

«СВЕРХБЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ СИГНАЛЬНЫЕ ПРОЦЕССОРЫ ДЛЯ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ»

Темы и содержание практических занятий (семинаров)

11.04.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи

Оптоэлектронные технологии (фотоника) в инфокоммуникациях

Наименование практических занятий (семинаров)

1. Характеристики современных цифровых сигнальных процессоров
2. Архитектура цифрового сигнального процессора
3. Характеристики оптических сигналов
4. Применение сигнальных процессоров при формировании оптических сигналов
5. Алгоритмы обработки сигналов с целью их восстановления на приеме

Контрольные вопросы (вопросы для подготовки к семинарам)

1. Искажения оптических сигналов в многопролетных волоконно-оптических трактах.
2. Основные функциональные элементы сигнального процессора?
3. Аналого-цифровое преобразование и представление оптических сигналов.
4. Принципы и виды когерентного приема.
5. Понятие цифрового фильтра.
6. Типы цифровых фильтров
7. Методы формирования оптических сигналов
8. Простые и сложные форматы модуляции
9. Электрооптическое преобразование сигналов
10. Оптоэлектронное преобразование сигналов
11. Характеристики оптических сигналов

Теоретические сведения для подготовки к семинарам

Цифровой сигнальный процессор и обработка сигналов

DSP (Digital Signal Processor) (в переводе с английского языка, означает цифровой сигнальный процессор (ЦСП) или, его еще называют, как сигнальный микропроцессор (СМП) с его архитектурой, оптимизированной для оперативных потребностей цифровой обработки сигналов) - специализированный микропроцессор, особенностью работы которого является поточный характер обработки больших объемов данных в реальном масштабе времени и, обычно, с интенсивным обменом данных с другими внешними устройствами. (Нужен для преобразования сигналов, представленных в виде цифр, как правило, в режиме реального времени).

Реальный масштаб времени (реальное время работы, Real Time Scale) – это такой режим работы устройства, при котором регистрация и арифметическая обработка (а при необходимости и анализ, визуализация, сохранение, систематизация, синтез и передача по каналам связи) данных производится без потерь информации, поступающей от ее источника

Цель DSP

Цель DSP состоит в том, чтобы обычно измерять, фильтровать и/или сжимать непрерывные реальные аналоговые сигналы. Большинство микропроцессоров общего назначения могут также успешно выполнить алгоритмы цифровой обработки сигналов, но у выделенного DSP обычно есть лучшая степень эффективности, таким образом, они более подходят в портативных устройствах, таких как мобильные телефоны, из-за ограничений потребляемой мощности. DSP часто использует специальную архитектуру памяти, которая в состоянии выбрать многократные данные и/или инструкции одновременно.

Типичная система цифровой обработки



Цифровая обработка

Алгоритмы цифровой обработки сигналов обычно требуют быстрое выполнение большого количества математических операций и неоднократность на ряде выборок данных. Сигналы (возможно, от аудио или видео) постоянно преобразовываются из аналогового в цифровой сигнал, используются в цифровой форме, и затем преобразовываются назад в аналоговую форму. У многих приложений DSP есть ограничения на задержку; т.е. для системы, чтобы функционировать, операция DSP должна быть завершена в некотором установленном времени и задержана, обработка не жизнеспособна.

Преимущества DSP

Большинство микропроцессоров общего назначения и операционных систем могут успешно выполнить алгоритмы DSP, но не подходят для использования в портативных устройствах, таких как мобильные телефоны из-за ограничений эффективности питания. А специализированный, цифровой сигнальный процессор, однако, имеет тенденцию предоставлять решение меньшей стоимости, с лучшей производительностью, более низкой задержкой и без необходимости специализированного охлаждения или больших батарей.

Архитектура

Архитектура цифрового сигнального процессора оптимизирована в частности для цифровой обработки сигналов. Наиболее также поддерживаются некоторые функции, как процессор приложений или микроконтроллер, так как обработка сигналов редко - единственная задача системы. Некоторые полезные функции оптимизации алгоритмов DSP описаны в общих чертах ниже.

Архитектура и ее особенности

Архитектура ЦСП имеет ряд особенностей, в отличие от микропроцессоров общего применения. Она заключается в максимальном ускорении выполнения однотипных задач по цифровой обработке сигналов (поиск сигналов, преобразование Фурье и т.п.). В математике такие задачи приводятся к более простым по правилу "разделяй и властвуй". В нашем случае таким типом подзадач является поэлементное произведение элементов многокомпонентных векторов действительных чисел (это числа, которые могут быть записаны в виде конечной или

бесконечной (периодической или непериодической) десятичной дроби.) и последующему суммированию результатов произведения.

Исходя из этого, процессоры специально оптимизируют под определенные операции(в нашем случае под перемножение и суммирование). В следствии чего растет производительность и быстродействие. Первоочередно ЦСП направлены на многократное умножение с очень быстрым расчетом адресов перемножаемых элементов массивов.

Цифровые сигнальные процессоры иногда используют жестко фиксированное по времени кодирование, чтобы упростить аппаратные средства и эффективность кодирования умножения. Многократные арифметические модули могут потребовать, чтобы архитектура памяти поддерживала несколько выполнений за командный цикл. Специальные средства управления циклом, такие как архитектурная поддержка выполнения нескольких командных слов в очень трудном цикле, без издержек для вызовов команды или тестирования выхода.

Аппаратная архитектура

Архитектура памяти

DSP обычно оптимизируется под потоковую передачу данных и использует специальную архитектуру памяти, которая в состоянии выбрать многократные данные и/или инструкции одновременно, такие как Гарвардская архитектура или измененная архитектура фон Неймана, которые используют отдельную программу и памяти данных (иногда даже параллельный доступ на многократных шинах данных).

DSP может иногда полагаться на поддержку кода, чтобы знать об иерархиях кэша и связанных задержках. Это - компромисс, который допускает лучшую производительность. Кроме того, используется широкое применение прямой доступ к памяти.

Адресация и виртуальная память

DSPPS часто использует многозадачные операционные системы, но не имеет никакой поддержки виртуальной памяти или защиты. Операционные системы, которые используют виртуальную память, требуют большего количества времени для переключения среди процессов, которое увеличивает задержку.

Аппаратные средства адресации по модулю

Разрешает реализацию круговых буферов, без необходимости тестировать на упаковку

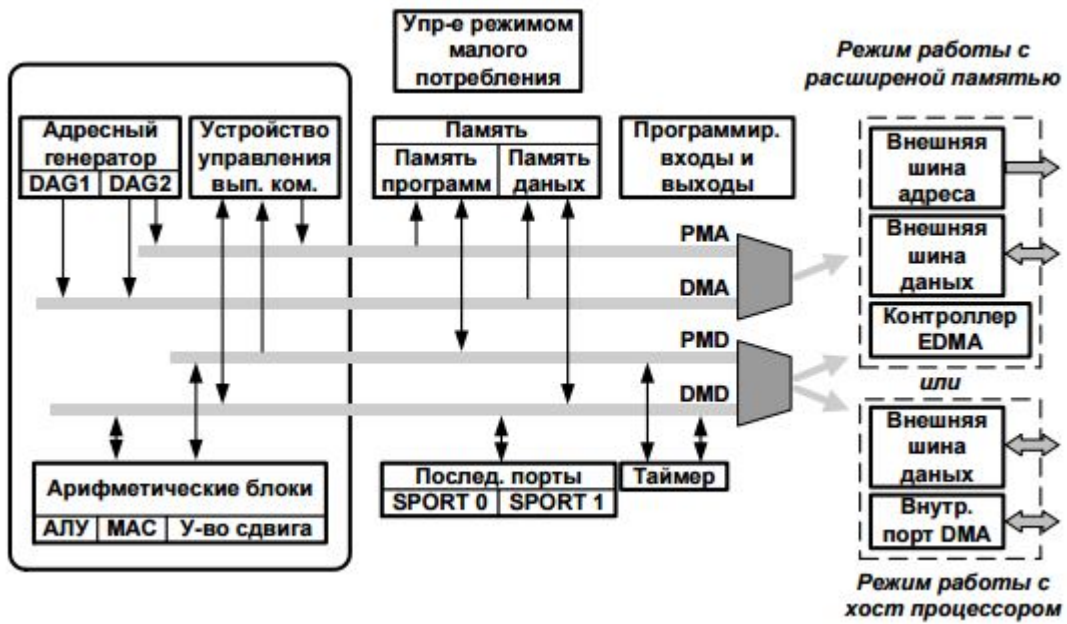
Бит-реверсная адресация, специальный способ адресации

Полезно для вычисления быстрого преобразования Фурье

Исключение блока управления памятью
Модуль вычисления адреса памяти

Примеры: TMS320Cxxxx, ADSP-21XX

Рис. 1. Архитектура процессоров семейства ADSP-218x



Характеристики оптических сигналов. Принципы когерентной связи

Принцип работы цифрового когерентного оптического приемника (одна поляризация)

Главная задача когерентного оптического приемника – преобразование информации, переносимой оптическим сигналом, в электрическую форму. Трудность этой задачи связана с жесткими требованиями к взаимной синхронизации частот источника опорного излучения и несущей оптического сигнала. Совмещение цифровой обработки сигналов с когерентным приемником облегчает решение этой задачи. На рисунке б приведена оптическая схема детектора и блок-схема цифрового оптического приемника (внизу рисунка). На рисунке б обозначены: ОИ – опорное излучение; ФД – фотодиод; АЦП – аналого-цифровой преобразователь.

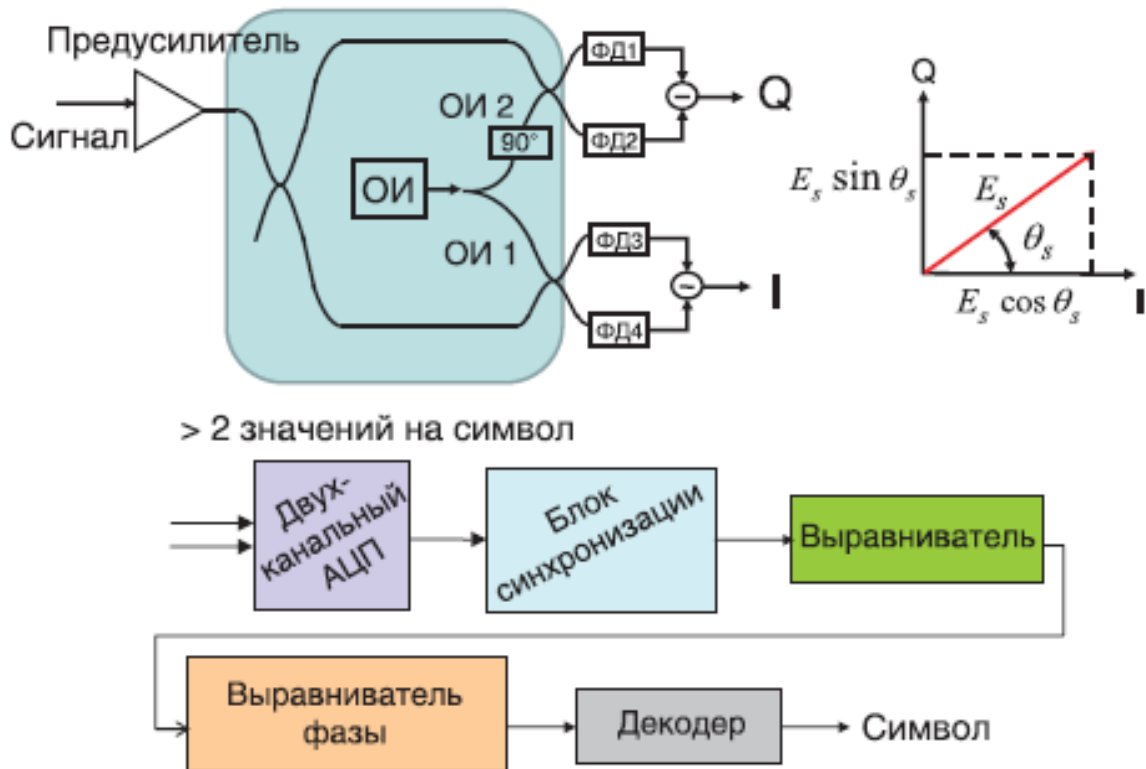


Рисунок 1. Принцип работы цифрового когерентного приемника с одной поляризацией

Важнейший функциональный элемент такого приемника – устройство цифровой обработки сигналов. Именно оно выполняет функции синхронизации и фазовой диверсификации, а также декодирования цифровой информации. Из-за внешних воздействий фаза несущей оптического сигнала испытывает флуктуации (фазовый шум). Влияние фазового шума проиллюстрировано на рисунке7, где слева показана комплексная диаграмма передаваемого сигнала, в центре – принимаемого сигнала с фазовым шумом, а справа сигналы после цифровой обработки.

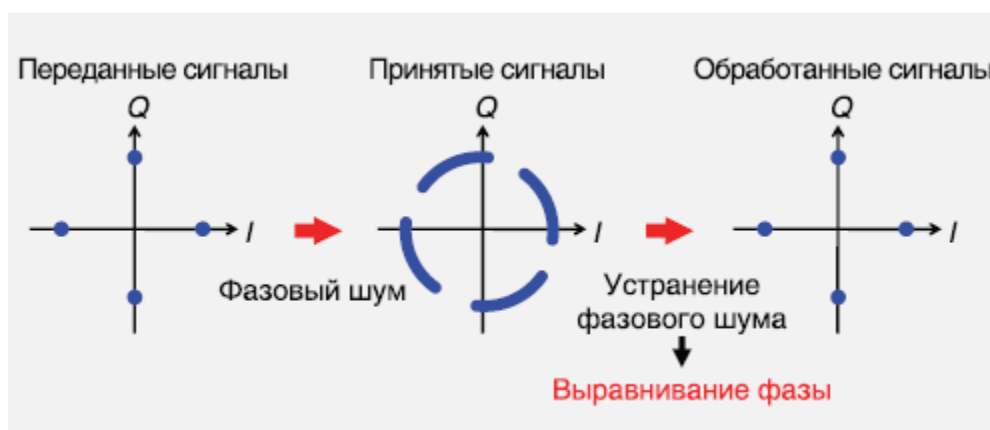


Рисунок 2. Комплексные фазовые диаграммы QPSK сигнала

Создание оптических систем обратной связи для синхронизации источника опорного излучения с несущей оптического сигнала (см. рисунок 2) по-прежнему остается трудной задачей. Быстрый рост скорости работы цифровых устройств обработки сигналов предоставил разработчикам новый способ устранения фазового дрейфа несущей оптического сигнала. Цифровые когерентные приемники выполняют эту задачу в электрической форме. В результате после цифровой обработки принятый сигнал принимает вид, показанный на рисунке7 справа.

Таким образом, высокоскоростная цифровая обработка электрического сигнала позволяет точно выделить действительную и мнимую компоненты (I и Q соответственно) комплексной амплитуды электрического сигнала. Используя гомодинный когерентный приемник с фазовой диверсификацией. Когерентные приемники обеспечивают возможность внедрения различных типов многоуровневых форматов модуляции включая фазовые и

квадратурные форматы. Комплексные диаграммы некоторых форматов, реализованных в когерентных системах, показаны на рисунке 8.

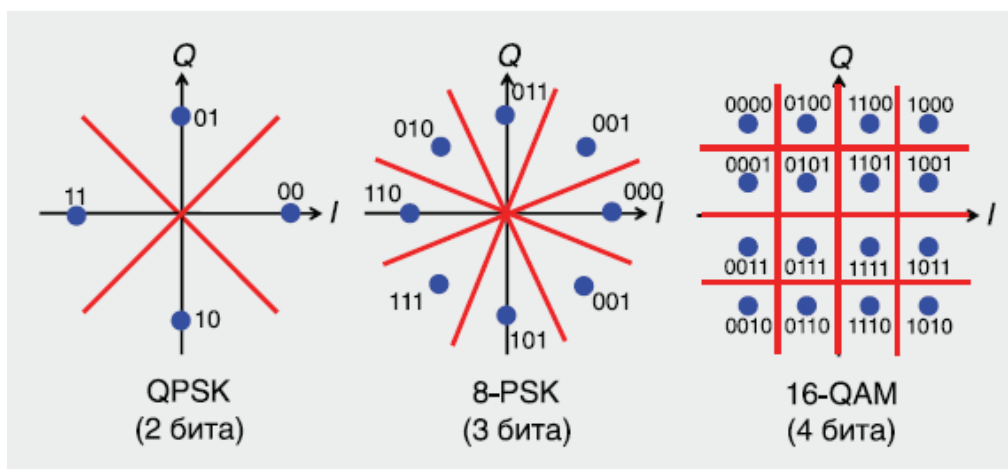


Рисунок 3. Комплексные фазовые диаграммы многоуровневых форматов модуляции, реализованных в когерентных оптических системах связи

На рисунке 7 приведены (слева направо): четырехуровневый фазовый формат (QPSK) емкостью 2 бит/символ; восьмиуровневый фазовый формат (8-PSK) емкостью 3 бит/символ и 16-уровневый квадратурный формат (16-QAM) емкостью 4 бит/символ.

Многоуровневые форматы модуляции позволяют увеличить скорость передачи информации в несколько раз в зависимости от параметра M , который можно назвать емкостью формата. Величина M связана с числом уровней N выражением $M = \log_2 N$. Поэтому использование 16-уровневого формата модуляции позволяет увеличить скорость передачи информации в четыре раза по сравнению с обычным бинарным форматом при сохранении символьной скорости передачи. Современные устройства цифровой обработки сигналов обеспечивают быстроедействие до 10 Гбод/с, что при использовании 16-уровневого квадратурного формата (16-QAM) обеспечивает скорость передачи информации 40 Гбит/с. Важное достоинство многоуровневых форматов – более высокая по сравнению с двухуровневыми форматами спектральная эффективность. Для бинарных форматов она ограничена значением 1(бит/с)/Гц, для многоуровневого формата – величиной M (бит/с)/Гц.

Например, при использовании формата модуляции 64-QAM с символьной скоростью 1 Гбод/с продемонстрирована спектральная эффективность 8,6 (бит/с)/Гц. Поскольку полная информация о комплексной огибающей оптического поля сохраняется в электрическом сигнале, то в электрической форме в цифровом виде может быть решена задача компенсации

хроматической дисперсии. Действие хроматической дисперсии может быть описано передаточной функцией линии связи H , преобразующей спектр Фурье огибающей входного сигнала X в спектр Фурье выходного сигнала Y ($Y(\omega) = H(\omega)X(\omega)$). Для компенсации хроматической дисперсии необходимо пропустить сигнал с выхода линии связи Y через компенсирующую систему с передаточной функцией H^{-1} , обратной передаточной функции линии связи. В результате на выходе компенсирующей системы формируется сигнал, совпадающий с исходным сигналом: $Z(\omega) = H^{-1}(\omega)Y(\omega) = X(\omega)$.

Сохранение фазовой информации при когерентном приеме позволяет компенсировать хроматическую дисперсию при цифровой обработке сигнала в приемнике, рисунок 9.

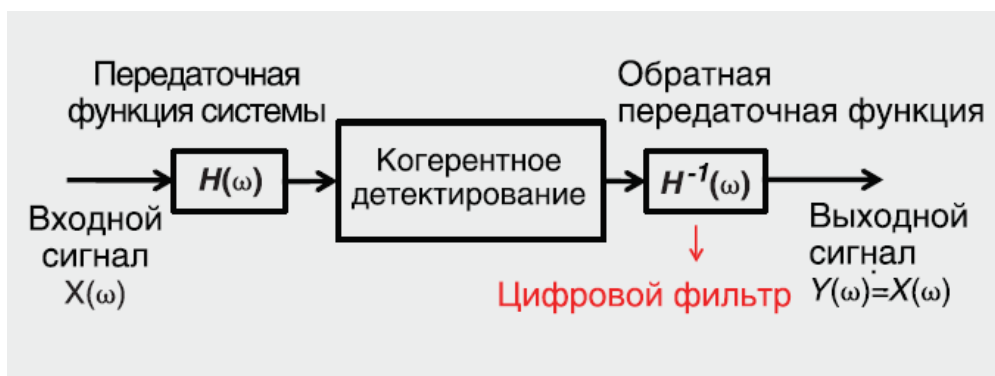


Рисунок 4. Схема компенсации хроматической дисперсии в цифровом когерентном приемнике.

Цифровые когерентные оптические приемники с двумя поляризациями.

Поскольку полная информация может содержаться в комплексной огибающей оптического поля каждой поляризации, то для ее полного преобразования в электрическую форму требуются два электрических сигнала для обеих поляризаций. То есть всего требуются четыре электрических сигнала. Принцип работы приемника с поляризационной диверсификацией показан на рисунке 11.

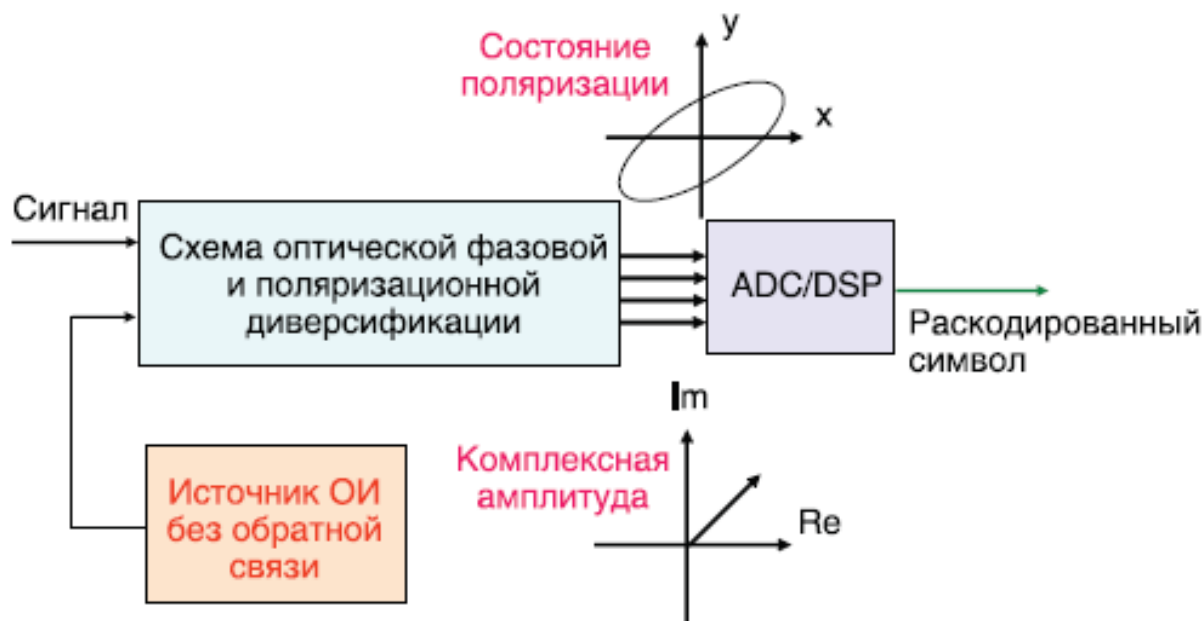


Рисунок 5. Принцип работы цифрового когерентного приемника с поляризационной и фазовой диверсификацией

Для поляризационной диверсификации опорное излучение делится на две ортогонально поляризованные компоненты, каждая из которых смешивается с сигнальным излучением. ADC/DSP – блок аналого-цифрового преобразования и цифровой обработки сигналов.

По сравнению с приемником одной поляризации в нем решается задача выравнивания поляризаций сигнала и опорного излучения. Она решается также в электрической форме при помощи цифровой обработки четырех электрических сигналов благодаря специальной оптической схеме, изображенной на рисунке 11.

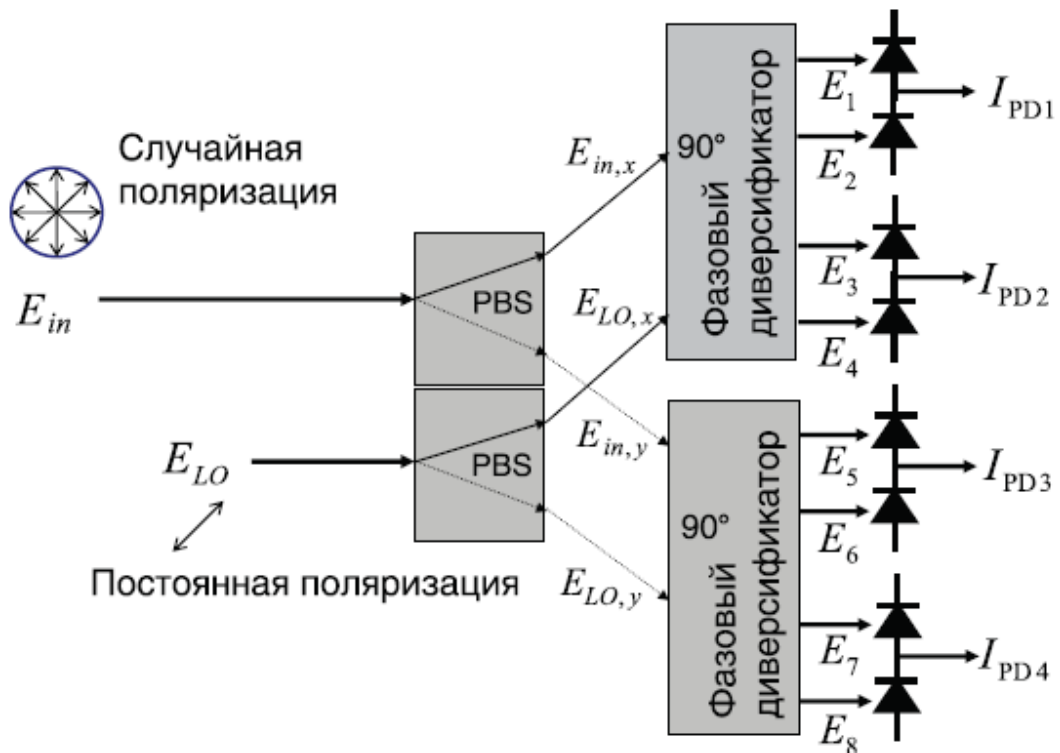


Рисунок 6. Оптическая схема смесителя цифрового когерентного приемника с поляризационной и фазовой диверсификацией

Опорное излучение и сигнал делятся на две ортогонально поляризованные компоненты в поляризационном делителе пучка (PBS), которые попарно смешиваются в фазовых диверсификаторах. Фазовая диверсификация в каждом поляризационном канале осуществляется так, как показано на рисунке 6.

В общем случае в когерентной системе связи осуществляется поляризационное мультиплексирование, увеличивающее суммарную скорость передачи информации вдвое. [Ошибка! Закладка не определена.]

Цифровые фильтры

В обработке сигналов, цифровой фильтр представляет собой систему, которая выполняет математические операции на выборку, с дискретным временем сигнала, чтобы уменьшить или усилить определенные аспекты этого сигнала. Этим он отличается от другого основного типа электронного фильтра, аналогового фильтра, который представляет собой электронную схему, работающую с аналоговыми сигналами в непрерывном времени.

Система цифровой фильтрации обычно состоит из аналого-цифрового преобразователя (АЦП) для дискретизации входного сигнала, за которым следует микропроцессор и некоторые периферийные компоненты, такие как память для хранения данных и коэффициентов фильтра и т. д. Программные инструкции (программное обеспечение), работающие на Микропроцессор реализует цифровой фильтр, выполняя необходимые математические операции над числами, полученными от АЦП. В некоторых высокопроизводительных приложениях FPGA или ASIC используются вместо микропроцессора общего назначения или специализированного процессора цифровых сигналов (DSP) со специальной параллельной архитектурой для ускорения таких операций, как фильтрация.

Цифровые фильтры могут быть более дорогими, чем эквивалентные аналоговые фильтры из-за их повышенной сложности, но они делают практичным многие конструкции, которые непрактичны или невозможны в качестве аналоговых фильтров. Цифровые фильтры часто могут быть сделаны очень высокого порядка и часто представляют собой фильтры с конечной импульсной характеристикой, что позволяет получить линейную фазовую характеристику. При использовании в контексте аналоговых систем реального времени цифровые фильтры иногда имеют проблемную задержку (разницу во времени между входом и откликом) из-за связанных аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразований и сглаживания. фильтры, или из-за других задержек в их реализации.

Цифровые фильтры - обычное дело и важный элемент повседневной электроники, такой как радио, мобильные телефоны и AV-ресиверы.

Цифровой фильтр характеризуется своей передаточной функцией или, что эквивалентно, разностным уравнением. Математический анализ передаточной функции может описать, как она будет реагировать на любой ввод. Таким образом, проектирование фильтра состоит из разработки спецификаций, соответствующих задаче (например, фильтр нижних частот второго

порядка с определенной частотой среза), а затем создания передаточной функции, которая соответствует спецификациям.

Передаточная функция для линейного, инвариантных по времени, цифровой фильтр может быть выражена в виде передаточной функции в Z -области ; если это причинно, то оно имеет вид:

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_N z^{-N}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_M z^{-M}}$$

где порядок фильтра представляет собой наибольший из N или M . См . Уравнение LCCD Z - преобразования для дальнейшего обсуждения этой передаточной функции .

Это форма рекурсивного фильтра , который обычно приводит к бесконечной импульсной характеристике БИХ , но если знаменатель установлен равным единице, то есть без обратной связи, тогда это становится КИХ- фильтром или фильтром с конечной импульсной характеристикой .

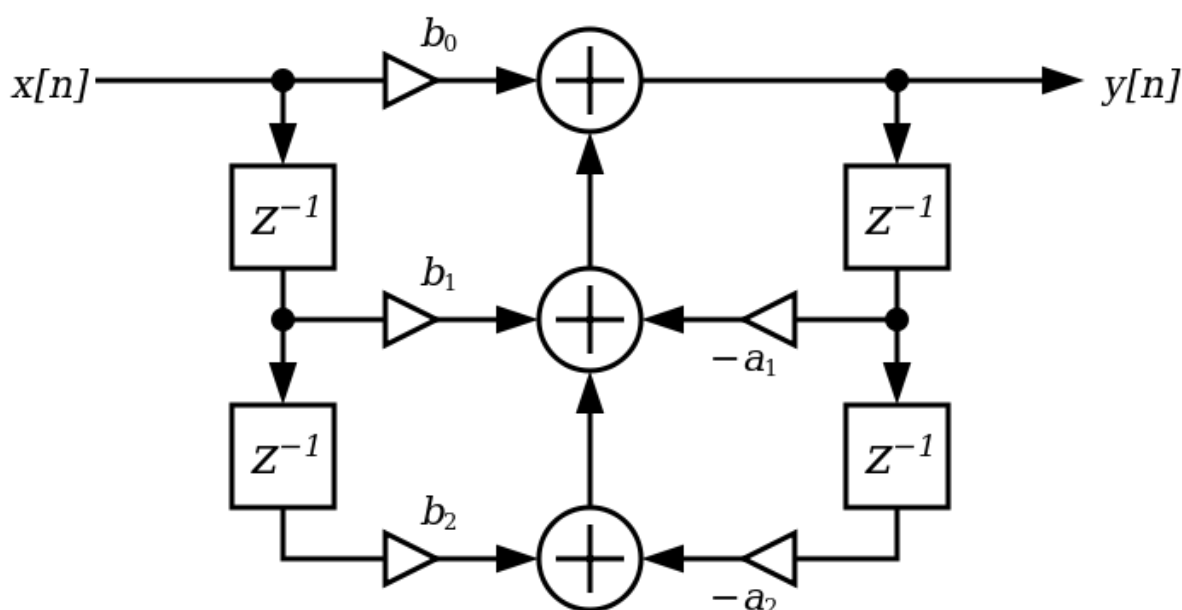
Реализация фильтра

После того, как фильтр спроектирован, он должен быть *реализован* путем разработки схемы потока сигналов, которая описывает фильтр с точки зрения операций над последовательностями выборок.

Заданная передаточная функция может быть реализована разными способами. Подумайте, как можно вычислить простое выражение, такое как $\frac{1}{z}$, - можно также вычислить эквивалент z^{-1} . Таким же образом все реализации можно рассматривать как "факторизации" одной и той же передаточной функции, но разные реализации будут иметь разные числовые свойства. В частности, некоторые реализации более эффективны с точки зрения количества операций или элементов памяти, необходимых для их реализации, а другие обеспечивают такие преимущества, как улучшенная числовая стабильность и уменьшенная ошибка округления. Некоторые структуры лучше подходят для арифметики с фиксированной запятой, а другие могут быть лучше для арифметики с плавающей запятой .

Прямая форма I

Прямой подход к реализации БИХ-фильтра - это прямая форма I, в которой разностное уравнение вычисляется напрямую. Эта форма практична для небольших фильтров, но может быть неэффективной и непрактичной (численно нестабильной) для сложных конструкций. В общем, эта форма требует $2N$ элементов задержки (как для входных, так и для выходных сигналов) для фильтра порядка N .



Прямая форма II

Альтернативная прямая форма II требует только N единиц задержки, где N - порядок фильтра - потенциально вдвое меньше, чем прямая форма I. Эта структура получается путем изменения порядка разделов числителя и знаменателя прямой формы I, поскольку они фактически являются двумя линейными системами, и свойство коммутативности применимо. Затем можно заметить, что есть два столбца задержек (Z^{-1}), которые отводятся от центральной цепи, и их можно объединить, поскольку они являются избыточными, что дает реализацию, как показано ниже.

Недостатком является то, что прямая форма II увеличивает возможность арифметического переполнения для фильтров с высокой *добротностью* или резонансом. Было показано, что с увеличением Q шум округления в обеих топологиях прямой формы неограниченно возрастает. Это связано с тем, что, по идее, сигнал сначала проходит через

компонентов значительно усиливается. В цифровых фильтрах значения коэффициентов хранятся в памяти компьютера, что делает их более стабильными и предсказуемыми.

Поскольку коэффициенты цифровых фильтров являются определенными, их можно использовать для достижения гораздо более сложных и избирательных схем - особенно с цифровыми фильтрами, можно добиться более низкой пульсации полосы пропускания, более быстрого перехода и более высокого затухания в полосе задерживания, чем это практически с аналоговыми фильтрами. Даже если бы конструкция могла быть достигнута с использованием аналоговых фильтров, инженерные затраты на разработку эквивалентного цифрового фильтра, вероятно, были бы намного ниже. Более того, можно легко изменить коэффициенты цифрового фильтра, чтобы создать адаптивный фильтр или параметрический фильтр, управляемый пользователем. Хотя эти методы возможны в аналоговом фильтре, они снова значительно сложнее.

Цифровые фильтры могут использоваться при разработке фильтров с конечной импульсной характеристикой. Эквивалентные аналоговые фильтры часто более сложны, поскольку для них требуются элементы задержки.

Цифровые фильтры в меньшей степени полагаются на аналоговую схему, потенциально обеспечивая лучшее соотношение сигнал / шум . Цифровой фильтр будет вносить шум в сигнал во время аналоговой фильтрации нижних частот, аналого-цифрового преобразования, цифро-аналогового преобразования и может вносить цифровой шум из-за квантования. В аналоговых фильтрах каждый компонент является источником теплового шума (например, шума Джонсона), поэтому с ростом сложности фильтра растет и шум.

Однако цифровые фильтры действительно увеличивают задержку в системе. В аналоговом фильтре задержка часто незначительна; строго говоря, это время для распространения электрического сигнала через схему фильтра. В цифровых системах задержка вводится элементами задержки в тракте цифрового сигнала, а также аналого-цифровыми и цифро-аналоговыми преобразователями, которые позволяют системе обрабатывать аналоговые сигналы.

В очень простых случаях более рентабельно использовать аналоговый фильтр. Введение цифрового фильтра требует значительных накладных расходов схем, как обсуждалось ранее, включая два аналоговых фильтра нижних частот.

Еще один аргумент в пользу аналоговых фильтров - низкое энергопотребление. Аналоговые фильтры требуют значительно меньшей мощности и поэтому являются единственным решением, когда требования к мощности жесткие.

При создании электрической цепи на печатной плате, как правило, проще использовать цифровое решение, поскольку блоки обработки данных сильно оптимизировались с годами. Создание такой же схемы с аналоговыми компонентами займет намного больше места при использовании дискретных компонентов. Две альтернативы - это FPAА и ASIC, но они дороги в небольших количествах.

Типы цифровых фильтров

Многие цифровые фильтры основаны на быстром преобразовании Фурье, математическом алгоритме, который быстро извлекает частотный спектр сигнала, позволяя манипулировать спектром (например, создавать полосовые фильтры очень высокого порядка) перед преобразованием модифицированного спектра обратно в сигнал временного ряда с обратной операцией БПФ. Эти фильтры дают $O(n \log n)$ вычислительные затраты, тогда как обычные цифровые фильтры имеют тенденцию быть $O(n^2)$.

Другая форма цифрового фильтра - модель пространства состояний. Хорошо используемый фильтр в пространстве состояний - фильтр Калмана, опубликованный Рудольфом Калманом в 1960 году.

Традиционные линейные фильтры обычно основаны на затухании. В качестве альтернативы могут быть разработаны нелинейные фильтры, включая фильтры передачи энергии, которые позволяют пользователю перемещать энергию определенным образом. Таким образом, нежелательный шум или эффекты могут быть перемещены в новые полосы частот, более низкие или более высокие по частоте, распределены по диапазону частот, разделены или сфокусированы. Фильтры передачи энергии дополняют традиционные конструкции фильтров и предоставляют гораздо больше степеней свободы в конструкции фильтров. Цифровые фильтры передачи энергии относительно легко спроектировать, реализовать и использовать нелинейную динамику.

Есть разные способы охарактеризовать фильтры; например:

Линейный фильтр представляет собой линейное преобразование входных выборок; остальные фильтры нелинейные. Линейные фильтры удовлетворяют принципу суперпозиции,

т. Е. Если вход представляет собой взвешенную линейную комбинацию различных сигналов, выход представляет собой линейную комбинацию соответствующих выходных сигналов с одинаковым весом.

Причинная фильтр использует только предыдущие образцы входных и выходных сигналов; в то время как непричинный фильтр использует будущие входные выборки. Непричинный фильтр обычно можно превратить в причинный фильтр, добавив к нему задержку.

Неизменный во времени фильтр имеет постоянные свойства во времени; другие фильтры, такие как адаптивные фильтры, меняются во времени.

Стабильно фильтр выдает выходной сигнал , который сходится к постоянному значению с течением времени, или остается ограниченным в пределах конечного интервала. Нестабильным фильтр может производить выходной сигнал , который растет без границ, с ограниченным или даже нулевым входом.

А с конечной импульсной характеристикой (КИХ - фильтр) использует только входные сигналы, в то время как с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ - фильтр) использует как входной сигнал и предыдущие образцы выходного сигнала. КИХ-фильтры всегда стабильны, а БИХ-фильтры могут быть нестабильными.

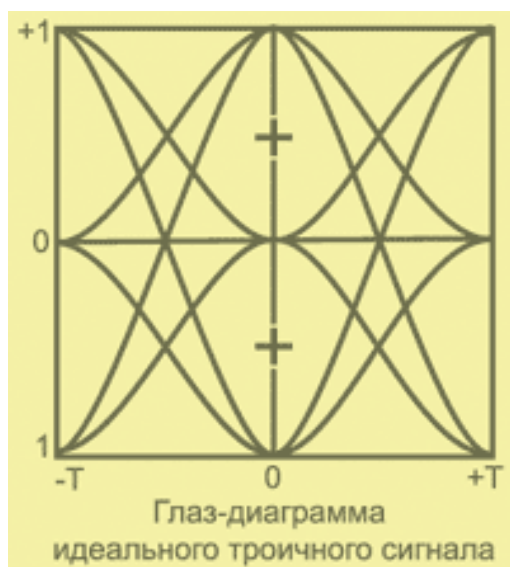
Фильтр может быть представлен блок-схемой , которую затем можно использовать для получения алгоритма обработки выборки для реализации фильтра с помощью аппаратных инструкций. Фильтр также можно описать как разностное уравнение , набор нулей и полюсов или импульсную характеристику или переходную характеристику .

Тема 3 Характеристики оптических сигналов

ГЛАЗ-ДИАГРАММА

Удобным (и гениально простым!) графическим методом оценки качества цифрового сигнала на выходе регенератора является глаз-диаграмма. Она представляет собой результат наложения всех возможных импульсных последовательностей в течение промежутка времени, равного двум тактовым интервалам линейного сигнала.

Наиболее простой пример — диаграмма для троичного (возможные уровни $-1, 0, +1$) линейного сигнала при косинус-квадратной форме входного сигнала регенератора. Хорошо видна область («раскрыв») глаз-диаграммы, в пределах которой должна производиться операция опознавания сигнала для каждого из двух уровней решения. Горизонтальные линии, обозначенные как $-1, 0$ и $+1$, соответствуют амплитудам импульсов при отсутствии помех, а вертикальные линии через каждый тактовый интервал T — идеальным моментам решения.



Процесс принятия решения показан в виде двух крестиков в каждом «раскрыве» глаз-диаграммы. Вертикальная черта каждого крестика определяет момент решения, а горизонтальная — его уровень. Гарантией безошибочной регенерации цифрового сигнала является наличие вблизи каждого крестика определенной области, в пределах которой и должно происходить опознавание сигнала.

Наличие помех приводит к сокращению этой области по сравнению с идеальным случаем. Минимальное расстояние между центром крестиков и краями «глаза» служит мерой

запаса помехозащищенности. Запас уменьшается как из-за искажений формы импульса, так и вследствие несовершенства самого процесса принятия решения. Первая причина приводит к уменьшению «раскрыва» глаз-диаграммы, а вторая — к перемещению точки принятия решения вдоль границ глаза. Возникающие вследствие двух указанных причин искажения принято подразделять на амплитудные и временные, соответствующие смещению точки принятия решения по вертикали и горизонтали. Для удобства дальнейших рассуждений будем считать, что точка принятия решения остается неподвижной, а уменьшается «раскрыв».



Степень уменьшения «раскрыва» глаз-диаграммы по вертикали определяется результирующими искажениями, вызванными межсимвольными помехами, эхосигналами, изменениями амплитуды импульсов на выходе регенератора, погрешностями порогов решающих устройств. В результате воздействий появляется вертикальная составляющая искажений глаз-диаграммы ΔA . Именно на эту величину должны быть сдвинуты края идеальной глаз-диаграммы.

Временные искажения глаз-диаграммы ΔT , включающие несоответствие моментов решения их статическим значениям и джиттер, учитываются обычно в смещении границ «глаза» по горизонтали.

Очевидно, что для компенсации ухудшения реальной глаз-диаграммы по сравнению с идеальной необходимо увеличить величину отношения сигнал/шум на величину $\Delta S/N = 20 \lg (H/h)$, дБ, где H и h представляют собой вертикальный «раскрыв» идеальной и реальной глаз-диаграмм, соответственно.

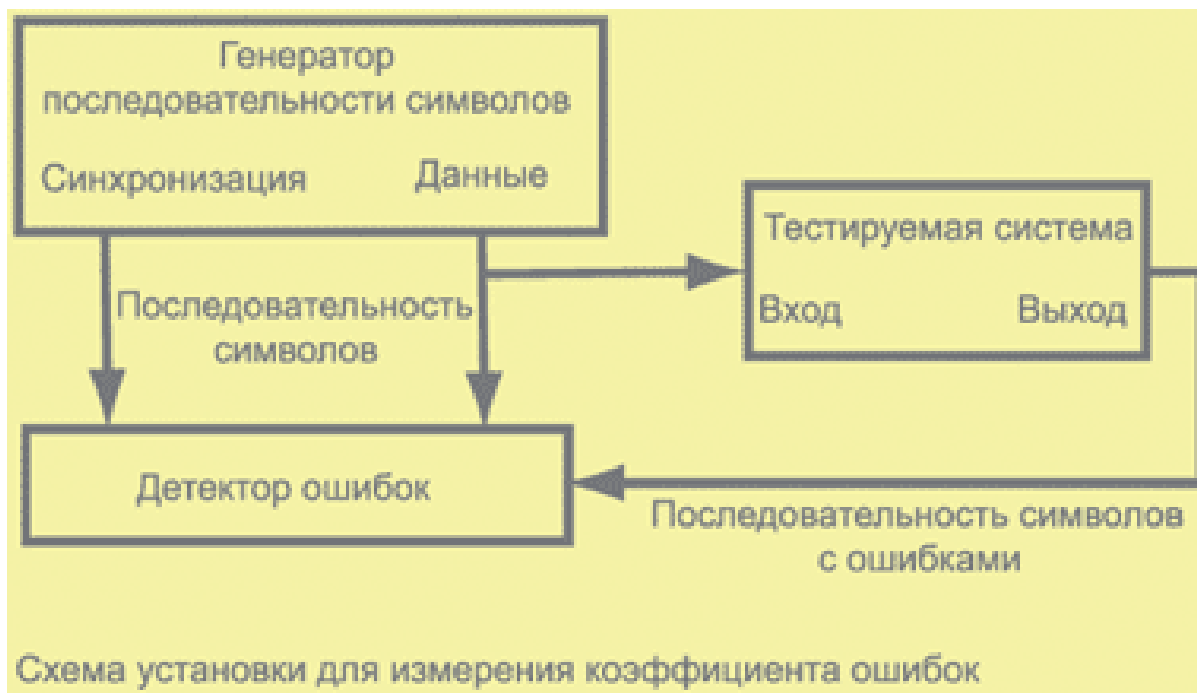
КОЭФФИЦИЕНТ БИТОВЫХ ОШИБОК

Ключевым параметром качества ЦСП являются ошибки. Показателей ошибок множество, все они будут по-очередно рассмотрены ниже. Самый простой из них — коэффициент битовых ошибок (Bit Error Ratio, BER) или джиттер, так актуальный для VoIP телефонов или VoIP шлюзов. Напомним, что под BER следует понимать отношение количества ошибочных битов к их общему переданному числу.

Необходимо отметить, что при прочих равных условиях BER зависит от количества переданных битов. Например, длинная последовательность одинаковых символов может вызвать низкочастотную амплитудную модуляцию и детерминированный джиттер, следствием которых будет рост числа ошибок. Для обеспечения корректности сравнения разных ЦСП используются типовые испытательные последовательности, причем каждой стандартной скорости передачи соответствует своя испытательная последовательность. По своим свойствам они близки к гауссову шуму, но имеют определенный период повторения. Поэтому они называются не просто случайными, а псевдослучайными последовательностями (ПСП) (Pseudo-Random Bit Sequence, PRBS).

Следует особо подчеркнуть, что оценка BER будет абсолютно точной только при бесконечно большом числе переданных битов. Строго говоря, когда их число ограничено, мы получаем не вероятность события BER, а его оценку BERT. Очевидно, что уровень достоверности этой оценки (Confidential Level, CL), называемый также доверительной вероятностью, зависит от количества зарегистрированных ошибок и от общего числа переданных битов N .

Типовая схема измерения BER предполагает наличие генератора испытательных битовых (символьных) последовательностей тестера BER, испытываемого объекта (регенератора, участка ЦСП и т. д.) и детектора ошибок тестера BER.



Генератор тестера BER формирует испытательные сигналы, которые подаются на вход тестируемого объекта. Генератор тестируемого сигнала является также источником сигнала для детектора ошибок тестера BER.

Тестируемый объект может быть территориально совмещен с тестером BER или находиться в удаленном пункте. В любом случае испытуемый объект должен быть выведен из эксплуатации и сигнал с его выхода подан на вход приемника тестера BER. Как говорят связисты, должен быть организован измерительный шлейф.

Детектор ошибок получает испытательный сигнал с выхода тестируемого объекта или формирует точную копию этого сигнала автономно. Испытательный сигнал генератора сравнивается побитно с сигналом, поступающим с выхода испытуемого объекта. Каждое различие сигналов детектор фиксирует как битовую ошибку.

Необходимую синфазность двух указанных сигналов обеспечивает детектор ошибок, в котором предусмотрена требуемая задержка сигнала с выхода генератора. Задача фазирования сигналов обычно выполняется на этапе калибровки тестера BER.

Испытательные сигналы тестеров BER стандартизованы. Как уже отмечалось выше, информационный сигнал в тестерах BER имитируется в виде так называемых псевдослучайных последовательностей ПСП (PRBS), они формируются в соответствии со стандартными алгоритмами и различаются числом генерируемых символов $M = 2k-1$, где k — целое число.

В генераторах тестеров BER предусмотрена возможность создания произвольных испытательных последовательностей, называемых обычно кодовыми словами.

Очевидным недостатком BER является необходимость вывода тестируемого объекта из эксплуатации (Out of Service, OoS), что вполне приемлемо в процессе разработки или ремонта объекта и неудобно, если ЦСП уже эксплуатируется. Кроме того, параметр BER хорош для оценки влияния одиночных помех, обусловленных гауссовыми процессами, например собственными и переходными помехами. В то же время в любой реальной системе связи присутствуют и целые пакеты таких ошибок (их еще называют серийными ошибками). Поэтому без знания временной структуры ошибок системы связи невозможна эффективная локализация повреждений и накопление адекватной информации о качестве разработки и инсталляции оборудования. По сути, одного параметра BER недостаточно для корректной оценки работы ЦСП. Необходимы более адекватные, учитывающие структуру помех, показатели качества ЦСП с возможностью их мониторинга в процессе нормальной эксплуатации системы связи (In Service Monitoring, ISM). Такие как рекомендации G.821 и G.826.

Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины

Основная литература:

1. Фокин, В. Г. Когерентные оптические сети [Электронный ресурс] : учебное пособие / В. Г. Фокин. - Санкт-Петербург : Лань, 2016. - 440 с. - ISBN 978-5-8114-2105-3 : Б. ц. Книга из коллекции Лань - Инженерно-технические науки.

Рекомендовано УМО по образованию в области инфокоммуникационных технологий и систем связи в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» квалификации (степени) «бакалавр» и «магистр»

2. Гуров, В. В. Архитектура микропроцессоров [Электронный ресурс] : учебное пособие / В. В. Гуров. - 2-е изд. - Москва : ИНТУИТ, 2016. - 327 с. - ISBN 978-5-9963-0267-3 : Б. ц. Книга из коллекции ИНТУИТ - Информатика

Дополнительная литература:

1. Основы цифровой обработки сигналов [Текст] : курс лекций : учебное пособие для вузов / А. И. Солонина [и др.]. - 2-е изд., испр. и перераб. - СПб. : БХВ-Петербург, 2012. - 768 с. : ил. - Библиогр. : с. 741-746. - ISBN 978-5-94157-604-3 : 199.00 р.

Прил. : с. 677-740

2. Гадзиковский, В. И. Методы проектирования цифровых фильтров [Электронный ресурс] / В. И. Гадзиковский. - Москва : Горячая Линия–Телеком, 2012. - 416 с. : ил. - ISBN 978-5-9912-7003-8 : Б. ц.