружения двойных ошибок передачи канальных сигналов.

Разработан и исследован способ обнаружения ошибок на основе использования взвешенной контрольной суммы, который позволяет по сравнению с традиционной CS и CRC расширить класс гарантированно обнаруживаемых ошибок, снизить количество контрольных битов для относительно коротких блоков, а также уменьшить время выполнения

вычислений, связанных с контролем ошибок в темпе передачи цифровых данных в линиях с амплитудно-импульсной модуляцией.

Список использованной литературы

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Издательский дом "Вильямс", 2004.- 1104 с.
2. Blahut R.E. Theory and Practice of Error Control Codes. Mass.:Addison-Wesley Publishing Company, 1983 – 452 p.
3. Ирвин Дж., Харль Д. Передача данных в сетях: инженерный подход. СПб.: БХВ-Петербург, 2002.- 448 с.
4. Самофалов К.Г., Хазем Мохд Саид Абдель Маджид Хатамлех, Антоненко А.А. Модификация контрольной суммы для эффективного контроля ошибок в каналах передачи данных компьютерных сетей. // Проблеми інформатизації та управління. Збірник наукових праць НАУ, – Київ: НАУ – 2006 – Випуск 1(16).- С.134-141.
5. Klove T., Korzhik V. Error Detecting Codes: General Theory and Their Application in Feedback Communication Systems. Norwell, MA: Kluwer, 1995. – 433 p.