

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ СИСТЕМЫ КОДИРОВАНИЯ ПЕРЕДАВАЕМОЙ ИНФОРМАЦИИ

Кукушкин Сергей Сергеевич, доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель РФСР, главный научный сотрудник аспирантуры, АО «НИИАС», Москва, Россия,

E-mail: adaptermetod@mail.ru

Кукушкин Леонид Сергеевич, аспирант Белгородского государственного университета, Белгород, Россия,

E-mail: leofrontier@gmail.com

Махов Фёдор Сергеевич, студент Белгородского государственного университета, Белгород, Россия,

E-mail: 1fmakhov@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Обеспечение безопасности железнодорожного движения представляет собой сложную проблему, разрешение противоречий которой требует привлечения новых разработок в различных областях науки и техники. Среди них, к числу наиболее востребованных, относятся последние достижения, относящиеся к использованию информационных и информационно-измерительных методов и технологий. В качестве объекта исследований в статье выбраны новые системы кодирования информации, необходимость применения которых обусловлена чрезвычайно быстрым увеличением мощности помех, на фоне которых осуществляется обмен данными. Известные методы не в полной мере удовлетворяют предъявляемым требованиям, а необходимость перехода на интервальные технологии организации движения поездов только усиливает зарождающееся недоверие к возможностям повышения уровня обеспечения безопасности железнодорожного движения на основе существующего помехоустойчивого кодирования передаваемой информации. Существующие подходы к разработке искусственного интеллекта (ИИ) также не затрагивают информационную составляющую обеспечения безопасности железнодорожного движения. Она намного сложнее имеющихся представлений и требует внесения кардинальных изменений в существующую теорию и практику. Такое решение, которое связано с переходом в каналах связи от существующего представления данных двоичным кодом к предлагаемому более экономичному сжато помехоустойчивому троичному кодированию, предлагается в статье.

Ключевые слова: помехоустойчивое кодирование данных и сигналов, методы экономное кодирование двоичное и троичное кодирование, показатели эффективности новых технологий.

Нет ничего практичнее хорошо разработанной теории (Л. Больцман)

Введение

В современном мире информационные технологии составляют основу развития человечества, а информатика и новые открытия оказывают наиболее значительное влияние на развитие искусственного интеллекта (ИИ) [1,3]. Особую значимость разработка новых методов кодирования представляют для решения задач обеспечения безопасности железнодорожного движения [2-5]. Железнодорожный транспорт быстро совершенствуется, увеличивается объём перевозок грузов и пассажиров. Быстро растут скорости движения электропоездов, а вместе с ними многократно увеличивается и уровень помех. В новых условиях возможности существующих информационных систем уже не отвечают растущим потребностям,

предъявляемым к безопасности железнодорожного движения. Их ресурс оказывается исчерпанным, противоречия многочисленных проблем развития информационных технологий всё более обостряются [3,5,6]. Необходим поиск новых технических решений, которые могли бы составить основу модернизации существующих систем передачи информации. При этом становится особо актуальной научная задача разработки новых методов и подходов, обеспечивающих достижение комплексного технического эффекта. Для этого, прежде всего, требуется доработка математического аппарата, обеспечивающего возможность расширенного проблемно-ориентированного синтеза новых технических решений [3-6]. В этом случае можно рассчитывать на появление прорывных технологий в области информационного и информационно-измерительного обеспечения безопасности железнодорожного движения.

Одно из перспективных направлений совершенствования систем связи, сигнализации, автоматизации и блокировки на железной дороге связано с применением новых сигнально-кодовых и структурно-кодовых конструкций (СиКК и СтКК) [1,3,5]. Новаторские решения и наиболее простое их внедрение в существующую практику открывают по сравнению с прежними подходами [7-10] новую страницу в истории разработки методов борьбы с помехами. В статье для повышения эффективности связи предлагается технология перекодирования двоичного кода, традиционно используемого для передачи информации, в его замещающий аналог, которым становится троичная система представления данных. Она относится к числу оптимальных, обеспечивающих (при неизменных объемах потоков данных) возможность сокращения избыточности передаваемых символов [2,6]. При этом нет никаких препятствий для использования троичного кода при канальном кодировании, когда активно используют коды с числом позиций (M): $M = 2k$, $k = 2$ (модуляция QPSK), $k = 3$ (модуляция 8-PSK), $k = 4$ (модуляция 16-QAM) [7]. А уменьшение числа позиций кода до $M = 3$ может претендовать на возможность обеспечения комплексного технического эффекта, проявляющегося в возможности одновременного разрешения не одного, а ряда противоречий, оказывающих сдерживающее влияние на развитие систем связи и управления [5].

1. Суть предлагаемого инновационного технического решения и достигаемые при этом новые возможности для повышения эффективности инфотелекоммуникационных систем

Основу предлагаемого алгоритма перехода от двоичного кода к предлагаемому троичному составляет следующее правило преобразований, определяемое соответствиями (I) для прямого кода и (Iи) для его инверсной копии [1,2,5,6]:

$$\begin{aligned} S_0(T_0) &\leftrightarrow \langle 11,00 \rangle_2 \\ S_1(T_1) &\leftrightarrow \langle 10,001 \rangle_2 \\ S_2(T_2) &\leftrightarrow \langle 101 \rangle_2 \end{aligned} \quad (I)$$

$$\begin{aligned} S_{0и}(T_{0и}) &\leftrightarrow \langle 00,11 \rangle_2 \\ S_{1и}(T_{1и}) &\leftrightarrow \langle 01,110 \rangle_2 \\ S_{2и}(T_{2и}) &\leftrightarrow \langle 010 \rangle_2 \end{aligned} \quad (Iи)$$

где $S_i(T_i)$, $S_{ии}(T_{ии})$, $i = 0, 1, 2$ – дублирующие друг друга символы синтезированного прямого и инверсного троичного кода, для представления которых используют амплитудно-импульсную (АИМ-3) и широтно-импульсную (ШИМ-3) модуляции с тремя позициями ($M = 3$), соответственно; при этом соответствующие им двоичные кодовые конструкции, состоящие из двух и трёх бит, заключены в ломаные скобки: $\langle \dots \rangle_2$.

Отличительная особенность предлагаемого метода кодирования, определяемого соответствиями (1) и (1и), заключается в неоднозначности расшифровки троичных символов $S_0 (T_0)$, $S_1 (T_1)$, $S_{0и} (T_{0и})$ и $S_{1и} (T_{1и})$: каждому из них соответствуют не одна, как это требует классическая теория кодирования [7], а две различные двоичные кодовые конструкции. В новом предложении однозначность их декодирования обеспечивают за счёт следующего правила формирования рекуррентных кодов [2,6]: последний бит, который получают при расшифровке предыдущего троичного символа $S_i (T_i)$, становится первым в двоичной кодовой конструкции (KK_{2i}), которая присвоена последующему символу $S_{i+1} (T_{i+1})$. Как это происходит, показано на рисунке 1. Там же приведено и описание логики предлагаемого троичного кодирования. Последующие процедуры перекодирования двоичного кода в троичный не имеют отличий от краткого описания, приведенного в описательной части на рисунке 1.

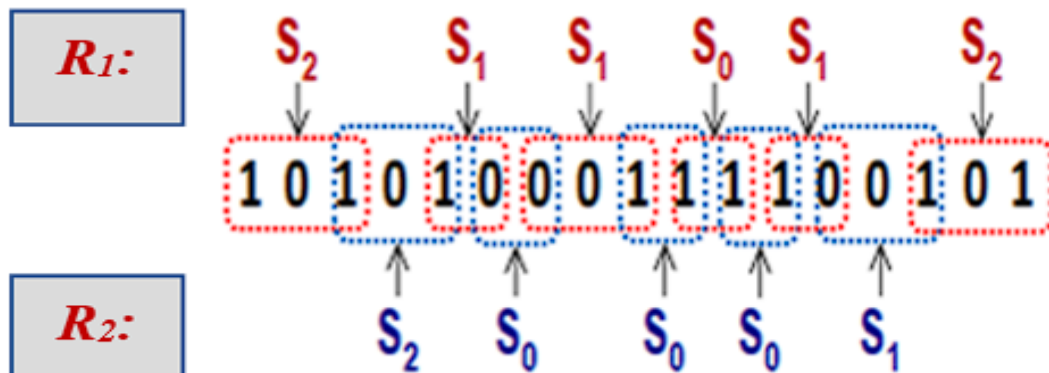


Рис. 1 – Дополнительное правило рекуррентного троичного кодирования

Логика правила рекуррентного троичного кодирования:

1. Формируют два уровня разбиения R_1 и R_2 для данных перекодирования S_i , $i = 0, 1, 2$. Каждый раз анализу подвергают 3 бита. Первые из них – это $KK_{2i} = \langle 101 \rangle_2$. Согласно правилу перекодирования (1) $KK_{2i} = \langle 101 \rangle_2$ соответствует троичный символ S_2 .
2. Следующая $KK_{2(i+1)}$ также $\langle 101 \rangle_2$, при выполнении правила рекуррентности кода. Значит и очередной троичный символ также S_2 .
3. Очередная 3-хразрядная $KK_{2i} = \langle 101 \rangle_2$, но нет соответствующего ей троичного символа, а есть $S_1 = \langle 10 \rangle_2$.

Необходимо уменьшить наши притязания с 3 бит до 2. Захватывая последний бит, равный $\langle 10 \rangle_2$ убеждаемся, что очередная $KK_{2(i+3)} = \langle 001 \rangle_2$ есть в принятом правиле, что соответствует другой расшифровке символа $S_1 = \langle 001 \rangle_2$

В последующем для простоты изложения предлагаемых технических решений предлагается остановиться на прямом троичном кодировании, определяемом соответствием (1) при использовании символов T_i , $i = 0, 1, 2$. Они при первичной модуляции отображаются в виде широтно-импульсной (ШИМ-3) модуляции с тремя значениями длительности: T_0 , $T_1 = 1,5 \cdot T_0$ где T_0 – длительность символов исходного двоичного кода. На рис. 2 приведены импульсные формы, используемые при первичной модуляции для представления бит исходного двоичного кода $\langle 1 \rangle_2$ и $\langle 0 \rangle_2$, а также для символов T_i , $i = 0, 1, 2$ предлагаемого троичного кода с последующим сравнением появляющихся при этой отличий.

На рисунке 2 приведены формы электрического представления кодово-импульсной модуляции КИМ-2 (вверху), отображающие последовательность бит исходного двоичного кода, и широтно-импульсной модуляции (ШИМ-3) (внизу) с тремя значениями длительностей троичных символов T_i , $i = 0, 1, 2$. Отличие, как несложно заметить, проявляется только в том, что биты двоичного кода имеют одну и ту же длительность – T_0 , а у троичного кода их три. Но с позиций существующей системы передачи с использованием фазовой манипуляции (ФМ-2), которую реализуют путём изменения фазы несущей частоты на два состояния 0° и 180° , ничего не изменилось.



Рис. 2 – Импульсные формы представления символов исходного двоичного кода (верхняя эпюра) и символов T_i , $i = 0, 1, 2$ предлагаемого троичного кода (нижняя эпюра)

Она используется в качестве «фазовых меток» для отображения границ смены полярностей импульсов КИМ-2 или ШИМ-3 (рис. 2). Отличие проявляется только в том, что границы импульсов ШИМ-3 и КИМ-2 могут не совпадать: при передаче троичных символов $T_1 = 1,5 \cdot T_0$ они сдвигаются на $0,5 \cdot T_0$ длительности исходных бит передаваемой информации (рис. 2). Но число передаваемых троичных символов T_i , $i = 0, 1, 2$, сокращается, в среднем $k_{сж} = \log_2 3 \approx 1,6$, в раза по сравнению со случаем, когда передаче подлежит последовательность бит (рис. 3).

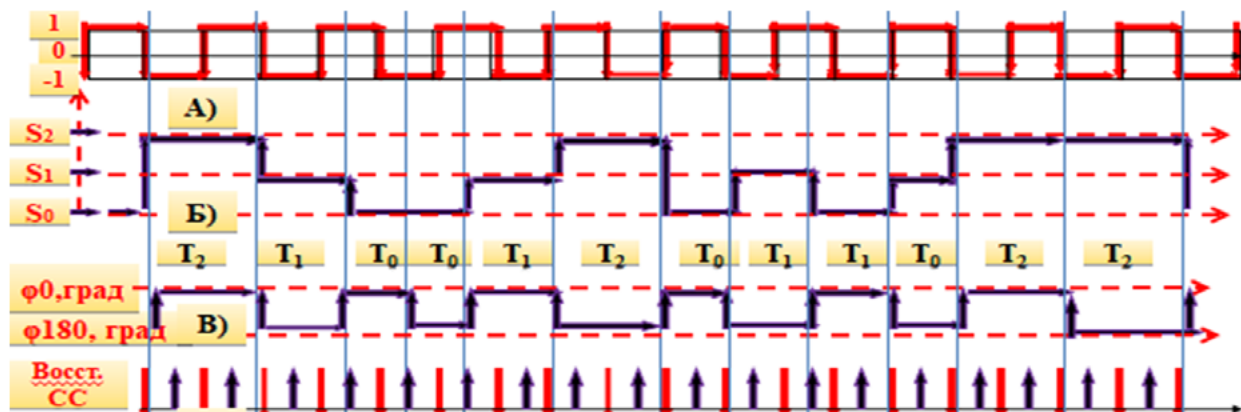


Рис. 3 – Иллюстрация возможности одновременного использования двух видов модуляции АИМ-3 и ШИМ-3 для повышения помехозащищённости передачи информации

Также появляется основа для достижения комплексного положительного эффекта [3], чего не было ранее. Так, например, на рис. 3 показан один из возможных способов совмещения двух видов модуляции: АИМ-3 и ШИМ-3, используемых для представления символов S_i , $i = 0, 1, 2$ (рис. 3 (Б)) и T_i , $i = 0, 1, 2$ (рис. 3 (В)), соответственно. Для пояснения достигаемого эффекта на рис. 3 (А) представлена тактовая импульсная последовательность в виде меандра, длительность импульсов которого равна продолжительности бит T_0 . На фоне меандровой импульсной последовательности (рис. 3 (А)) вертикальными линиями обозначены границы изменения полярностей импульсов ШИМ-3. В канал связи их передают в виде изменения фазы несущего сигнала (φ), принимающей значения: 0° и 180° . В результате перекодирования исходной двоичной последовательности бит: $\langle 1010000101100110101 \rangle_2$, представленной 19 битами, получаем последовательность из 12 троичных символов T_i , отображаемых с использованием индексов i : $\langle 210012011022 \rangle_3$. Получили коэффициент сжатия $k_{сж} = \frac{19}{12} = 1,58$, близкий к его теоретическому значению 1,6. Для передачи информации необходимо последовательность троичных символов $\langle 210012011022 \rangle_3$ преобразовать сначала в электрическую импульсную форму. Их в нашем случае может быть 2: амплитудно-импульсная (АИМ-3), представленная символами S_i , $i = 0, 1, 2$ (рис. 3 (Б)) и широтно-импульсная (ШИМ-3), отображённая на (рис. 3(В)), первичные модуляции передаваемого сигнала.

Оказывается, что передача символов $T_i, i = 0, 1, 2$ (рис. 3 (В)) отличается от традиционной передачи информации двоичным кодом ещё и тем, что при приёме появляется возможность восстановления тактовой импульсной последовательности (нижняя эпюра), которая следует в 2 раза чаще по сравнению с передачей двоичным кодом (рис. 3 (А)). Подобный код получил название «самосинхронизирующегося» [7,8]. Он выгодно отличается тем, что появляется (на фоне эффекта дрейфа принимаемой импульсной последовательности символов) возможность восстановления импульсов, следующих в 2 раза чаще по сравнению с традиционной процедурой обеспечения тактовой синхронизацией, используемой при кодировании натуральным двоичным кодом. В этом случае при передаче троичных символов $T_i, i = 0, 1, 2$ на основе первичной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) есть возможность более точно определять временные моменты, указывающие на середину восстанавливаемых символов. А она (по сравнению с фронтами их импульсной формы) наименее подвержена искажению помехой. Такая технология получила название «мягкого» декодирования импульсной формы передаваемых символов кода [7,8].

На втором этапе модуляции импульсы АИМ-3, соответствующие символам $S_i, i = 0, 1, 2$, преобразуют в дискретную частотную модуляцию несущей частоты (ЧМ-3) с соответствующими тремя значениями частоты (f_i). Одновременно границы импульсов ШИМ-3 отображают изменения фазы (φ), принимающими значения 0° и 180° при фазовой манипуляции (ФМ-2) промодулированной частоты передаваемого сигнала. Всё это отражено в модели двумерного модуляционного кодирования передаваемых данных и его реализации, представленной на рис. 4.

На рис. 4 (А) представлен исходный двоичный код, содержащий 16 бит: $\langle 1010000110100101 \rangle_2$. В результате перекодирования получим следующую троичную кодовую последовательность: $\langle 2100102112 \rangle_3$, которая представлена одновременно символами $S_i, i = 0, 1, 2$, отображаемыми с использованием первичной модуляции АИМ-3 (рис. 4 (Б)) и символами $T_i, i = 0, 1, 2$, приведенными к своему электрическому аналогу посредством первичной модуляции ШИМ-3 (рис. 4 (В)). В результате этого несущая частота, посредством которой в канале связи передают информацию, оказывается нагруженной не одним, как это было ранее, а сразу двумя видами модуляции частотной (ЧМ-3) с тремя значениями частоты: f_0 (символ S_1), $f_1 = f_0 - \Delta f$ (символ S_2), $f_0 + \Delta f$ где (символ S_0) где f_0 – несущая частота, а Δf – значение её девиации и фазовой манипуляции (ФМ-2) с двумя значениями фазы (рис. 4 (Г)). При этом три значения длительности символов с числом позиций ($M = 3$) передают только двумя значениями фазы 0° и 180° ($M = 2$). Этот результат оказывается неожиданным для теории передачи информации M -позиционным кодом. Он показывает возможность фактического уменьшения числа позиций кода до $M = 2$, как у двоичного кода, при том, что в исходном представлении троичных символов $T_i, i = 0, 1, 2$ их было на единицу больше ($M = 3$). Предлагается такую возможность использовать для определения перспективных направлений совершенствования систем связи.

Таким образом, использование фазовой манипуляции (ФМ-2) способствует значительному повышению показателей помехозащищённости передачи троичных кодов, что продемонстрировано на рис. 4 (Г) на примере частотной модуляции (ЧМ-3). Но в то же время использование частотной модуляции (ЧМ-3) позволяет устранить основной недостаток фазовой манипуляции (ФМ-2), который связан с утратой информации о предыдущем значении фазы и появлением, вследствие этого, эффекта обратной работы фазового детектора, приводящего к инверсии бит.

Следовательно, разработка новых методов кодирования способствует достижению следующих преимуществ: помимо повышения показателей помехоустойчивости появляется возможность достижения комплексного положительного технического эффекта. Он составляет основу нового решения сложных противоречивых проблем. В их числе: повышение спектрально-энергетической эффективности передачи информации по каналам с ограниченной пропускной способностью, обеспечение её защиты от несанкционированного доступа (НСД) и информационно-технических воздействий (ИТВ). Разработанные научно-методические принципы, положенные в основу предлагаемого помехоустойчивого кодирования передаваемой информации, являются гносеологическими, т.е. способными оказать своё плодотворное влияние и за пределами рассматриваемой узкой области знаний.

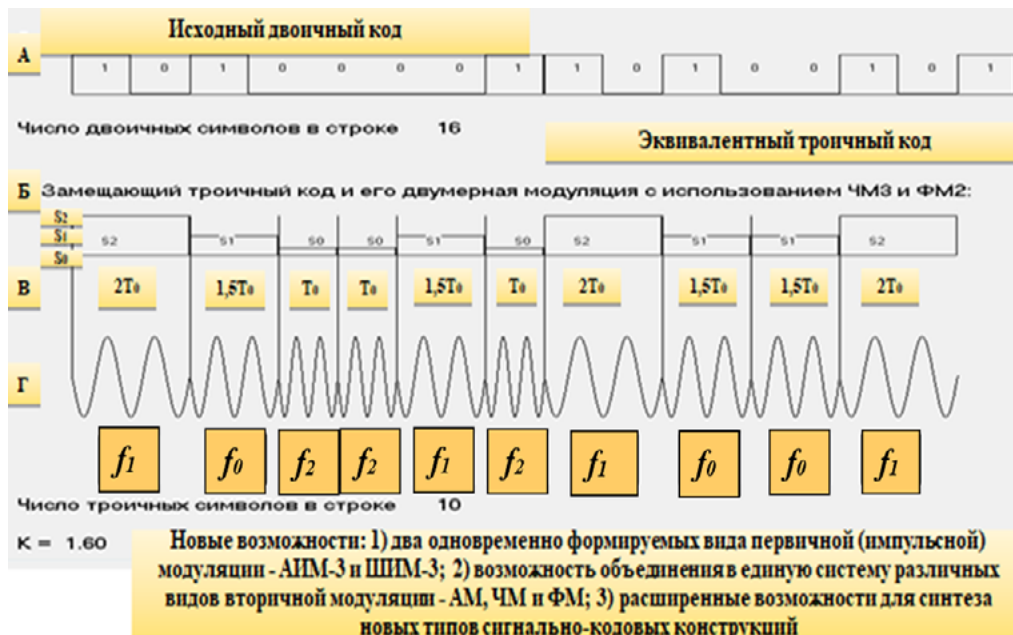


Рис. 4 – Модель двумерного модуляционного кодирования передаваемых данных и его реализации

На рисунке 5 представлена блок-схема реализации предлагаемой технологии передачи информации.



Рис. 5 – Блок-схема реализации предлагаемой технологии передачи информации

Данные от источника данных и сообщений 1 подвергают операции кодирования 2 с использованием натурального двоичного кода. Затем следуют новые операции: 3 – перевод двоичного кода в предлагаемый троичный код с символами $S_i(T_i)$, $i = 0, 1, 2$; 4 – первичная комплексная импульсная модуляция АИМ-3 + ШИМ-3, а также 5 – вторичная комплексная импульсная модуляция ЧМ-3 и ФМ-2, соответственно. Несущую частоту f_0 и результаты её девиации $f_0 - \Delta f$ и $f_0 + \Delta f$ используют для частотной модуляции с тремя значениями частот ($M = 3$) для передачи троичных символов S_i , $i = 0, 1, 2$. Для повышения эффективности ЧМ-3 смену частот производят не в середине, а на вершине гармонических сигналов. При этом границы импульсов ШИМ-3, используемых для передачи троичных символов T_i , $i = 0, 1, 2$, обозначают изменением фазы 0° и 180° синусоидальных сигналов, сформированных при использовании ЧМ-3. В результате этого для передачи трех значений длительностей символов T_i , $i = 0, 1, 2$ ($M = 3$) используют только два состояния фазы, что является признаком использования ФМ-2. Таким образом, этот режим по помехоустойчивости ничем не отличается от того его аналога, который используют в существующей практике при передаче информации двоичным кодом. В последующем несущую частоту, нагруженную сразу двумя видами модуляции (ЧМ-3 + ФМ-2), передают в условиях помех по каналу связи 6, а восстанавливают её переданные состояния в приёмнике 7. На выходе приёмника 7 демоду-

лируют восстановленный сигнал с использованием частотного 8 и фазового 9 демодуляторов, после которых получают восстановленные при приёме троичные символы S_i , $i = 0, 1, 2$ (операция 10) и T_i , $i = 0, 1, 2$ (операция 11), соответственно. Затем используют операцию 12 контроля достоверности. Так как троичные символы S_i , $i = 0, 1, 2$ и T_i , $i = 0, 1, 2$ являются дублирующими по определению, то первая операция контроля достоверности заключается в удостоверении факта их совпадения восстановленных их последовательностей. При отсутствии совпадения проверяют выполнение условия, аналогичного тому, что используют при введении дополнительного символа «Контроль чётности бит» при традиционном двоичном кодировании. Он заключается в том, что между двумя соседними троичными символами $\langle 2 \rangle_3$ должно быть только чётное число троичных символов $\langle 1 \rangle_3$. Заключительная операция 13 связана с обратным переходом от символов троичного кода к восстановленному потоку бит.

Предлагаемый троичный код также отличается простотой операции его декодирования на приёмной стороне. Разработанная модель декодирования в иллюстрационном виде показана на рис. 6.

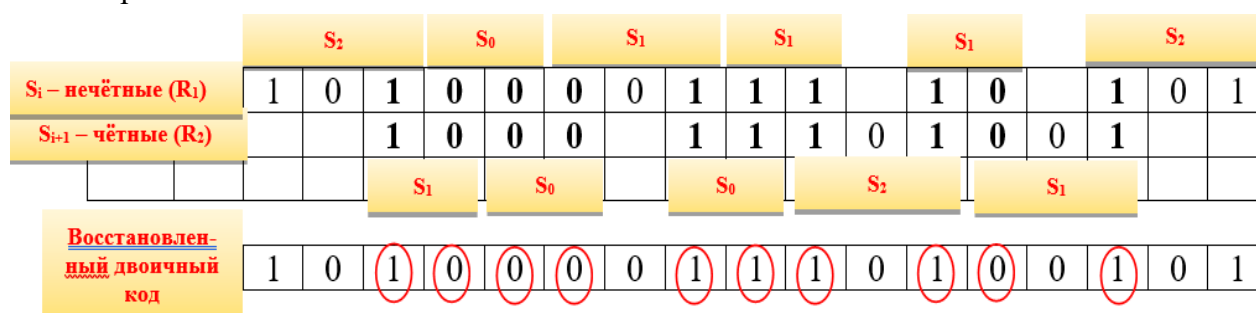


Рис. 6 – Иллюстрация основных операций процесса декодирования предлагаемого троичного кода заключается в следующем

Основные операции процесса декодирования предлагаемого троичного кода заключаются в следующем:

- принятые символы троичного кода $S_i(T_i)$, $i = 0, 1, 2$ разделяют на два подпотока, в первый из которых входят нечётные (R_1), а во второй – чётные (R_2) символы;
- так как предлагаемый троичный код является рекуррентным (это следует из того факта, что последний бит двоичной кодовой конструкции предыдущей расшифровки соответствующего троичного символа $S_i(T_i)$, $i = 0, 1, 2$, является первым при расшифровке следующего троичного символа $S_i(T_i)$, $i = 0, 1, 2$), то повторяющиеся при расшифровке троичного кода двоичные кодовые конструкции бит в каждом из разбиений R_1 и R_2 записывают друг под другом;
- суть последней операции заключается в том, что биты, повторяющиеся в разбиениях R_1 и R_2 , объединяют и заменяют в результатах декодирования соответствующим одним двоичным символом «1» или «0».

2. Обсуждение результатов

Приведенный краткий анализ новых предложений и необычных достижений в области кодирования данных и модуляции сигналов ограничен только рассмотренными троичными кодами. Из иллюстрации процесса перекодирования двоичного кода в предлагаемый троичный код, приведенной на рис. 4, можно сделать следующие выводы:

1. Троичный код отличается тем, что обеспечивает возможность синтаксического сжатия данных на уровне символов, эффект от которого, в среднем, определяется значением $k_{сж} = \log_2 3 \approx 1,6$. Это значительный коэффициент, который можно получить при использовании технологии «сжатия без потерь». В соответствии с существующей теорией он не может быть больше значения: $k_{сж} = 2$. Известные технологии «сжатия»,

использующиеся при передаче изображений, могут обеспечить коэффициенты сжатия значительно превышающие значение 2, но их применение сопровождается потерей определённой части информации, что не всегда приемлемо.

- Эффект синтаксического сжатия данных на уровне символов может быть существенно увеличен за счёт использования предварительной операции скремблирования исходной последовательности бит. Результаты проведенного моделирования показывают, что при использовании простейшего алгоритма скремблирования, когда принудительной инверсии подвергают каждый четвёртый бит исходной двоичной кодовой последовательности основной показатель достоверности восстановления переданных данных, определяемый как показатель вероятности искажения бит (P_6), увеличивается не менее, чем в 4 раза.

При его использовании получают, помимо сжатия передаваемых символов кода, дополнительный эффект в повышении помехоустойчивости связи. Известным является простейший способ повышения помехоустойчивости передачи информации двоичным кодом, который связан с введением в передаваемые кодовые слова и сообщения дополнительного символа «Контроль чётности бит» [7,8]. При этом одиночную ошибку при передаче сообщения определяют, если число символов «1» двоичного кода в принятом сообщении нечётное.

Подобное решение есть и в предлагаемом троичном коде, в котором избыточность символов не вводится, а, наоборот, сокращается. Оно связано с тем, что между двумя соседними символами троичного кода с индексом $i = 2$: $S_2(T_2)$ может быть только чётное число символов $S_1(T_1)$, длительность ШИМ которых равна: $T_1 = 1,5 \cdot T_0$, где T_0 – длительность бит. В этом случае соблюдается основное требование передачи на временном интервале между соседними символами $S_2(T_2)$ должно быть целое число длительностей бит T_0 . Но такая возможность будет только тогда, когда на этом временном интервале число символов $T_1 = 1,5 \cdot T_0$ будет чётным. Вот Вам и аналог использования избыточного символа «Контроль чётности бит», наиболее распространённого в существующей практике помехоустойчивой передачи информации. Но в нашем случае избыточные символы не вносятся. При использовании сжатого троичного кода число символов, используемых для передачи прежнего объёма информации, только сокращается. Полученные результаты следует рассматривать и как значительный вклад в науку и технику. Они составляют основу для развития таких научных направлений, как конструктивная теория конечных полей [6], дискретная математика [10] и теория связи [7,8]. Об этом свидетельствует, в частности, сравнительный анализ различных видов модуляции сигналов и результаты оценки эффективности их использования, приведённый в Таблице 1. В первых трёх её строках представлены оценки эффективности известных и наиболее часто используемых в системах связи видов модуляции с числом позиций (M): BPSK ($M = 2$), QPSK ($M = 4$) и 8-PSK ($M = 8$).

Таблица 1

Сравнительный анализ различных видов модуляции сигналов и результаты оценки эффективности их использования

Вид модуляционного кодирования данных	Число бит на передаваемый символ	Число возможных состояний на выходе	Минимальная полоса частот, Δf_m	Скорость модуляции, (Бит/с)	Эффективность использования ширины полосы пропускания B_{η} , (Бит/Герц)
BPSK	1	2	Δf_m	f_b	1
QPSK	2	$4 = 2^2$	$\frac{\Delta f_m}{2}$	$\frac{f_b}{2}$	2
8-PSK	3	$8 = 2^3$	$\frac{\Delta f_m}{3}$	$\frac{f_b}{3}$	3
Троичный код	2,5	3	$\frac{\Delta f_m}{2,5}$	$\frac{f_b}{2,5}$	2,5

В каждом из данных видов один переданный символ, представленный, например, в виде значения фаз (0° и 180° ($M = 2$)); (-135° , -45° , $+45^\circ$ и $+135^\circ$ ($M = 4$)), соответствует передаче одного и двух бит, соответственно. При использовании модуляции 8-PSK ($M = 8$) – кодо-

вой конструкции, составленной из 3 бит. В случае использования предлагаемого троичного кода один переданный троичный символ в соответствии с правилом кодирования (1) (рис. 1(A)) расшифровывается, как состоящий из 2-х и 3-х бит. Следовательно, в среднем можно считать, что на один принятый троичный символ приходится 2,5 бит. Значит по эффективности в соответствии с известным методом оценивания, суть которого представлена данными, приведенными в Таблице 1, он занимает промежуточное положение между QPSK ($M = 4$) и 8-PSK ($M = 8$). Но на самом деле его эффективность при представлении троичных символов с использованием импульсов ШИМ-3 и модуляции ФМ-2, существенно выше по сравнению с QPSK ($M = 4$) и 8-PSK ($M = 8$), поскольку используются только две позиции ФМ-2 (0° и $180^\circ (M = 2)$), как при использовании двоичного кодирования (BPSK).

Предлагаемый троичный код также составляет основу совершенствования существующего помехоустойчивого кодирования, которое уже не в полной мере удовлетворяет потребностям практики [1-5]. Он способен существенно дополнить пути выхода из затяжного кризиса [9], который переживают существующие методы избыточного помехоустойчивого кодирования. Разработанные технологии троичного кодирования и его расширений до пяти ($i = 5$) и девяти ($i = 9$) позиций при первичной модуляции ШИМ- i используются в современных разработках, направленных на совершенствование волоконно-оптических линий связи и систем управления беспилотных летательных аппаратов различного назначения. Также они составляют основу обеспечения комплексной защиты информации от помех, НСД и информационно-технических воздействий. Так как поставленная цель достигается не применением дорогостоящей и сложной при использовании шифрующей аппаратуры, а математическими методами, то это направление получило название «некриптографических методов комплексной защиты информации». Это направление активно развивается, о чём свидетельствует получение с 2021 по 2025 гг. более 40 патентов на способы. Среди них патенты RU 2025 года: №2834404, «Способ передачи информации с использованием расширенного логического троичного помехоустойчивого кода в режимах узкополосной и широкополосной связи», опублик. 07.02.2025, бюл. №7; №2840261 «Способ помехоустойчивого сжатия данных для передачи и хранения информации», опублик. 20.05.2025, бюл. №14; №2841083 «Способ обеспечения автоматической блокировки и автоматической сигнализации с использованием широкополосных сигналов», опублик. 07.02.2025, бюл. №7; №2844808 «Способ осуществления глобального мониторинга безопасности движения поездов и функционирования важных объектов железнодорожной инфраструктуры», опублик. 06.08.2025, бюл. №22; №2844504 «Способ передачи информации с использованием волоконно-оптических линий связи и обеспечением мониторинга их состояний», опублик. 01.08.2025, бюл. №22; №2853196 «Способ повышения эффективности передачи информации в железнодорожных системах автоматизации и связи», №2853512 «Способ помехоустойчивого кодирования с использованием троичных кодов», опублик. 23.12.2025, бюл. №34; №2853515 «Способ формирования мандровых шумоподобных сигналов, использующих в качестве основы построения сжатый помехоустойчивый троичный код и его расширения», опублик. 23.12.2025, бюл. №34; №2853516 «Способ передачи информации с использованием расширенного логического помехоустойчивого троичного кода в режимах узкополосной и широкополосной связи», опублик. 23.12.2025, бюл. №34.

Заключение

Когда речь заходит об «искусственном интеллекте» (ИИ), то предполагается, что его использование также будет способствовать достижению новых результатов, относящихся к области передачи информации. Достигнутый уровень развития ИИ впечатляет, но при этом не следует забывать о его недостатках. Пока он может быть только помощником человека-творца, человека-изобретателя. ИИ способен освободить его от сложной рутинной работы. Обладая несравнимо более высокими показателями в части оперативности переработки больших объёмов информации, он не может изобретать. За человеком остаётся главное – естественный интеллект. Именно им определяется всё, что необходимо для развития критических технологий. Последние, по определению, в системе приоритетов научно-технологического развития отрасли становятся наиболее важным элементом организации инновационной, технологической и производственной деятельности на железной дороге. В долгосрочной перспективе от уровня развития критических технологий в значительной степени зависит и конкурентоспо-

способность ОАО «РЖД» на внутреннем и внешнем рынках. Появились принципиально новые возможности для внедрения элементов ИИ, которые предоставляет современная элементная база существующих систем передачи информации в виде: программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), микроконтроллеров и микропроцессоров. Поэтому, как правило, уже не требуется доработка существующих аппаратных средств – поставленные цели достигаются путём дополнительного программирования.

Но всё это быстро обесценивается, когда не развивается главное – прикладная математика более высокого уровня по сравнению с существующими достижениями. В этом, а также в органичном объединении искусственного (машинного) и естественного (человеческого) интеллектов, и заключается перспектива развития научных и производственных сил, которую определяют таким понятием как «технологический прорыв». На устранение этого недостатка при решении проблем, относящихся к передаче информации, обеспечении безопасности железнодорожного движения, и поиск тех элементов «искусственного интеллекта», которые начинают пробивать себе дорогу в этой сложной области применения ИИ, направлена данная статья.

В ней показано, что наиболее ценными становятся такие варианты разработки прикладных математических методов и расширения на их основе возможностей ИИ, когда и дополнительное программирование существующих аппаратных средств может не потребоваться. Но получаемый при этом технический эффект становится более значительным по сравнению с тем, что даёт внедрение известных информационных технологий. Так, например, для повышения эффективности передачи информации с использованием волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) и существующей системы модуляции NRZ или RZ нет принципиальных отличий в том, какая импульсная форма высокого потенциала, существующего двоичного или троичного кода открывает вентиль для прохода импульсов света. При традиционной передаче данных двоичным кодом вентиль будет открываться при передаче символов «1» и закрываться, если передают символ «0» (рис. 2, верхняя эпюра). В случае передачи информации с использованием символов T_i , $i = 0, 1, 2$ (рис. 2, нижняя эпюра) световые импульсы в режимах NRZ или RZ также будут передаваться, если импульсная форма троичного кода будет представлена высоким потенциалом напряжения. При этом за время длительностей, которые связаны с низким потенциалом импульсов ШИМ-3, вентиль закрывается, и передача импульсов света прекращается. Так что существующие передающая и приёмная системы ВОЛС «не заметят» подмены. И в этом будет проявляться высшая форма организации ИИ, когда выходной эффект становится комплексным и наиболее значительным, но при этом в существующей аппаратуре и принципах её функционирования ничего не меняется. Но этого можно достичь в результате его органичного объединения с естественным интеллектом человека-изобретателя. В этом и заключён «гибридный интеллект», к разработке которого необходимо стремиться. Предлагаемая в статье видимость перспектив развития ИИ намного сложнее имеющихся существующих представлений, относящихся к его использованию для обеспечения безопасности железнодорожного движения. Она предполагает активное использование новых достижений в области науки и техники.

Список использованной литературы

1. Кукушкин С. С., Розенберг Е. Н., Шабалин Н. Г., Ржевская А. П. Открытия, выполненные в России за последнее десятилетие в области прикладной математики и их использование в информатике для развития искусственного интеллекта // *Искусственный интеллект. Теория и практика*. – 2025. – № 3 (11). – С. 19–26.
2. Кукушкин С. С., Кукушкин Л. С. Математические методы помехоустойчивого кодирования, адаптированные к нетрадиционному представлению данных и сообщений сжатым троичным помехоустойчивым кодом // *Двойные технологии*. – 2021. – № 4 (97). – С. 75–79.
3. Кукушкин С. С., Розенберг Е. Н., Озеров А. В. Искусственный интеллект как основа обеспечения комплексной защиты информации в системах обеспечения безопасности железнодорожного движения. Теория и практика его реализации // *Искусственный интеллект. Теория и практика*. – 2025. – № 1 (9). – С. 79–87.

4. Кукушкин Л. С., Махов Ф. С. Инновационные методы структурно-алгоритмических преобразований данных передаваемой информации и их влияние на процессы развития искусственного интеллекта инфотелекоммуникационных систем // *Искусственный интеллект. Теория и практика*. – 2024. – № 1 (5). – С. 24–30.
5. Кукушкин С. С., Розенберг Е. Н., Озеров А. В. Совершенствование методов кодирования информации в системах управления // *Автоматика, связь, информатика*. – 2025. – № 7. – С. 25–29.
6. Кукушкин С. С. Теория конечных полей и информатика: в 2 т. – Т. 1: Методы и алгоритмы, классические и нетрадиционные, основанные на использовании конструктивной теоремы об остатках. – М.: МО РФ, 2003. – 284 с.
7. Феер К. Беспроводная связь. Методы модуляции и расширения спектра. – М.: Радио и связь, 2000. – 552 с.
8. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / пер. с англ. – М.: Вильямс, 2003. – 763 с.
9. Осмоловский С. А. Помехоустойчивое кодирование: кризис и пути выхода из него // *Вестник РУДН. Серия Прикладная и компьютерная математика*. – 2004. – Т. 3, № 1. –

THE MAIN DIRECTIONS OF INCREASING SECURITY OF RAILWAY TRAFFIC BASED ON THE IMPROVEMENT OF THE SYSTEM ENCODING OF TRANSMITTED INFORMATION

Sergei S. Kukushkin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Inventor of the RSFSR, Chief Researcher of Postgraduate Studies, JSC NIIAS, Moscow, Russia,

E-mail: adaptermetod@mail.ru

Leonid S. Kukushkin, Postgraduate Student at Belgorod State University, Belgorod, Russia

E-mail: leofrontier@gmail.com

Fedor S. Mahov, Student of Belgorod State University, Belgorod, Russia,

E-mail: 1fmakhov@gmail.com

ABSTRACT

Ensuring the safety of railway traffic is a complex problem, the resolution of which requires the involvement of new developments in various fields of science and technology. Among them, the latest achievements related to the use of information and information-measuring methods and technologies are among the most in-demand. The article focuses on new information coding systems, the need for which is driven by the rapid increase in the power of interference that affects data exchange. The known methods do not fully meet the requirements, and the need to switch to interval technologies for organizing train traffic only increases the emerging distrust of the ability to improve the level of railway traffic safety based on the existing noise-resistant coding of transmitted information.

Keywords: noise-resistant data and signal coding, economical coding methods, binary and ternary coding, efficiency indicators of new technologies.