

Синхронизация передачи данных: способы кодирования

Мы начинаем публикацию избранных глав из новой книги «Компоненты телекоммуникационных систем. Анализ инженерных решений», которую в настоящее время готовит к печати издательство «Эко Трендз». Книга написана известным практически каждому, кто занимается цифровой электроникой, автором Борисом Владимировичем Шевкоплясом в соавторстве с С. М. Сухманом и А. В. Берновым. В ней рассмотрены примеры построения телекоммуникационных систем, отдельных устройств и их составных частей. В ближайших номерах мы планируем опубликовать три главы этой книги, представляющие, на наш взгляд, наибольший интерес для подготовленных читателей. Первая них посвящена рассмотрению способов кодирования сигнала при передаче, вторая — вопросам выделения синхросигнала и данных из канала связи, а третья — рассмотрению практических решений синхронизации передачи данных.

Основные методы кодирования цифровой информации для ее передачи по последовательным каналам связи

Структура последовательного канала связи

Передача информации между достаточно удаленными устройствами требует представления ее в виде последовательного потока битов, характеристики которого зависят от особенностей конкретной системы. Физической основой такой системы является линия связи, которая обычно выполнена в виде витой пары проводов, коаксиального кабеля либо оптического световода.

В зависимости от расстояния данные, передаваемые по линии, могут однократно или многократно подвергаться ретрансляции с целью восстановления амплитуды и временных характеристик (рис. 1) [1].

Алгоритмы работы передатчика, ретранслятора и приемника определяются выбранным кодом, предназначенным для передачи по линии, который называют линейным кодом.

Униполярный код NRZ

Простейшим линейным кодом является униполярный код типа NRZ (Non Return to Zero), который иллюстрирует рис. 2, а. В этом коде нули представлены отсутствием импульса (напряжение, близкое нулю), а единицы — наличием импульса (некоторое положительное напряжение).

Этот код имеет четыре недостатка. Во-первых, средняя мощность, выделяемая на нагрузочном резисторе R (на рисунке не показан), равна $A^2/2R$, где A — амплитуда импульса напряжения. Число 2 в знаменателе дроби соответствует равновероятному появлению лог. 0 и лог. 1 в потоке данных. Результат неутешительный. Резистор R рассеивает тепловую энергию в два раза интенсивнее, чем при

биполярном кодировании, при такой же амплитуде сигнала, равной A (рис. 2, б)!

Во-вторых, униполярные сигналы всегда содержат постоянную составляющую и значительную долю низкочастотных компонентов в спектре при передаче длинных последовательностей единиц. Это препятствует передаче сигналов через трансформаторы или конденсаторы.

В-третьих, ретрансляторы и приемники надежно восстанавливают синхронизирующую временную сетку только тогда, когда паузы между изменениями сигнала не слишком велики. Изменение сигнала после незначительной паузы позволяет всякий раз корректировать «ход часов» ретранслятора или приемника. С увеличением паузы надежность «службы времени» падает. Например, после передачи серии из 10 тыс. нулей приемник, вероятнее всего, не сможет точно определить, находится ли последующая единица на позиции 9999, 10000 или 10001. То же относится и к передаче длинных цепочек из лог. 1. Другими словами, при передаче достаточно большой последовательности нулей или единиц приемник (или ретранслятор) теряет синхронизацию с передатчиком (или ретранслятором).

И последний, четвертый недостаток — отсутствие возможности оперативной регистрации ошибок, таких как пропадание или появление лишних импульсов из-за помех.

Биполярный код NRZ

Биполярный сигнал NRZ (рис. 2, б) обладает лучшими энергетическими характеристиками. Единица представлена положительным уровнем напряжения, нуль — отрицательным. Нагрузочный резистор R в данном случае постоянно рассеивает тепло, так как на нем, независимо от передаваемого кода, присутствует

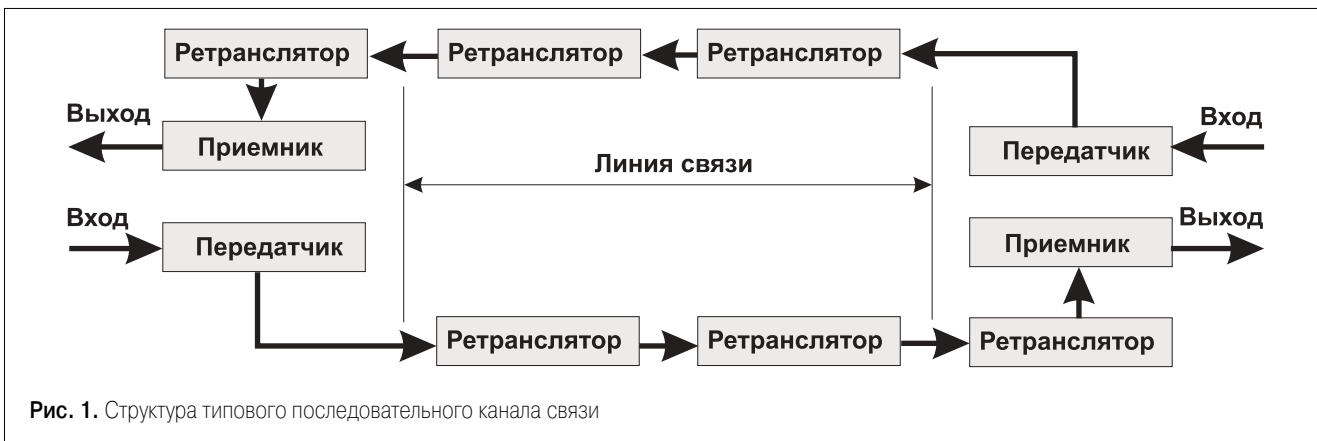


Рис. 1. Структура типового последовательного канала связи

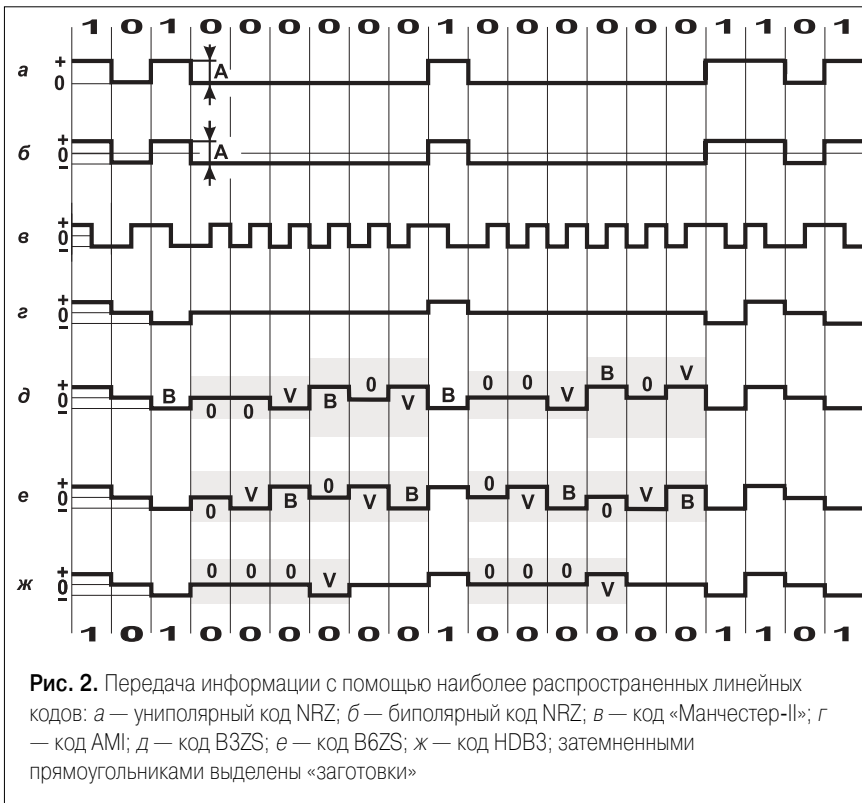


Рис. 2. Передача информации с помощью наиболее распространенных линейных кодов: *а* — униполярный код NRZ; *б* — биполярный код NRZ; *в* — код «Манчестер-II»; *г* — код AMI; *д* — код B3ZS; *е* — код B6ZS; *ж* — код HDB3; затемненными прямоугольниками выделены «заготовки»

напряжение $A/2$ той или иной полярности. Средняя мощность, выделяемая на нагрузочном резисторе, равна $(A/2)^2/R = A^2/4R$, то есть половине средней мощности униполярного сигнала, хотя перепад уровней тот же самый.

Таким образом, первый из отмеченных ранее недостатков униполярного сигнала NRZ в какой-то мере удалось устранить. Но остальные три недостатка сохраняются. Для их ликвидации необходимо введение избыточности одним из двух способов:

1) скорость передачи сигналов по линии выбирается большей, чем скорость передачи информации без использования дополнительных электрических уровней сигналов;

2) скорость передачи сигналов по линии выбирается равной скорости передачи информации, но вводятся дополнительные электрические уровни сигналов.

Код «Манчестер-II»

Примером кода с избыточностью, введенной согласно только что упомянутому первому способу, является код «Манчестер-II». Форма биполярного сигнала при передаче кода «Манчестер-II» показана на рис. 2, *в*. Единица кодируется отрицательным перепадом сигнала в середине битового интервала, нуль — положительным перепадом. На границах битовых интервалов сигнал при не-

обходимости изменяет значение, «готовясь» к отображению очередного бита в середине следующего битового интервала.

С помощью кода «Манчестер-II» решаются сразу все отмеченные ранее проблемы. Поскольку число положительных и отрицательных импульсов на любом достаточно большом отрезке времени равно или отличается не более чем на один импульс, что не имеет значения, постоянная составляющая равна нулю.

Подстройка часов приемника или ретранслятора производится при передаче каждого бита, т. е. снимается проблема потери синхронизации при передаче длинных цепочек нулей или единиц.

Спектр сигнала содержит только две логические составляющие: F и $2F$, где F — скорость передачи информационных битов. Наличие только двух (а не трех или более) электрических уровней сигнала позволяет надежно их распознавать (хорошая помехозащищенность).

Критерием ошибки может являться «замораживание» сигнала на одном уровне на время, превышающее время передачи одного информационного бита, поскольку, независимо от передаваемого кода, сигнал всегда «колеблется» и никогда не «замирает». Но за эти чрезвычайно полезные качества

приходится платить удвоением требуемой частотной полосы связной аппаратуры. Поэтому код «Манчестер-II» широко используется там, где частотные ограничения не являются определяющими.

Код AMI

Второй способ введения избыточности связан с добавлением дополнительных электрических уровней, в простейшем случае — третьего, «нулевого» уровня.

На рис. 2, *г* приведена форма сигнала с попеременной инверсией знака, так называемого AMI-сигнала (Alternative Mark Inversion). Нули кодируются отсутствием импульсов, а единицы — попеременно положительными и отрицательными импульсами. Постоянная составляющая сигнала AMI равна нулю. Поэтому при передаче длинной последовательности единиц синхронизация не теряется. Но синхронизация нарушается при передаче длинной последовательности нулей, как и в коде NRZ.

Обнаруживаются ошибки, нарушающие правильную последовательность знакопеременяющихся сигналов.

Коды BNZS, HDB3

Потеря синхронизации при передаче длинной последовательности нулей предотвращается таким образом: цепочки нулей передатчик заменяет определенными «заготовками», которые представляют собой «кусочки» стандартных временных диаграмм. Коды AMI, в которых цепочка из N нулей заменяется определенной подстановкой, называются BNZS-кодами (Bipolar with N Zeroes Substitution).

В коде B3ZS (рис. 2, *д*) каждые три последовательно расположенные нуля подменяются либо комбинацией B0V, либо 00V. Символ B обозначает импульс, который отвечает правилам кодирования AMI. Символ V обозначает импульс, который нарушает правила кодирования AMI (совпадает по полярности с предыдущим).

Выбор одной из этих двух «заготовок» производится так, чтобы, во-первых, число импульсов B между двумя последовательно расположенными импульсами V было нечетным, а во-вторых, чтобы полярность импульсов V чередовалась.

В коде B6ZS (рис. 2, *е*) каждые шесть последовательных нулей подменяются комбинацией 0VB0VB.

Коды BNZS получили широкое распространение в компьютерных сетях США и Канады: линии T1 —

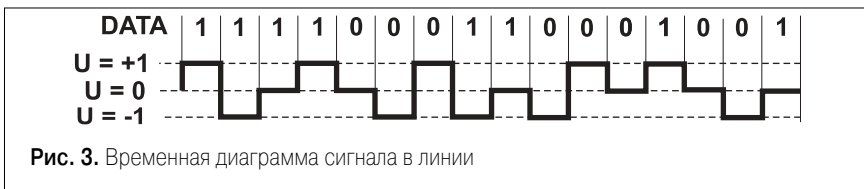


Рис. 3. Временная диаграмма сигнала в линии

1,544 Мбит/с, T1C — 3,152 Мбит/с, LD-4 — 274,176 Мбит/с, T4 — 274,176 Мбит/с. В странах Западной Европы широко используется код HDB3 для работы на скоростях 2,048 и 8,448 Мбит/с. Этот код очень похож на BNZS, поскольку максимально допустимое число нулей, стоящих в цепочке, равно трем.

Каждые четыре последовательно расположенных нуля подменяются комбинацией 000V либо В00V. Выбор той или иной комбинации производится так, чтобы, во-первых, число импульсов В между двумя последовательными импульсами V было нечетным и, во-вторых, чтобы полярность импульсов V чередовалась (рис. 2, ж).

Существуют также другие распространенные коды, такие как CMI, PST, 4ВЗТ и т. п. Все они являются разновидностями кодов АМІ и созданы с целью минимизации требований к полосе пропускания каналов связи и увеличения обнаруживающей способности по отношению к ошибкам при передаче информации.

Трехуровневое кодирование сигнала с гарантированным изменением уровней между соседними битовыми интервалами

Как следует из вышесказанного, для надежного восстановления «синхросетки» приемником желательно так закодировать данные, чтобы сигнал изменялся как можно чаще, в идеальном случае — в каждом битовом интервале. Эта цель, как было показано, достигается при использовании кода «Манчестер-II» (и подобных ему) ценой расширения

спектра сигнала. Напомним, что код «Манчестер-II» имеет ограниченную область применения. Да и его дешифрация сравнительно сложна.

В системе передачи данных применено трехуровневое кодирование сигнала. Как и в других кодах, между двумя проводами линии может присутствовать отрицательное, нулевое или положительное напряжение, сокращенно $U = -1$, $U = 0$, $U = +1$. Но данное решение интересно тем, что созданы «гарантии» изменения уровня сигнала при переходе от одного битового интервала к другому независимо от вида передаваемой последовательности битов, что подтверждается временной диаграммой на рис. 3.

В этой диаграмме встречаются все сочетания соседних битов (00, 01, 10, 11) и их однородные цепочки (1111 и 000). Тем не менее сигнал всегда изменяется при переходе от одного битового интервала к другому. На первый взгляд, неясно, каким образом был достигнут столь примечательный результат. Но вскоре мы убедимся, что правила кодирования и декодирования очень просты.

Как следует из рис. 4, передатчик содержит двухразрядный регистр RG1, логическую схему L1 и преобразователь S трехуровневого сигнала. Приемник содержит преобразователь R трехуровневого сигнала в двухуровневые (лог. 0, лог. 1), двухразрядный регистр RG2 и логическую схему L2.

В начале очередного битового интервала по фронту синхросигнала CLK в регистре RG1 фиксируется двухразрядный код, сформирован-

ный логической схемой L1 в предыдущем битовом интервале. С незначительной задержкой, достаточной для надежной фиксации кода в регистре RG1, на вход передатчика подается очередной бит DATA. Далее на протяжении битового интервала на входах логической схемы L1 присутствует результат обработки предыдущего бита (код, отображающий предыдущее состояние передатчика) и очередной бит данных. Логическая схема L1 на основе анализа входной комбинации сигналов формирует двухразрядный код, который определяет новое состояние передатчика. В зависимости от сочетания сигналов на выходе логической схемы L1 формирователь S трехуровневого сигнала выдает в провода линии нулевое, положительное или отрицательное напряжение.

Переходы передатчика между тремя возможными состояниями можно проследить по диаграмме, приведенной на рис. 5.

Передатчик может находиться в трех состояниях, выделенных на рис. 5 кружками. Эти состояния обозначены в соответствии с принятыми ранее сокращениями.

Стрелками обозначены переходы из одного состояния в другое. Цифра 0 или 1 около стрелки соответствует значению очередного бита DATA. Из рис. 5 следует, что при передаче цепочки битов 111...1 траектория переходов по диаграмме соответствует движению по часовой стрелке, а при передаче цепочки 000...0 — движению в обратном направлении. Передача «случайных» данных сопровождается «блужданием» между тремя состояниями. Следовательно, не бывает ситуаций, при которых одно и то же состояние повторяется в соседних тактах.

Преобразователь R трехуровневого сигнала в двухуровневые (рис. 4) формирует двухразрядный

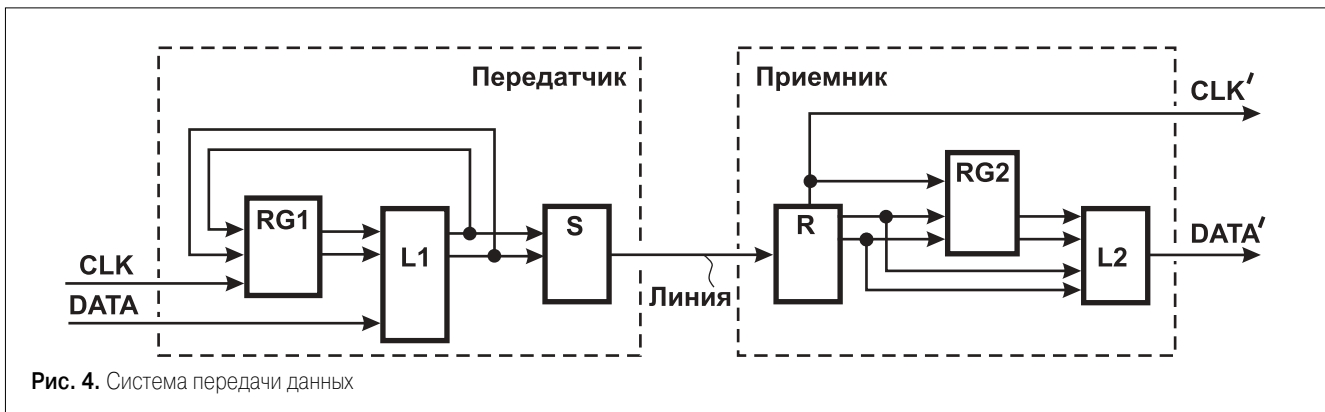
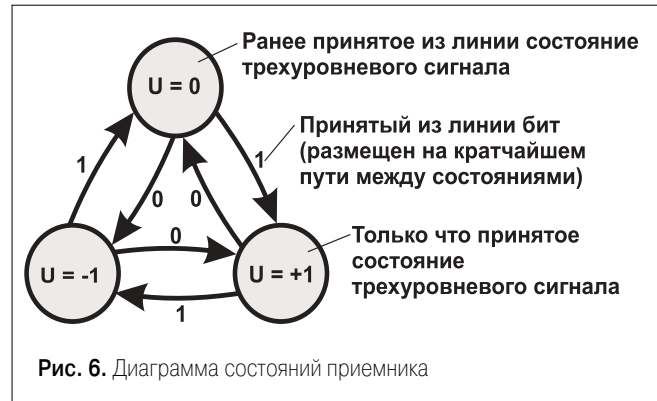
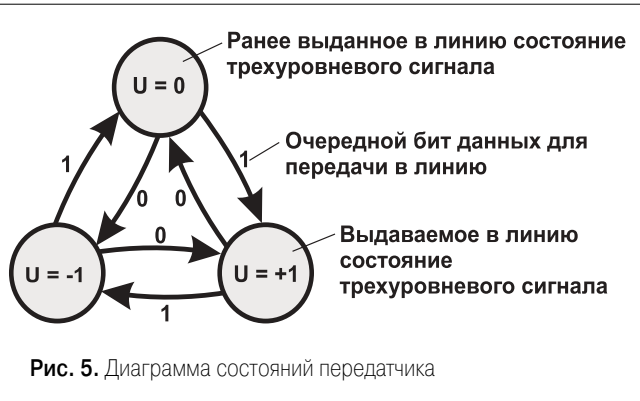


Рис. 4. Система передачи данных



код текущего состояния сигнала в линии и выделяет синхросигнал на основе регистрации фронтов импульсов. В начале очередного битового интервала в регистре RG2 фиксируется предыдущее состояние линии, так что логическая схема L2 оперирует предыдущим и текущим состояниями трехуровневого сигнала. В зависимости от их комбинации можно сделать однозначный вывод о том, какой бит (лог. 0 или лог. 1) поступил на вход приемника.

Декодирование сигналов в приемнике поясняется той же диаграммой, что и предыдущая, но с несколько иной интерпретацией событий (рис. 6).

Предположим, что ранее принятое и текущее состояния трехуровневого сигнала соответствуют показанным на рис. 6. Непосредственный переход между этими состояниями возможен только при приеме единичного бита. Поэтому на выходе логической схемы L2 формируется сигнал $DATA' = 1$.

Особенность этой схемы кодирования/декодирования состоит в том, что при передаче цепочки битов вида 010101... в зависимости от предыстории может случиться так, что все импульсы будут иметь одинаковую полярность. Это означает, что в сигнале появится постоянная составляющая, что для многих систем

недопустимо. Чтобы избежать этого, можно применить скремблирование данных на входе передатчика и их дескремблирование на выходе приемника. Напомним, что применение этих операций позволяет получить «псевдослучайный» поток битов, в котором устранены нежелательные закономерности их чередования.

**Борис Шевкопляс,
Сергей Сухман,
Аркадий Бернов,
borissh@zemail.ru
www.zelax.ru
АО Зелакс**

Продолжение следует