

Физический уровень

9 апреля 2026 г.

Задача физического уровня состоит в переносе битов с одного устройства на другое. Для передачи данных могут использоваться различные физические среды.

Среды передачи с использованием физического кабеля или провода часто называются проводными, или направляемыми (guided transmission media), поскольку в них сигнал направлен по физическому пути.

Проводные среды передачи — медные кабели (в виде коаксиального кабеля или витой пары) и оптоволокно.

Ширина полосы пропускания — мера пропускной способности среды передачи. Она измеряется в герцах (Гц) (МГц, ГГц).

Запоминающее устройство

Стандартный способ переноса информации с одного устройства на другое — записать на носитель, магнитный или твердотельный (например, записываемый DVD), физически доставить его к целевому устройству и считать данные.

Запоминающее устройство

Компания Amazon предоставляет сервис Snowmobile. Это большой грузовик, набитый тысячами жестких дисков, подключенных к высокоскоростной сети внутри грузовика. Его общая емкость составляет 100 Пбайт (100 000 Тбайт или 100 млн Гбайт).

Запоминающее устройство

Если компания нуждается в перемещении огромного объема данных, такой грузовик приезжает на ее территорию, подключается к оптоволоконной сети компании, а затем извлекает нужную информацию. По завершении грузовик едет в место назначения и выгружает данные.

Витая пара состоит из двух изолированных медных проводов, обычно толщиной около 1 мм. Провода скручены в спираль подобно молекуле ДНК

Сигнал обычно передается в виде разности потенциалов между двумя проводниками пары, что обеспечивает (в отличие от абсолютного напряжения) лучшую устойчивость к внешнему шуму.

Как правило, шум одинаково влияет на напряжение в обоих проводах, таким образом, разность потенциалов остается практически неизменной.

Чаще всего витая пара используется в телефонных системах. Практически все телефоны соединяются с АТС посредством такого кабеля.

По этим линиям связи осуществляются и телефонные звонки, и доступ в интернет по технологии ADSL.

Витые пары длиной до нескольких километров могут обходиться без усиления, но на больших расстояниях сигнал ослабляется и необходимы повторители.

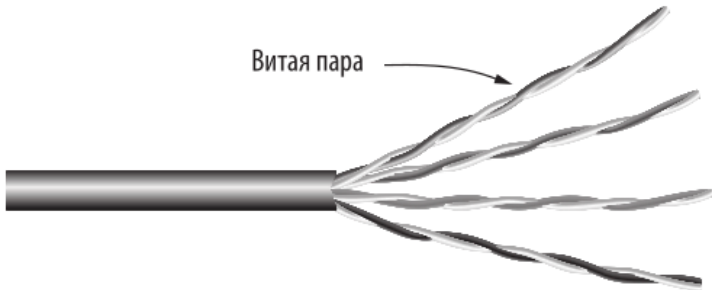
Чтобы протянуть множество витых пар параллельно на большое расстояние (например, от многоквартирного дома до АТС), их связывают вместе и заключают в защитную оболочку.

В некоторых регионах телефонные линии прокладываются над землей, на столбах, и связки проводов достигают диаметра в несколько сантиметров.

Пропускная способность зависит от диаметра провода и расстояния. В большинстве случаев при расстоянии в несколько километров она может достигать сотен мегабит в секунду

Витая пара

Витая пара категории 5е состоит из двух аккуратно скрученных проводов. Четыре такие пары обычно заключаются в ПВХ-оболочку, которая защищает провода и держит их вместе.



В различных стандартах LAN витая пара используется по-разному. Например, 100-мегабитная сеть Ethernet использует две (из четырех) пары, по одной для каждого направления. Для повышения скорости 1-гигабитная Ethernet использует все четыре пары в обоих направлениях одновременно, это требует от приемника выделения составляющих в передаваемом сигнале.

Каналы связи, позволяющие передавать сигнал в обе стороны одновременно (подобно двухполосной дороге), называются **полнодуплексными (full-duplex)**.

Линии, которые можно использовать в конкретный момент времени только в одном направлении (подобно однопутной железной дороге), называют **полудуплексными** (half-duplex).

Третья категория — **симплексные (simplex)** каналы связи, по которым трафик всегда движется лишь в одном направлении, как по односторонним улицам.

Более раннюю категорию 3 сменила категория 5, с аналогичным кабелем и таким же разъемом, но с увеличенным количеством скручиваний на метр.

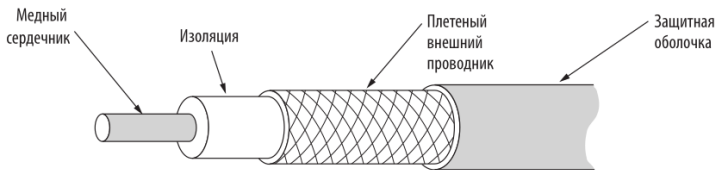
Некоторые кабели категории 6 поддерживают 10-гигабитные каналы связи. Сегодня такие каналы широко развертываются во многих сетях, например в новых офисных зданиях.

Кабели категории 8 работают на более высоких скоростях, чем витые пары более низких категорий, но только на коротких расстояниях (около 30 м). Поэтому они подходят только для дата-центров.

Кабели вплоть до категории 6 носят название неэкранированной витой пары (Unshielded Twisted Pair, UTP), поскольку состоят только из проводов и изоляции. В отличие от них, в кабеле категории 7 экранирована каждая витая пара и весь пучок в целом (под защитной оболочкой).

Еще одна распространенная среда передачи — коаксиальный кабель (coaxial cable). Он лучше экранирован и обладает более широкой полосой пропускания, чем неэкранированные витые пары, так что подходит для передачи на более далекие расстояния и с более высокой скоростью.

Коаксиальный кабель



Частота пропускания коаксиальных кабелей достигает 6 ГГц, что позволяет передавать по одному кабелю множество сеансов связи параллельно (одна телевизионная программа занимает приблизительно 3,5 МГц)

Коаксиальный кабель

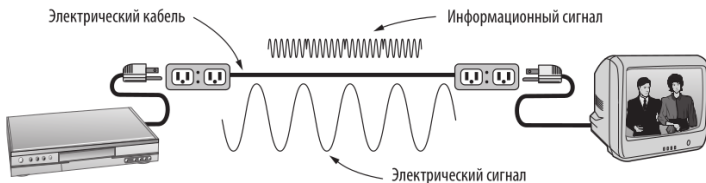
Коаксиальные кабели когда-то широко применялись в междугородних телефонных системах, но сегодня на замену им пришло оптоволокно.

ЛЭП служат для поставки электроэнергии в дома, а электропроводка внутри жилищ — для распределения энергии по электрическим розеткам.

Идея передачи данных по ЛЭП возникла давно. Долгие годы электроэнергетические компании использовали ЛЭП для низкоскоростного обмена данными, чтобы удаленно снимать показания счетчиков.

Кроме того, данная технология позволяет управлять различными домашними устройствами (например, по стандарту X10). В последние годы возродился интерес к высокоскоростному обмену данными по таким линиям, как внутри жилых зданий в качестве LAN,

Линии электропередачи



Несмотря на эти сложности, по обычной электропроводке вполне можно передавать данные на короткие расстояния со скоростью до 500 Мбит/с с помощью схем связи, избегающих проблемных частот и устойчивых к всплескам количества ошибок.

А потенциальная пропускная способность оптоволокна превышает 50 000 Гбит/с (50 Тбит/с), и мы еще очень далеки от этих пределов. На сегодняшний день мы достигли «потолка» (около 100 Гбит/с) лишь из-за нашей неспособности быстрее преобразовывать электрические сигналы в оптические и обратно.

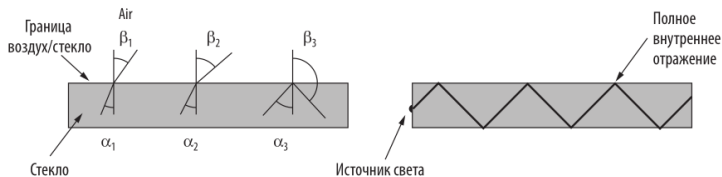
Для достижения более высокой производительности по одному оптоволоконному кабелю параллельно передаются данные нескольких каналов связи.

Оптическое волокно используется для передачи данных на большие расстояния в опорных сетях, высокоскоростных LAN (хотя медные провода нередко успешно с ними в этом соперничают), а также для высокоскоростного доступа в интернет по технологии FTTH («оптическое волокно в дом»).

Оптические системы передачи данных состоят из трех основных компонентов: источника (генератора) света, среды передачи и приемника.

Принято считать, что световой импульс означает 1, а отсутствие света — 0. Среда передачи представляет собой сверхтонкое стекловолокно. При попадании света приемник генерирует электрический импульс.

Установив генератор света на одном конце оптоволоконного кабеля, а приемник — на другом, мы получаем однонаправленную (то есть симплексную) систему передачи данных, которая принимает входной электрический сигнал, преобразует его, передает в виде световых импульсов, после чего преобразует выходной сигнал обратно в электрический на принимающей стороне.

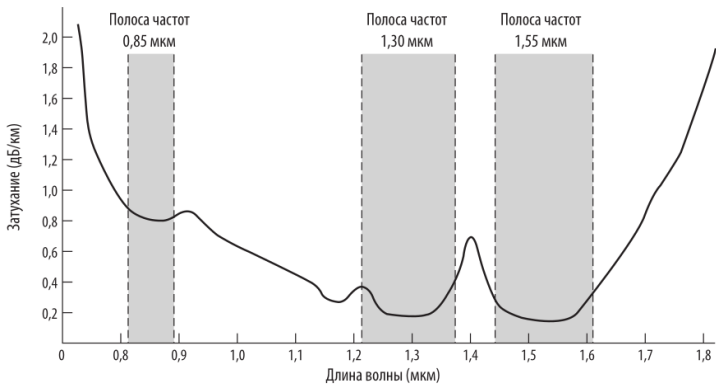


Если углы падения превышают определенное критическое значение, свет отражается обратно в стекло и не попадает в воздух вообще. Этот луч может распространяться на многие километры практически без потерь.

поскольку любой луч с углом падения выше критического отразится внутрь, множество лучей будет отражаться внутри волокна под разными углами. В этом случае говорят, что у лучей различные моды, а волокно при этом называется **многомодовым** (multimode fiber).

Если же уменьшить диаметр волокна до нескольких длин волны света (менее 10 мкм (микрометров); при этом диаметр многомодового волокна превышает 50 мкм), волокно становится волноводом. Это значит, что свет может распространяться в нем только по прямой, без отражений. Такое волокно называется **одномодовым** (single-mode fiber).

Современные одномодовые оптоволоконные кабели работают со скоростью 100 Гбит/с на расстоянии до 100 км без усиления.

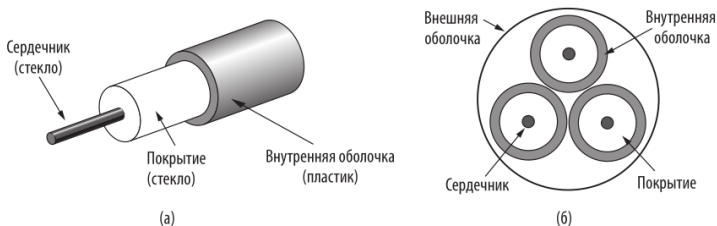


В качестве примера: двукратное ослабление мощности сигнала соответствует затуханию в $10 \log_{10} 2 = 3$ дБ. Длина волны видимого света чуть короче, от 0,4 до 0,7 мкм (1 мкм = 10^{-6} м). 400-700 нм.

В настоящее время для оптоволоконной связи наиболее широко используются три диапазона длин волн. Центры их находятся в точках 0,85, 1,30 и 1,55 мкм. Ширина всех трех диапазонов — от 25 000 до 30 000 ГГц.

Световые импульсы растягиваются в длину по мере их движения по оптоволокну. Это явление называется хроматической дисперсией (chromatic dispersion). Ее степень зависит от длины волны. Можно избежать наложения растянутых импульсов, увеличив расстояние между ними, но это снижает частоту передачи.

К счастью, было обнаружено, что если придать импульсам специальную форму (соответствующую обратной величине гиперболического косинуса), то дисперсионные эффекты практически сойдут на нет. Поэтому теперь можно посылать сигналы на тысячи километров без заметного искажения их формы. Такие сигналы, именуемые **солитонами** (soliton), применяются все чаще.



В многомодовых оптоволоконных кабелях диаметр сердечника обычно составляет около 50 мкм — это примерная толщина человеческого волоса. В одномодовых оптоволоконных кабелях диаметр сердечника составляет от 8 до 10 мкм.

Наземные линии оптоволоконных кабелей обычно укладываются в земле на глубине до метра, где их иногда повреждают экскаваторы или грызуны. У побережья трансокеанские оптоволоконные кабели укладываются в специальные желоба с помощью своего рода морского плуга. На глубоководье они просто лежат на дне, где иногда получают повреждения от рыболовных траулеров или подвергаются атакам гигантских кальмаров.

Оптоволоконные кабели могут соединяться тремя различными способами. Во-первых, они могут оканчиваться коннекторами и включаться в оптические розетки. На коннекторах теряется от 10 до 20 % света, зато упрощается изменение конфигурации системы.

Во-вторых, они могут сращиваться механически: два кабеля с аккуратными срезами укладываются вместе в специальную соединительную втулку и фиксируются на месте.

В-третьих, можно произвести сварку (сплавление) двух кусков оптоволокна в один.

Для генерации световых сигналов обычно используются две разновидности источников света: светодиоды (Light Emitting Diodes, LED) и полупроводниковые лазеры.

Характеристика	LED	Полупроводниковые лазеры
Скорость передачи данных	Низкая	Высокая
Тип оптоволокна	Многомодовое	Многомодовое или одномодовое
Расстояние	Короткое	Длинное
Срок службы	Долгий	Короткий
Чувствительность к температуре	Незначительная	Существенная
Стоимость	Низкая	Высокая

Принимающая сторона оптоволоконного кабеля представляет собой фотодиод, генерирующий электрический импульс, когда на него попадает свет. Время реакции фотодиодов, преобразующих оптический сигнал в электрический, ограничивает скорость передачи данных примерно до 100 Гбит/с.

Полоса пропускания у оптического волокна намного шире, чем у медного кабеля. Благодаря слабому затуханию в оптическом волокне требуется только один повторитель на каждые 50 км междугородних линий, что позволяет сэкономить немалые средства, в то время как для медных проводов повторитель необходим каждые 5 км.

Тысяча витых пар длиной в 1 км весит 8000 кг. Пара оптоволоконных кабелей с большей пропускной способностью весят всего 100 кг

Электроны при движении создают электромагнитные волны, способные распространяться в пространстве (даже в вакууме). В 1865 году британский физик Джеймс Клерк Максвелл (James Clerk Maxwell) высказал гипотезу о существовании этих волн, а в 1887 году они впервые были зафиксированы немецким физиком Генрихом Герцем (Heinrich Hertz).

Число колебаний волны в секунду, измеряемое в герцах, называется ее **частотой** (frequency), f .

Расстояние между двумя последовательными максимумами (или минимумами) называется **длиной волны** (wavelength) и традиционно обозначается греческой буквой λ (лямбда).

Беспроводная передача

Если к электрической цепи подключить антенну нужного размера, можно с успехом передавать электромагнитные волны на приемник, расположенный на некотором расстоянии. На этом принципе основана вся беспроводная связь.

В вакууме все электромагнитные волны перемещаются с одной скоростью, вне зависимости от их частоты. Эту скорость называют скоростью света, c . Она равна приблизительно 3×10^8 м/с, то есть около 1 фута (30 см) в наносекунду.

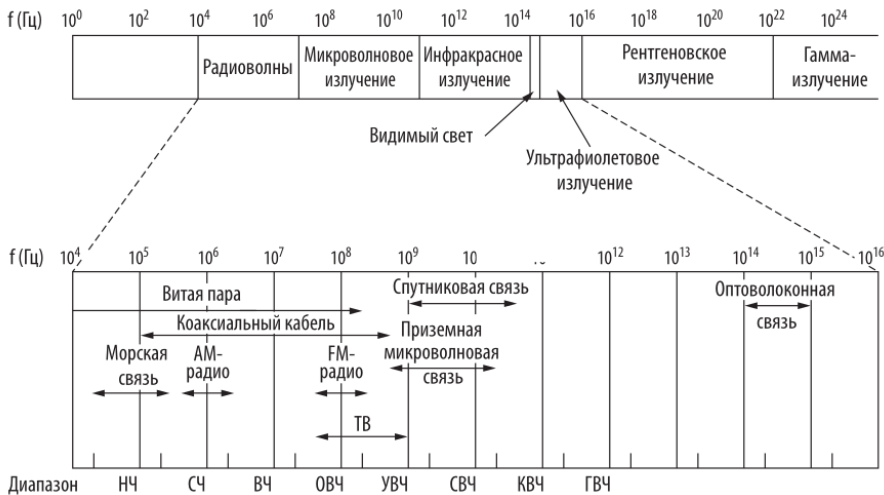
В медном проводе или оптоволокне скорость волн снижается до $2/3$ этого значения начинает в некоторой степени зависеть от частоты. Скорость света — абсолютный предел скорости во Вселенной. Никакой объект или сигнал не может перемещаться быстрее.

f , λ и c (в вакууме) связаны фундаментальным соотношением:

$$\lambda f = c$$

Например, длина волн частотой 100 МГц составляет около 3 м, 1000 МГц — 0.3 м, а 3000 МГц — 0.1 м

Беспроводная передача



Сокращения НЧ (LF), СЧ (MF) и ВЧ (HF) означают низкие (low), средние (medium) и высокие частоты (high frequency) соответственно. Разумеется, при выборе названий никто не ожидал, что будут использоваться частоты выше 10 МГц. Поэтому последующие диапазоны получили названия ОВЧ, очень высокие частоты (VHF, very high frequency); УВЧ, ультравысокие частоты (UHF, ultra high frequency); СВЧ, сверхвысокие частоты (SHF, super high frequency); КВЧ, крайне высокие частоты (EHF, extremely high frequency), и ГВЧ, гипервысокие частоты (THF, tremendously high frequency).

Для передачи данных путем модуляции амплитуды, частоты или фазы волн можно использовать радиоволны, микроволновое и инфракрасное излучение, а также видимый свет.

Количество информации, переносимой сигналом (например, электромагнитной волной), зависит от принимаемой мощности и пропорционально ширине полосы пропускания.

В микроволновом диапазоне для передачи данных доступна полоса пропускания на много гигагерц, но оптоволокно находится правее на логарифмической шкале, поэтому его показатели еще лучше.

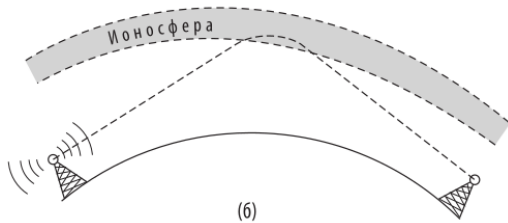
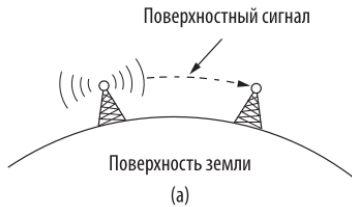
В качестве примера рассмотрим 1,30-микрометровый диапазон оптоволокна; ширина диапазона составляет 0,17 мкм. Воспользуемся уравнением $\lambda f = c$ и вычислим начальную и конечную частоты на основе соответствующих длин волн. Диапазон составляет около 30 000 ГГц. При допустимом соотношении 'сигнал/шум' в 10 дБ скорость будет равна 300 Тбит/с.

Радиоволны легко генерировать, они способны преодолевать большие расстояния и с легкостью проходить сквозь стены. Поэтому их повсеместно используют для связи как в помещениях, так и на открытом пространстве. Радиоволны являются всенаправленными, то есть расходятся во все стороны от источника, а значит, нет необходимости тщательно нацеливать передатчик на приемник.

Свойства радиоволн зависят от частоты. Низкочастотные радиоволны легко проходят сквозь препятствия, но их мощность резко падает с удалением от источника — со скоростью минимум $1/r^2$ в воздухе, — поскольку энергия сигнала распределяется более тонким слоем по большей поверхности. Подобное затухание называется **потерями в тракте передачи** (path loss).

Высокочастотные радиоволны движутся по прямой и отражаются от препятствий. Высокочастотные радиоволны сильнее поглощаются дождем и остальными препятствиями, чем низкочастотные. При этом радиоволны любой частоты подвержены помехам от моторов и прочего электрического оборудования.

В диапазонах ОНЧ, НЧ и СЧ радиоволны следуют вдоль земной поверхности. Прием этих волн возможен на расстоянии до 1000 км для низких частот и на меньшем — для чуть более высоких.



Для АМ(амплитудная модуляци) -радиовещания используется диапазон СЧ. Радиоволны в этих диапазонах легко проникают сквозь здания, поэтому радио прекрасно работает в помещении. Основная проблема с использованием этих диапазонов частот для передачи данных — низкая полоса пропускания.

В диапазонах ВЧ и ОВЧ поверхностный сигнал поглощается почвой. Впрочем, те волны, что достигают ионосферы — слоя заряженных частиц, окружающих нашу планету на высоте от 100 до 500 км, — отражаются от нее и попадают обратно на землю.

Радиолюбители применяют диапазоны ВЧ и ОВЧ для переговоров на больших расстояниях. Эти диапазоны также используются военными.

На частоте выше 100 МГц волны движутся практически по прямой, а значит, их можно сфокусировать в узкий пучок с помощью параболической антенны наподобие всем привычной спутниковой тарелки.

До появления оптоволоконных кабелей именно на таких микроволнах десятилетиями основывалась вся система междугородних телефонных разговоров.

Микроволны являются направленными (directional). Они движутся по прямой, так что если вышки находятся слишком далеко друг от друга, на пути сигнала может оказаться земная поверхность.

Поэтому необходимо периодически устанавливать повторители. Чем больше высота вышек, тем реже их можно ставить. Расстояние между повторителями примерно пропорционально квадратному корню их высоты. К примеру, в случае 100-метровых вышек повторители могут располагаться на расстоянии в 80 км.

Часто для междугородней связи. У нее есть несколько важных преимуществ перед оптоволокном. Главное, для этого вида связи не требуются права на прокладку кабелей. Достаточно купить по одному крошечному клочку земли на каждые 50 км и расставить на них микроволновые вышки — и можно полностью отказаться от использования телефонной системы.

Передача данных в инфракрасном диапазоне

Пульты дистанционного управления телевизорами, Blue-ray плеерами и стереосистемами используют связь в ИК-диапазоне. Они относительно направленные, дешевые, а их производство не представляет сложности.

Передача данных в инфракрасном диапазоне

Впрочем, есть у них и очень крупный недостаток: сигнал не проходит сквозь плотные объекты (попробуйте встать между пультом дистанционного управления и телевизором и проверьте, будет ли он работать). В целом по мере перехода от длинноволнового радио к видимому свету волны все больше напоминают световые и все меньше — радиоволны.

Передача данных в инфракрасном диапазоне

С другой стороны, неспособность инфракрасных волн проникать через сплошные стены — положительное качество. Ведь инфракрасная система в одной комнате не будет мешать аналогичной системе в соседних помещениях: вы не сможете управлять соседским телевизором с помощью своего пульта. Для их работы не нужна государственная лицензия.

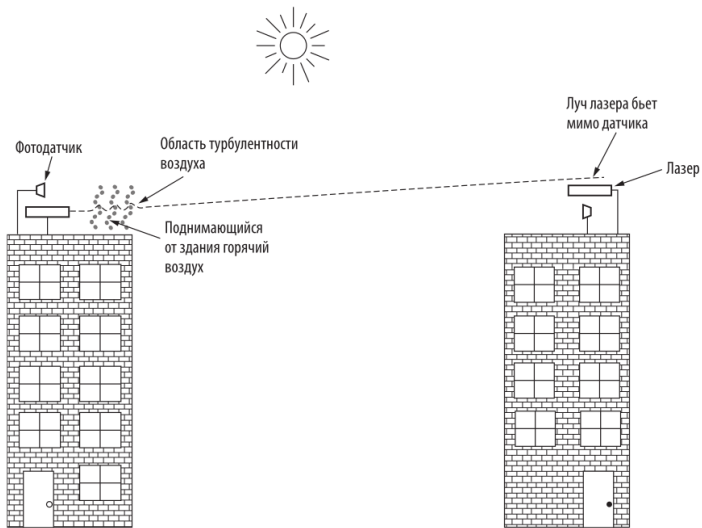
Беспроводная оптическая коммуникация, или **оптика свободного пространства** (free-space optics), применялась на протяжении столетий.

Сегодня оптическая коммуникация используется для соединения двух LAN: на крышах зданий, в которых они развернуты, устанавливаются лазеры.

Лазерная связь по своей природе является однонаправленной, так что на каждой стороне нужен свой лазер и свой фотодатчик. Такая архитектура обеспечивает очень широкую полосу пропускания за небольшие деньги.

Главное преимущество лазера, узкий луч, одновременно является его недостатком. Попасты лучом миллиметровой ширины в цель размером с булавочную головку на расстоянии 500 м может разве что современная Энни Оукли.

Передача данных в видимом диапазоне



$$f = \frac{1}{T}$$

$$g(t) = \frac{1}{2}c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi nft) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi nft)$$

$$\int_0^T \sin(2\pi kft) \sin(2\pi nft) dt = \begin{cases} 0, & k \neq n \\ T/2, & k = n \end{cases}$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \sin(2\pi nft) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \cos(2\pi nft) dt$$

$$c = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) dt$$

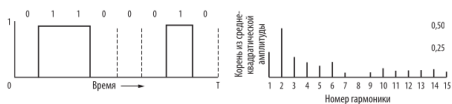
Символ b имеет код 01100010. Гармонический анализ дает коэффициенты

$$a_n = \frac{1}{\pi n} [\cos(\pi n/4) - \cos(3\pi n/4) + \cos(6\pi n/4) - \cos(7\pi n/4)]$$

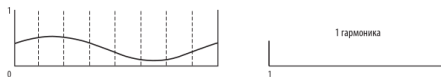
$$b_n = \frac{1}{\pi n} [\sin(3\pi n/4) - \sin(\pi n/4) + \sin(7\pi n/4) - \sin(6\pi n/4)]$$

$$c = 3/4$$

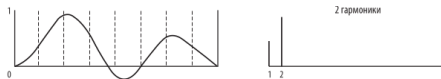
Гармонический анализ



(a)



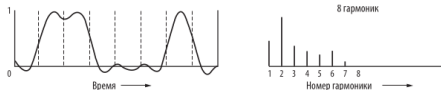
(б)



(в)



(г)



При отправке 8-бит на скорости b бит/с.

$$T = 8/b$$

Таким образом частота первой гармоники

$$f = b/8 \text{ Hz}$$

В обычной телефонной линии производится срез на 3000Гц. Таким образом высшая гармоника $3000/(b/8)$. Т.е. $24000/b$.

Соотношение скорости передачи и числа гармоник для телефонной линии (3000Гц).

Бит/с	T (мс)	Первая гармоника (Гц)	Число отправляемых гармоник
300	26,67	37,5	80
600	13,33	75	40
1200	6,67	150	20
2400	3,33	300	10
4800	1,67	600	5
9600	0,83	1200	2
19 200	0,42	2400	1
38 400	0,21	4800	0