

# Анализ сигналов в манчестерском и NRZ-коде с произвольными параметрами при помощи осциллографов серии RTE компании R&S

## Часть 1

Николай Лемешко (nlem83@mail.ru),  
Павел Струнин (Pavel.Strunin@rohde-schwarz.com)

Цифровые сигналы в манчестерском и NRZ-коде с параметрами, определяемыми разработчиками оборудования, не относящиеся к широко распространённым стандартам, часто используются в устройствах на базе микроконтроллеров. В первой части статьи показана возможность анализа таких сигналов с использованием программных опций, в частности, реализованных на базе осциллографов компании Rohde&Schwarz серии RTE.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в активном использовании находится большое количество стандартных протоколов, предназначенных для передачи данных в цифровом формате. Унификация стандартов обеспечивает техническую совместимость и взаимозаменяемость электронных блоков, а также модернизацию и наращивание функциональности технических средств. В качестве примеров можно привести получивший глобальное распространение стандарт передачи данных USB 2.0 [1], широко применяемые в авиационной электронике стандарты MIL-1553 [2] и Arinc-428 [3]. Большинство стандартов цифровой передачи данных предполагают возможность построения сетей, объединяющих передающее и несколько приёмных устройств, а также передачу данных путём группировки бит в пакеты, построенные по заданному принципу.

Несмотря на различия подходов к организации передачи данных, все цифровые стандарты используют двоичную систему исчисления для присвоения значений битам, которые могут кодироваться как при помощи потенциальных уровней (потенциальная логика), так и при помощи фронтов и спадов (динамическая логика). Названные типы кодирования универсальны и могут использоваться принципиально для любых цифровых интерфейсов.

Несомненным достоинством широко внедрённых стандартов цифровой передачи данных является их реализация в виде аппаратных модулей микро-

контроллеров некоторых типов, что устраняет необходимость программной реализации алгоритмов функционирования соответствующих интерфейсов, в особенности с учётом их сложности [1]. Такая поддержка позволяет производителям существенно расширить область применения микроконтроллеров и упрощает разработку электронных устройств.

Как следует из изложенного, к настоящему времени внедрение стандартных цифровых интерфейсов оказалось весьма широким. Однако это не означает, что их использование – единственный выход для разработчиков электронных устройств. В ходе программирования микроконтроллеров часто возникает потребность в передаче и приёме небольших объёмов информации в синхронном либо асинхронном режиме. Уровни таких сигналов обуславливаются типом логики микроконтроллера и напряжением электропитания, а кодирование может осуществляться в потенциальном, динамическом либо смешанном режиме, при этом битовая скорость будет ограничена возможностями микроконтроллера.

Таким образом, универсальность структуры цифровых сигналов позволяет разработчикам реализовывать собственные протоколы передачи данных либо элементарные битовые последовательности. При этом целесообразно использовать:

- для потенциальной логики – принципы NRZ-кодирования (No Return to Zero), при этом отдельные биты

кодируются разными уровнями напряжения;

- для динамической логики – принципы манчестерского кодирования, при этом элементы битовой последовательности кодируются фронтами и спадами в составе цифрового сигнала.

Пользовательские стандарты передачи данных обладают высокой гибкостью и простотой программной реализации в сравнении со стандартизованными протоколами, и потому ими не следует пренебрегать в инженерной практике. Однако здесь возникает вопрос о средствах измерений, функциональность которых позволяет выполнить отладку устройств с пользовательскими стандартами передачи данных.

### ОСОБЕННОСТИ МАНЧЕСТЕРСКОГО И NRZ-КОДИРОВАНИЯ

Манчестерское кодирование предусматривает перевод информационной последовательности в код с использованием тактирования и принципов работы динамической логики (см. рис. 1). Сигнал в манчестерском коде может быть как однополярным, так и двухполярным, причём последний вариант предпочтительнее, поскольку статистически не содержит постоянной составляющей. Основой кодирования служит операция «исключающее ИЛИ». В коде Manchester логическая единица передаётся импульсным переходом от высокого уровня к низкому, логический ноль – за счёт обратного перехода в середине интервала передачи бита. Стандарт [4] определил код Manchester II, для которого используется противоположный принцип кодирования. Синхронизация осуществляется за счёт частых переходов между высоким и низким уровнями напряжения, что помогает поддерживать стабильную тактовую частоту при обработке битовой последовательности.

Иногда используется и дифференциальное манчестерское кодирова-

ние. Суть его состоит в том, что логический ноль кодируется изменением состояния в начале значащего интервала, а логическая единица – сохранением предыдущего уровня. Для синхронизации смена уровней сигнала осуществляется каждый раз в середине битового интервала (см. рис. 1).

Манчестерское кодирование используется в таких протоколах, как ProfiBus [5], DALI (Digital Addressable Lighting Interface [6, 7]), MVB (Multifunction Vehicle Bus [8]) и Ethernet 10BASE-T [4].

Основными достоинствами манчестерского кода являются:

- самосинхронизация;
- элементарная аппаратная реализация кодирования;
- возможность формирования дифференциального сигнала, в котором статистически отсутствует постоянная составляющая, заряжающая распределённую ёмкость в линии передачи и увеличивающая системную задержку распространения сигналов.

Структура манчестерского кодирования отличается наличием множества переходов между фиксированными уровнями, что обеспечивает синхронизацию приёмного устройства. В тех случаях, когда скорость передачи данных может варьироваться в широких пределах и предъявляются особые требования к синхронизации, весьма часто используется RZ-кодирование (Return to Zero). Такой код является трёхуровневым и обязательно имеет нулевое состояние, переход к которому всегда осуществляется в середине передачи бита, что и обеспечивает синхронизацию приёмного и передающего устройств на каждом таком интервале. В большинстве случаев логическому нулю соответствует положительное напряжение, логической единице – отрицательное напряжение. Достоинства RZ-кода следуют из его структуры [9]. Он прост в реализации в сравнении с многоуровневыми способами кодирования, поскольку основан всего на трёх потенциальных уровнях. Сигнал в RZ-коде статистически не имеет постоянной составляющей.

У манчестерского и RZ-кода есть общий недостаток, состоящий в необходимости использования вдвое большей полосы частот, чем при передаче элементарной битовой последовательности с той же тактовой частотой. Для больших скоростей это существенно, поскольку требует использования

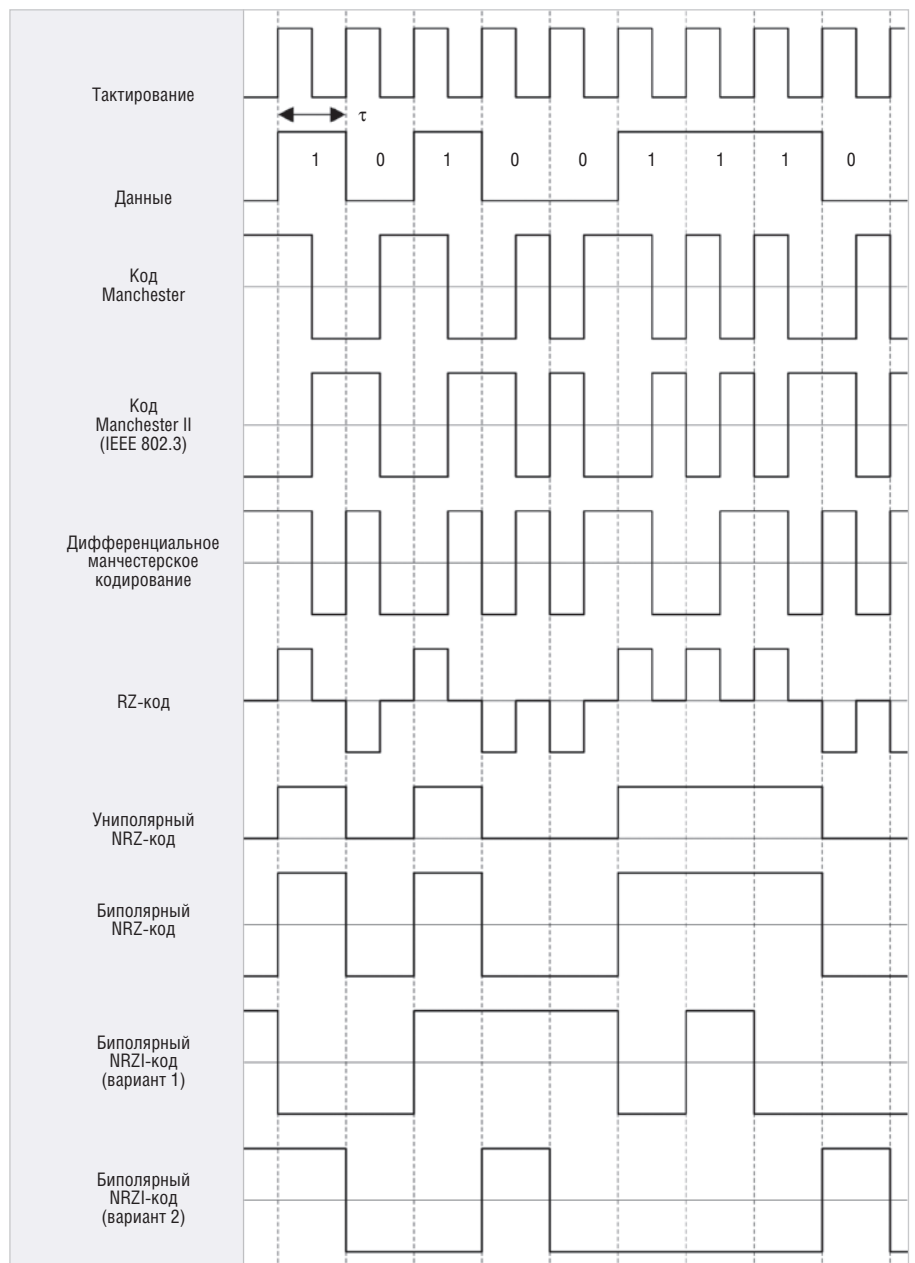


Рис. 1. Принцип формирования цифрового сигнала в манчестерском и NRZ-коде

линий передачи с малыми потерями и отрицательно сказывается на целостности сигналов. Этому недостатка лишён NRZ-код (non Return to Zero), или код без возвращения к нулю.

В данном случае по форме сигнал похож на исходную битовую последовательность (см. рис. 1). Логическому нулю соответствует низкий уровень сигнала, логической единице – высокий. Различают два вида NRZ-кода: униполярный и биполярный, причём последний применяется и при дифференциальной передаче сигналов. Структура униполярного кода характеризуется наличием постоянной составляющей, у биполярного NRZ-кода она отсутствует. Строго говоря, полноценным NRZ-кодом является только биполярный его вид.

NRZ-код не является самосинхронизирующимся, поскольку в нём не предусмотрены последовательности, по которым возможно синхронизировать приёмник с передатчиком. Для обеспечения синхронизации в последовательность специально вводят детерминированный процесс, например стартовый и стоповый биты [9], по которому происходит выравнивание тактовой частоты приёмника и передатчика. По такому принципу построены интерфейсы RS-232 [10], RS-485 [11].

На схожих принципах построено NRZI-кодирование (Non Return to Zero Invertive, код без возвращения к нулю с инвертированием), при котором само понятие логических единиц и нулей несколько размывается. Как показано на рисунке 1, существуют два вариан-



**Рис. 2. Пример стартовой и завершающей последовательностей, построенных на основе четверичных символов в сочетании с манчестерским кодированием**

та кодирования. Первый состоит в том, что смена уровня напряжения происходит только при передаче логической единицы, а при передаче логического нуля напряжение не меняется. Второй вариант предполагает смену уровня напряжения только при передаче логического нуля. Уменьшение количества таких переходов положительно влияет на энергопотребление.

Как и в предыдущих случаях, для NRZI-кодирования основной проблемой является синхронизация. При передаче длинных последовательностей с неизменным уровнем напряжения могут возникнуть битовые ошибки. По этой причине, например, в стандарте USB 2.0 предусмотрено обязательное включение дополнительных бит, вызывающих смену уровня напряжения, если таковые отсутствуют в подлежащей передаче информации.

Манчестерское и NRZ-кодирование могут быть сравнительно легко реализованы при использовании микроконтроллеров. Этим обосновано их использование для реализации частных алгоритмов передачи данных, которые будут отличаться широким диапазоном уровней напряжения и битовых скоростей, определяемых объемами передаваемой информации в конкретном устройстве. Формирование и обработку дифференциальных манчестерского и NRZI-кода несколько сложнее алгоритмизировать, кроме того, последний требует особых условий для достижения синхронизации.

**Использование нарушений в алгоритме манчестерского кодирования**

Манчестерский и NRZ-код имеют принципиально отличающуюся структуру. Если в NRZ-коде любое состояние может трактоваться с позиции передаваемой битовой последовательности, то в манчестерском с ней могут быть сопоставлены только фронты и спады, которые передаются в середине битового интервала. Следовательно, например,

состояние, когда такие переходы отсутствуют в течение более чем одного битового интервала, не трактуется как приём информации, но может быть использовано для других целей. В частности, такие нарушения могут встречаться:

- в сигнальных конструкциях, указывающих начало и конец передачи битового пакета;
- в паузах между передачей пакетов (состояние бездействия);
- в начале передачи пакета при использовании служебного фронта, переводящего сигнал к требуемому для начала передачи уровню;
- при неправильном определении битовой скорости – в особенности если она определяется автоматически.

Для описаний нарушений в структуре манчестерского кода целесообразно использовать четверичные символы, сопоставленные с некоторыми битовыми интервалами. При этом высокому уровню соответствует символ «Н», низкому – «L». На рисунке 2 показан пример такого сопоставления. В данном случае начало и конец передачи пакета в некотором пользовательском стандарте закодированы двумя последовательностями: Н – L – Н и L – L – Н соответственно. После стартовой последовательности показано поле «Адрес» длиной в 3 бита (текущее значение 0x4) и поле данных длиной 8 бит (значение 0xBB), закодированные в манчестерском коде. Определение старших бит показано условно.

Отмеченное на рисунке 2 состояние бездействия в виде низкого уровня сигнала не является единственно возможным. Если рассматривать биполярный манчестерский код, то весьма просто реализуется третье состояние, когда напряжение на выходе источника сигналов равно нулю. Более того, такое решение предпочтительнее с точки зрения энергосбережения и оптимизации быстродействия. Если формирователь сигналов имеет такое третье состояние, то именно по нему приёмник определяет переход в режим бездействия. В про-

тивном случае приёмник должен иметь счётчик состояний Н или L для определения достижения такого режима.

Важным вопросом является определение момента времени, соответствующего началу передачи пакета. Поскольку ему обычно предшествует состояние бездействия, то для перехода к стартовой последовательности может потребоваться дополнительный перепад. В случае если стартовая последовательность отсутствует и пакет начинается сразу с обычного манчестерского кода, такой перепад используется обязательно. Ввиду этого при разработке пользовательского протокола передачи данных следует однозначно определить, является ли первый перепад в сигнале информационным или служебным.

Как видно из рисунка 2, середина стартовой последовательности L – Н – L может трактоваться как последовательная передача единичного и нулевого бита. Используемые алгоритмы оценки битовой скорости зачастую трактуют состояния Н и L как снижение битовой скорости, что приводит к завышению битового интервала  $\tau$  и «потере» бит в приёмном устройстве. Таким образом, правильное отслеживание приёмником состояний Н и L возможно только при известной битовой скорости.

**Особенности анализа манчестерского и NRZ-кодирования с пользовательскими характеристиками**

Цифровые сигналы обычно принято анализировать во временной области. Если на основе манчестерского или NRZ-кодирования сформирован последовательный код, то для его анализа целесообразно использовать осциллографы, для параллельного кода – логические анализаторы. Пользовательские стандарты передачи данных обычно реализуют первый вариант и построены по некоторому детерминированному алгоритму. Поскольку биты, особенно при наличии в системе нескольких приёмников, обычно объединяются в машинные слова (кадры) и передаются группами, то использование осциллографии в её чистом виде нерационально по следующим причинам:

- возникают проблемы синхронизации: сигнал не является периодическим, а запуск по произвольным фронтам и спадам не позволяет отображать осциллограммы машинных

слов (МС) точно с первого бита или с начала стартовой последовательности;

- затруднён анализ содержимого полей в машинном слове: его длина может достигать сотен бит, а наличие четверичных символов для манчестерского кода легко приводит к ошибкам в анализе структуры сигнала;
- необходим ручной пересчёт содержимого полей машинного слова в требуемую систему исчисления.

Таким образом, область применения классической осциллографии здесь ограничивается измерением электрических параметров сигналов и, при необходимости, битовой скорости. Однако её можно существенно расширить, если средство измерений имеет опцию, предназначенную для анализа сигналов с характеристиками, определёнными пользовательским стандартом передачи данных. Примером является опция R&S RTE-K50, реализованная на базе осциллографов R&S серии RTE.

### Функциональные возможности опции R&S RTE-K50

Опция R&S RTE-K50 предназначена для анализа последовательных протоколов, построенных на основе кодов Manchester и Manchester II, а также NRZ-кода в вариантах с синхронизацией и без неё [12]. Опция допускает поступление декодируемых сигналов не только с аналоговых входов осциллографа, но и с логического пробника (опция R&S RTE-B1). Тактирование возможно только сигналом с аналоговых каналов. Для правильного анализа задаются значения напряжений высокого и низкого уровней из интервала  $-25...+25$  В, в т.ч. для сигнала тактирования, битовой скорости, а также временного интервала, позволяющего отличать состояние бездействия от последовательностей одинаковых четверичных символов H или L (для манчестерского кодирования).

Для правильного декодирования информации в полях МС необходимо выбрать нормальный или инвертированный режимы. В нормальном режиме принцип манчестерского кодирования обоих видов соответствует представленному на рисунке 1. В случае NRZ-кодирования по умолчанию логическая единица передаётся при превышении заданного порогового уровня; кроме того, должны быть заданы уровень сигнала в состоянии бездействия,

а также вид перепада, с которого начинается информационный сигнал после периода бездействия. Для синхронизированного NRZ-кода дополнительно нужно указать характеристики сигнала синхронизации, для манчестерских кодов – несёт ли первый фронт в начале МС информацию после выхода из состояния бездействия.

Для управления декодированием машинных слов в NRZ-коде можно использовать дополнительное условие, состоящее в том, что на другом входе осциллографа на опорной или расчётной осциллограмме напряжение будет выше или ниже заданного порога. Значения для высокого и низкого уровней анализируемых сигналов могут задаваться непосредственно, а также в виде средней величины интервала напряжений для сигнала или равных по модулю и противоположных по знаку показателей, что снижает вероятность ошибок при декодировании. В случае NRZ-кода с тактированием устанавливаются одинаковые пороговые уровни для обоих сигналов.

Задание битовой скорости в опции R&S RTE-K50 реализуется в зависимости от вида кодирования, но таким образом, чтобы не возникало противоречий при обработке сигналов. Для манчестерского кодирования она может быть определена автоматически, для тактируемого NRZ-кода она определяется синхросигналом, а для NRZ-кода без тактирования битовая скорость должна быть задана обязательно. Доступное значение составляет от 300 бит/с до 50 Мбит/с. Временной интервал для идентификации состояния бездействия обязательно задаётся при NRZ-кодировании без тактирования, а также при любом типе кодирования, если используется дополнительное условие запуска.

Для выделения отдельных МС каждое из них описывается с указанием наименований и длины полей, а также порядка следования бит. Дополнительно можно указать значения для однозначно определяемых полей данных, и при соответствующих настройках по содержанию этих полей будет осуществляться идентификация типов кадров. На основе этого, как будет показано далее, можно определять наличие МС, не включённых в лексикон протокола передачи данных.

Дополнительные настройки опции R&S RTE-K50 связаны с синхронизацией для запуска развёртки по содержа-

мому МС. Для этого могут быть выбраны стартовые последовательности, а также произвольные битовые последовательности в составе МС. Такие настройки позволяют целенаправленно искать сигнальные конструкции определённого вида, что удобно использовать при большом количестве типов МС.

Как видно из представленного описания, опция R&S RTE-K50 позволяет учесть особенности манчестерского и NRZ-кода с пользовательскими настройками и сформированных на их основе машинных слов. Широкий диапазон функций позволяет перекрыть потребности разработчиков, использующих собственные протоколы передачи данных, за исключением, возможно, крайне специфических случаев.

Во второй части статьи будут приведены примеры использования этой опции для декодирования сигналов в манчестерском и NRZ-коде.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Universal Serial Bus Specification.
2. ГОСТ Р 52070-2003. Интерфейс магистральной последовательной системы электронных модулей. Общие требования. – М.: ИПК Стандартов, 2003. – 27 с.
3. ARINC 429 Protocol Tutorial. Aeronautical Radio, doc. No. 40100001.
4. IEEE Standard for Ethernet (802.3-2015).
5. Digital data communications for measurement and control. Fieldbus for use in industrial. Control systems. Part 2: Physical layer specification and service definition. International standard (IEC 61158).
6. AC and/or DC-supplied electronic control gear for tubular fluorescent lamps. Performance requirements. International standard (IEC 60929).
7. Digital addressable lighting interface. Part 102. General requirements. Control gear. International standard (IEC 62386).
8. Electronic railway equipment – Train communication network (TCN). Part 2-1. Wire Train Bus (WTB) International standard (IEC 61375-2-1).
9. Шувалов В.П., Захарченко Н.В. Передача дискретных сообщений: учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1990. – 464 с.
10. Гуж М.Ю. Аппаратные интерфейсы ПК. Энциклопедия. – СПб: Питер, 2002. – 528 с.
11. Парк Дж., Маккей С., Райт Э. Передача данных в системах контроля и управления: практическое руководство. – М.: Группа ИДТ, 2007. – 480 с.
12. R&S® RTE Digital Oscilloscope. User Manual. V.13 (FW 3.70).

