

ЭКВАЛАЙЗЕРЫ В ЦИФРОВЫХ КАБЕЛЬНЫХ ИНТЕРФЕЙСАХ

В современной связи налицо конкуренция беспроводных и проводных (кабельных) интерфейсов. Снижение цены электронных устройств привело к тому, что беспроводные интерфейсы стали дешевле кабельных. Однако они уступают кабельным по пропускной способности примерно в 10 раз. Есть все основания считать, что такое отставание сохранится и в обозримом будущем. Кроме того, беспроводные интерфейсы слабо защищены от несанкционированного доступа.

Проводные системы связи и их интерфейсы незаменимы при организации взаимодействия компьютеров между собой и с периферийными устройствами. Однако применение кабельных интерфейсов ограничено стоимостью, весом и габаритами кабеля. Снижение этих параметров требует уменьшения сечения кабеля, что увеличивает затухание передаваемых сигналов. Ключевым моментом здесь может стать использование эквалайзеров, выравнивающих амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) интерфейсов и компенсирующих увеличение затухания. Разработке интегральных микросхем (ИМС) таких эквалайзеров посвящен материал, представленный в статье.

КАБЕЛЬНЫЕ ЭФФЕКТЫ

Электрические свойства витой пары полностью характеризуются ее первичными параметрами: сопротивлением по постоянному току R и индуктивностью L проводников, емкостью между проводниками C, проводимостью изоляции G (рис. 1). Реактивные параметры L и C ограничивают ее АЧХ в целом, а параметры C и R, возрастающие с частотой (рис. 2), приводят к завалу высокочастотной (ВЧ) части спектра передаваемого сигнала.

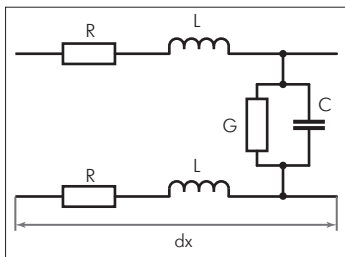


Рис. 1. Простая эквивалентная схема витой пары

По стандарту TIA/EIA-568-A для кабелей категории 3 на длине 100 м емкость C не должна превышать 6,6 нФ, для кабелей

категории 4 и 5 – 5,6 нФ, а сопротивление R любого проводника витой пары не должно превышать 9,38 Ом при температуре 20°C.

Вторичные параметры витой пары: волновое сопротивление, или импеданс, Z; собственное (в идеальных условиях) и рабочее (в реальных условиях) затухание кабеля A рассчитываются на основе первичных параметров или определяются экспериментально. Они нормируются в ТУ на витую пару, позволяют провести инженерный расчет таких линий связи и оценить их пригодность для передачи требуемых сигналов.

Для витых пар в области звуковых частот Z примерно равно 600 Ом, падая, по мере увеличения частоты выше 1 МГц, до 100 Ом. Затухание A зависит (обычно линейно) от длины витой пары. Для расчетов пользуются погонным затуханием α (затуханием на длине 100 м). Для витой пары на высоких частотах большая часть энергии идет на излучение в окружающее пространство. Для минимизации потерь на излучение применяют балансную передачу и экранирование.

Из эквивалентной схемы на рис. 1 можно сделать вывод, что затухание с ростом частоты растет. По стандарту TIA/EIA-568-A на длине 100 м при температуре 20°C частотная характеристика A(f) максимально допустимого затухания в децибелах (начиная с 0,772 МГц) для кабелей категорий 3, 4 и 5 определяется согласно выражению

$$A(f) = k_1 \cdot \sqrt{f} + k_2 \cdot f + \frac{k_3}{\sqrt{f}}, \quad (1)$$

где f – частота сигнала, МГц; k_1 , k_2 и k_3 – константы, определяемые в зависимости от категории кабеля по табл. 1.

Таблица 1. Константы для вычисления затухания

Категория кабеля	k_1	k_2	k_3
3	2,320	0,238	0,000
4	2,050	0,043	0,057
5	1,967	0,023	0,050

Физически затухание кабеля определяется уровнем поглощения в диэлектрике витой пары, уровнем излучения, нагрузочной емкостью и скин-эффектом. Затухание можно оценить, используя эквивалентную схему витой пары (в расчете на худший случай), описанную в стандарте IEEE. 802.3 (рис.3). Номиналы элементов можно скорректировать в зависимости от длины витой пары.

Кабели, применяемые в таких стандартах, как USB и Fire Wire, предусматривают экранирование каждой витой пары. Взаимное влияние сигналов, таким образом, многократно снижается.



Ю.Адамов, Я.Губин, О.Сомов
mail@uniqueics.com

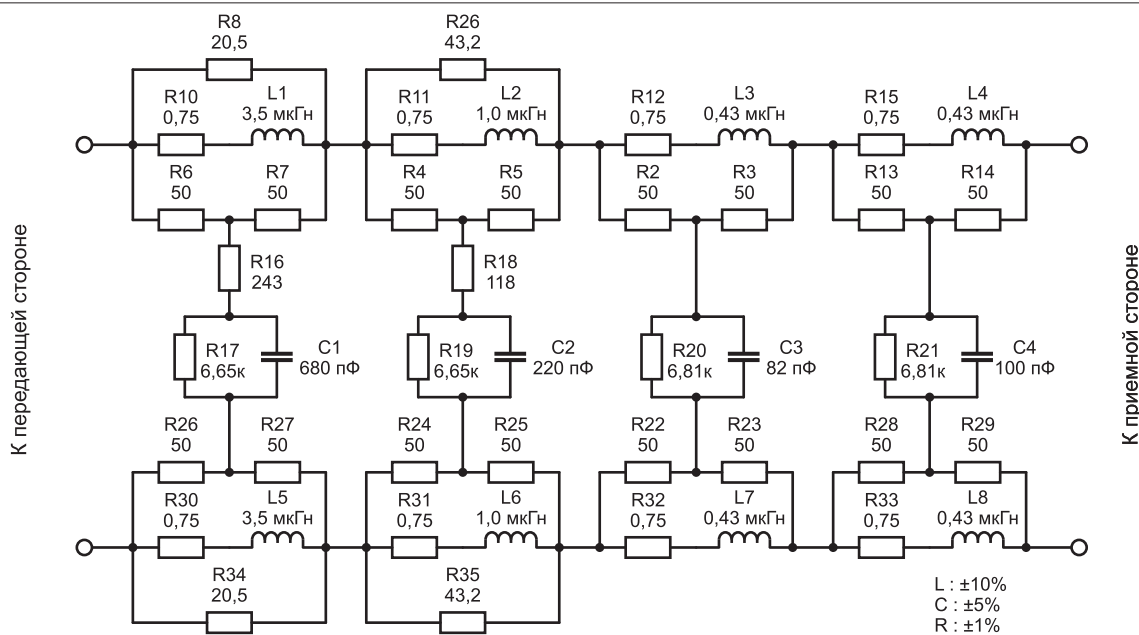


Рис.3. Эквивалентная схема витой пары согласно IEEE 802.3 для наихудшего случая (100 м)

ЭКВАЛИЗЕРЫ – ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА КОРРЕКЦИИ АЧХ КАБЕЛЯ

Сейчас активно ведутся исследования по выравниванию АЧХ кабеля с применением эквалайзеров цифровых последовательных интерфейсов. Это позволяет корректировать форму импульсов для повышения достоверности передаваемой информации. Коррекция проводится в двух точках: транзмиттерные эквалайзеры корректируют форму передаваемых импульсов, а ресиверные – принимаемых импульсов. Сложность проектирования эквалайзеров в том, что заранее не известны параметры используемого кабеля.

Частотная зависимость затухания сигнала в кабеле – причина искажений формы сигналов и межсимвольной интерференции. Сформировать АЧХ эквалайзера в соответствии с формулой (1), используя простые аналоговые фильтры, не удается. В реализуемых на практике схемах применяются простые приближения формулы (1). На рис.4 показаны расчетная зависимость коэффициента затухания для кабеля категории 5 в соответствии с формулой (1) (кривая 1) и ее простейшая аппроксимация (кривая 2):

$$A(f) = p \cdot \sqrt{f}, \quad (2)$$

где f – частота, МГц; p – коэффициент пропорциональности, в $\text{МГц}^{-0.5}$ ($p = 0,1 \text{ МГц}^{-0.5}$ для кабеля категории 5). Ошибка аппроксимации формулой (2) не более 1 дБ при величине $A(f)$ от 1 до 12 дБ. Пользуясь формулой (2) легко реализовать корректирующий фильтр, используемый в известных схемах эквалайзеров.

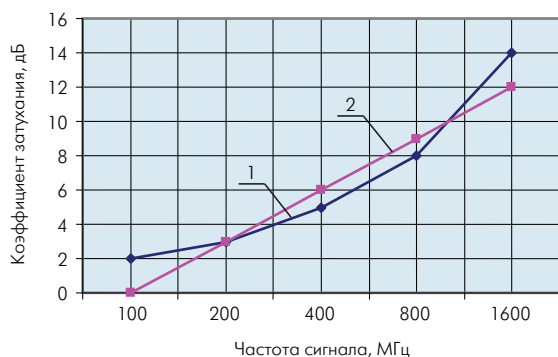


Рис.4. Расчетная зависимость коэффициента затухания кабеля

ЭКВАЛИЗЕРЫ В СИСТЕМАХ СВЯЗИ С ОДНОНАПРАВЛЕННЫМ ПОТОКОМ ИНФОРМАЦИИ

Практически все схемы эквалайзеров предназначены для использования в системах связи с однонаправленным непрерывным потоком информации, например DVI, GigaSTaR. В этих системах сигнал синхронизации передается в линии связи даже при отсутствии информации. Однонаправленный непрерывный поток импульсов имеет широкий, но ограниченный спектр, в котором отсутствуют НЧ-составляющие. В таких системах легко реализуются регенераторы-повторители сигналов. При проектировании системы связи регенераторы включаются в кабельную линию через равные промежутки. Длина отрезка кабеля рассчитывается так, чтобы регенератор с эквалайзером полностью восстановил амплитуду и форму импульсных сигналов.

В регенераторах-повторителях форма импульсов восстанавливается в блоках ресиверных эквалайзеров. Схема регенератора-повторителя приведена на рис. 5. Эквалайзер состоит из двух усилителей с управляемым коэффициентом усиления и заданной АЧХ. Первый усилитель 1 имеет равномерную АЧХ, а усиление второго усилителя 2 пропорционально квадратному корню из частоты. Выходные сигналы усилителей 1 и 2 суммируются в 3, затем поступают на выходной формирователь 4 и блоки обратной связи – полосовые ФНЧ 5 и ФВЧ 6, на детекторы уровня сигналов 7, 8 и на интегрирующие ФНЧ 9, 10. Таким образом, ВЧ-составляющие спектра выходного сигнала регенератора управляют усилителем с неравномерной АЧХ, а НЧ-составляющие – усилителем с равномерной АЧХ. При этом соотношение мощ-

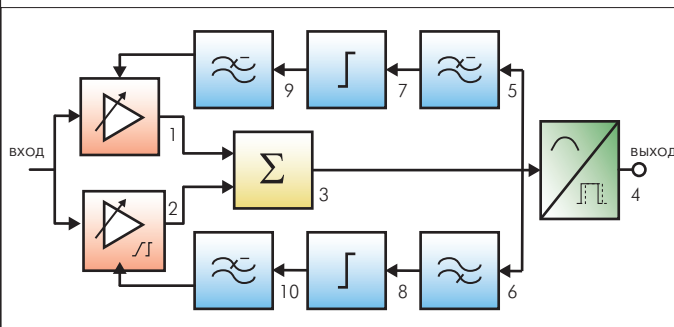


Рис.5. Схема регенератора-повторителя на основе ресиверного эквалайзера

ностей ВЧ- и НЧ-составляющих в спектре всегда постоянно. Кратковременные изменения спектра сигнала усредняются ФНЧ в блоке обратной связи с постоянной времени, которая во много раз больше длительности информационных импульсов. Применение адаптивных регенераторов позволяет передавать импульсные сигналы по кабелю с общей длиной несколько сотен метров без использования эквалайзеров в приемопередатчиках. На рис. 6 показан результат действия эквалайзера на сигнал в линии связи.

Практически все проблемы передачи импульсных сигналов в однонаправленном потоке решаются применением ресиверных адаптивных эквалайзеров и регенераторов – повторителей на их основе.

ЭКВАЛАЗЕРЫ В СИСТЕМЕ СВЯЗИ С ДВУНАПРАВЛЕННОЙ ПАКЕТНОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ ИНФОРМАЦИИ

В кабельных системах связи с двунаправленной пакетной передачей информации (USB, IEEE 1394, Ethernet) адаптивные регенераторы-повторители пока не используются. Для увеличения длины кабеля применяются устройства типа концентраторов (Hub), которые включают полнофункциональные синхронизированные приемопередатчики. Такие решения не позволяют существенно снизить стоимость кабельной системы.

Известны решения, в которых длина кабеля может быть увеличена за счет применения транзитивного синхронного эквалайзера, усиливающего ВЧ-составляющие импульсного сигнала. Ключевая проблема в том, что требуемая величина ВЧ-усиления зависит от длины и параметров кабеля. Теоретически существует возможность адаптивной настройки такого эквалайзера по сигналу, принимаемому от аналогичного передатчика на другом конце кабеля, но в этом случае требуется изменение спецификации и протокола работы системы связи.

Усиление ВЧ-составляющих в отсутствие длинного кабеля создает межсимвольную интерференцию и ухудшает достоверность передаваемой информации. Решение этой проблемы требует корректировки спецификаций интерфейсов, уже используемых для пакетной передачи.

Однако в рамках действующих спецификаций можно улучшить качество сигнала на выходе кабеля, а также увеличить его длину. Для этого авторами предложены два базовых решения. Первое – это повышение достоверности приема сигнала без коррекции АЧХ. Оно достигается благодаря применению синхронного ресиверного эквалайзера, совмещенного с блоком синхронизации входного потока. Второе – использование двунаправленных регенераторов-повторителей с асинхронными транзитивными эквалайзерами. Повторители могут формировать оптимальную для передачи форму сигнала, не соблюдая требований спецификаций. При этом сигналы стандартных интерфейсов восстанавливаются на конце кабеля, а адаптированные сигналы передаются только между повторителями. Это дает возможность применять кабель, не соответствующий спецификации на интерфейсе.

Новый синхронный ресиверный эквалайзер использует свойства сигнала, искаженного прохождением по кабелю. Наибольшую сложность при приеме представляют короткие импульсы, передаваемые

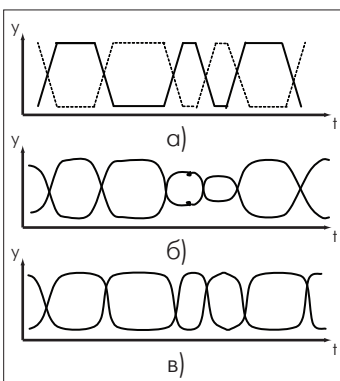


Рис.6. Форма импульсов на выходе передатчика (а), на входе приемника после прохождения кабеля (б) и на выходе ресиверного эквалайзера (в)

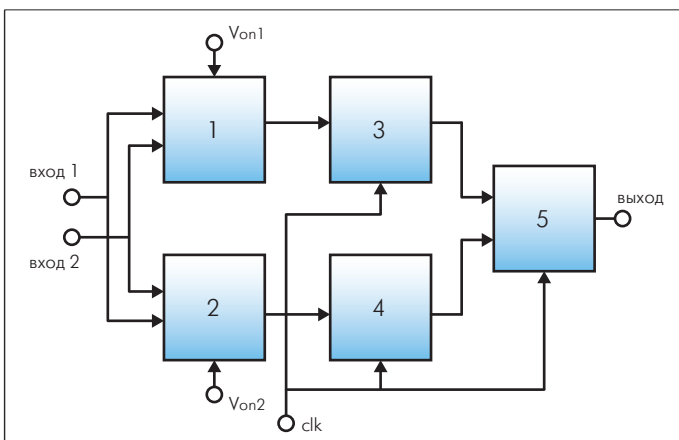


Рис.7. Схема входного блока приемника с новым синхронным эквалайзером

между длинными (см. рис. 6). Выделить короткий импульс заданной полярности можно, изменив порог срабатывания одного входного компаратора. Для выделения импульсов противоположной полярности требуется другой компаратор с порогом срабатывания, смещенным в противоположном направлении.

На рис.7 приведена схема входного блока приемника с двумя смещенными в разном направлении дифференциальными входными компараторами 1, 2. Первый приемный канал выделяет короткие импульсы положительной полярности, второй – отрицательной полярности. Каналы синхронизируются модулями 3, 4 независимо. Логический блок 5 объединяет два синхронных информационных потока, вычисляя входное состояние по табл.2 (в соответствии с логической функцией Q_{n+1}):

$$Q_{n+1} = Q_n X + \overline{Q_n} Y = (\overline{Q_n X})(\overline{Q_n Y}) .$$

Таблица 2. Таблица состояний входов для вычисления Q_{n+1}

Q_n	0/1	0/1	0	0	1	1
Вх.1 (X)	0	1	0	1	0	1
Вх.2 (Y)	0	1	1	0	1	0
Q_{n+1}	0	1	1	0	0	1

Величину смещения порога срабатывания компараторов можно регулировать блоком управления, регистрирующим максимальную амплитуду входного сигнала. В расчетах использовалась величина смещения порога, равная половине амплитуды сигнала. Новый эквалайзер не использует аналоговых фильтров, не требует времени на адаптацию к входному сигналу и практически не увеличивает площадь приемопередатчика на кристалле микросхемы.

При построении регенераторов-повторителей для интерфейсов с пакетной передачей данных важнейшим параметром является время между передаваемыми и принимаемыми пакетами, заданное в спецификации. Оно определяет максимально допустимую задержку сигнала в кабеле и, соответственно, его максимальную длину. Задержка сигнала в регенераторах уменьшает максимальную длину кабеля. Поэтому предпочтительны асинхронные методы обработки сигналов. Кроме этого автономные регенераторы должны быть дешевыми, иметь малое потребление энергии и использовать питание, передаваемое по кабелю.

Авторами предложен новый асинхронный транзитивный эквалайзер с минимальной задержкой сигнала. Он наиболее эффективен в схемах кабельных повторителей, не осуществляющих синхронизацию входного потока данных. Схема эквалайзера приведена на рис.8. Эквалайзер имеет несколько каналов передачи сигнала. Первый (верхний) канал 1 формирует минимальную амплитуду всех выходных



импульсов, то есть обеспечивает равномерную АЧХ выходного сигнала. Остальные каналы – 1 и 3 включаются на заданные промежутки времени и усиливают ВЧ-составляющие сигнала. Временные интервалы работы дополнительных каналов 1 и 3 задаются встроенной линией задержки 2. Переключение сигнала на входе эквалайзера вызывает перезапуск системы отсчета времени вне зависимости от длительности предыдущего импульса. Минимальный временной интервал, формируемый линией задержки 2, выбран немного больше минимальной длительности информационного импульса. Соотношение выходных токов дополнительных каналов обеспечивает формирование амплитуды сигнала пропорционально квадратному корню из частоты соответствующих составляющих. Коэффициент усиления ВЧ-составляющих можно регулировать при настройке системы связи или задавать автоматически – по принимаемому сигналу.

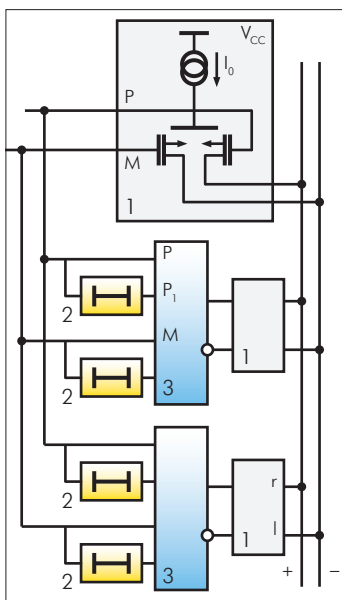


Рис.8. Схема синхронного транзитерного эквалайзера

Пакетная передача информации по кабелю осуществляется в обоих направлениях. Назначение регенератора-повторителя – обработка сигналов, передаваемых в противоположных направлениях. Поэтому в его составе должен быть быстродействующий цифровой автомат, переключающий направления передачи сигнала. Исключение аналоговых фильтров и адаптивных алгоритмов настройки, а также восстановление сигнала только за счет асинхронных транзитерных эквалайзеров позволяет сформировать требуемую АЧХ сигнала сразу после переключения направления передачи.

ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ

Используя изложенные решения, компания "ЮникАйСиз" разработала специализированную ИМС UIC4103CP для использования в устройстве USB-удлиителя. Две ИМС, встроенные в разные концы USB-кабеля, обеспечивают связь устройств и компьютера кабелем

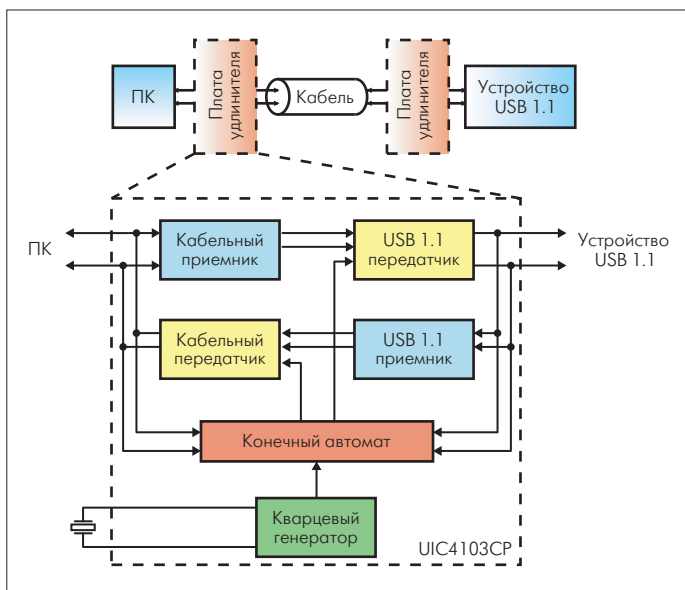


Рис.9. Схема удлинителя кабеля для USB 1.1

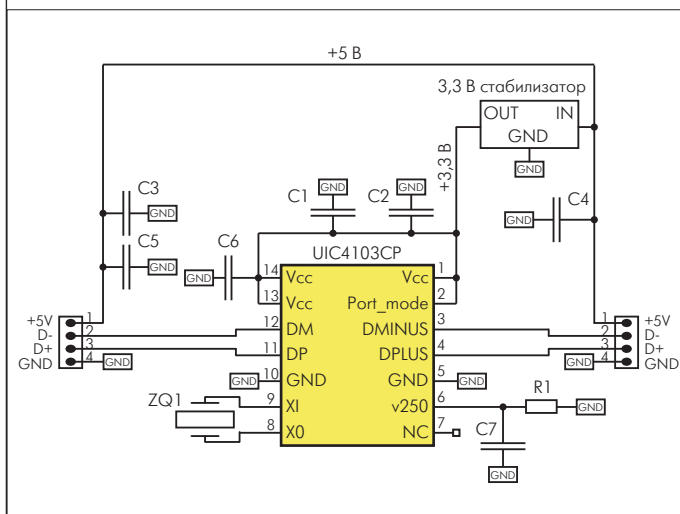


Рис.10. Схема подключения ИМС UIC4103CP

длинной до 40 м. При этом можно использовать как экранированный, так и неэкранированный USB-кабель на базе сетевых кабелей категорий 5, 5E и 6 или на базе других типов кабелей, имеющих не меньше четырех проводников. Максимальная длина удлинителя зависит от категории кабеля. Уже опробованы экранированный кабель USB 2.0, сетевой кабель CAT5 и четырехжильный телефонный кабель.

Оконечные устройства на основе ИМС UIC4103CP, обеспечивающие возможность удлинения кабеля, получают технически проще других существующих устройств, так как состоят из кабеля и всего двух печатных плат, встроенных в его концы (рис. 9). Каждая плата (рис. 10) содержит одну ИМС UIC4103CP в пластиковом корпусе (14 выводов), стабилизатор питания, кварцевый резонатор и небольшое число пассивных элементов.

Следует отметить, что 40 м – это не максимальная, а номинальная длина кабеля, при которой работает весь ассортимент устройств USB 1.1 в высокоскоростном режиме (12 Мбит/с). Для USB устройств, работающих в низкоскоростном режиме (1,5 Мбит/с), можно использовать кабели длиной до 100 м, но в этом случае на удаленном от компьютера конце понадобится дополнительный источник питания из-за падения напряжения на кабеле.

Основные характеристики кабельного удлинителя для интерфейса USB 1.1 на основе ИМС UIC4103CP следующие:

- Поддержка стандарта USB 1.1;
- Работа как в низкоскоростном, так и в высокоскоростном режиме;
- Максимальная длина кабеля при высокоскоростном режиме – 40 м, при низкоскоростном режиме – 100 м;
- Питание осуществляется от USB-кабеля;
- Не требуется установки дополнительных драйверов.

Практика применения эквалайзеров в цифровых кабельных системах с однонаправленной передачей данных показала, что это эффективное и дешевое решение, увеличивающее дальность кабельной связи. При двунаправленной передаче увеличение дальности связи может быть пока достигнуто системными средствами, которые значительно дороже эквалайзеров.

Разработаны технические решения, позволяющие существенно увеличить допустимую длину кабеля благодаря применению эквалайзеров, в том числе и в системах с двунаправленной передачей данных. В ближайшие годы решения с использованием эквалайзеров будут активно развиваться, что сделает их обязательным элементом цифровых интерфейсов.