

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Работа № 16

Определение скорости света в диэлектрике

Определение скорости света в диэлектрике

Цель работы

Ознакомиться с устройством и работой оптоволоконного оборудования, определить скорость распространения сигнала на участке диэлектрического волновода.

Принцип работы оптоволоконной линии

Оптоволоконно представляет собой тонкий цилиндрический волновод, который направляет излучение вдоль своей оси за счет эффекта полного внутреннего отражения.

В простейшем случае (рис.1) оптоволоконно состоит из

- тонкого диэлектрического стержня (нити) радиуса r_1 с показателем преломления n_1 – сердцевины (core)
- и оболочки (clad) с несколько меньшим показателем преломления n_2 , которая окружает сердцевину. Оболочка имеет радиус r_2 .

Оба материала – прозрачные диэлектрики. Оболочка выполняет много функций, в том числе: уменьшает потери при распространении сигнала; защищает сердцевину от внешних воздействий. Как правило, оптоволоконно дополнительно защищено снаружи пластиковым чехлом (jacket). На рис.1 показано сечение одной из наиболее распространенной и практически важной формы волокна и приведен соответствующий профиль показателя преломления.

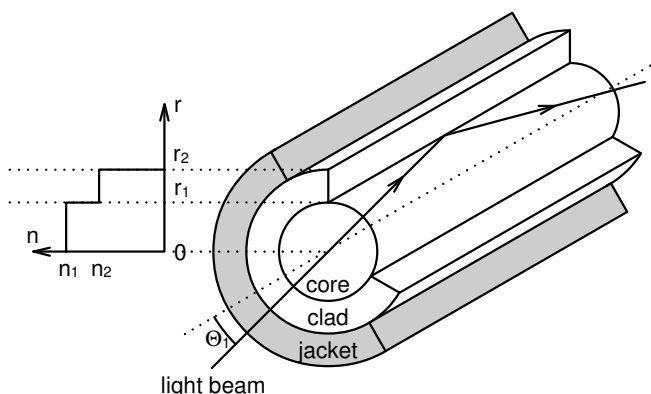


Рис. 1. Схема волоконно-оптической линии и профиль показателя преломления в ней (слева)

На границе сердцевина-оболочка луч света отражается и частично преломляется, изменив направление распространения. Если среды n_1 и n_2 прозрачны, угол распространения преломленного луча можно найти из закона Снелиуса

$$n_1 \cdot \cos \theta_1 = n_2 \cdot \cos \theta_2,$$

где θ_1 и θ_2 – углы, образованные падающим и преломленным лучами с границей раздела.

При углах $\theta_1 \leq \theta_c$, где θ_c определяется из условия $\theta_c = \theta_1 = \arccos \frac{n_2}{n_1}$, преломление

невозможно и луч испытывает полное внутреннее отражение.

При прохождении через оптоволоконно луч претерпевает много отражений. Если направление распространения луча составляет с осью оптоволоконна небольшой угол и выполнено условие полного внутреннего отражения, интенсивность прошедшего луча слабо зависит от количества отражений, а получившийся в результате диэлектрический волновод характеризуется низким уровнем потерь.

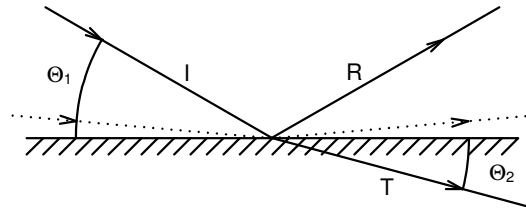


Рис. 2. Механизм полного внутреннего отражения I-падающий луч, R-отраженный, T-прошедший

Оптоволокна бывают двух типов: одномодовые и многомодовые. Для обоих типов волокон показатель преломления сердцевинки, равный примерно 1.5, превышает показатель преломления оболочки на 0.01-0.02. Типичные размеры волокон зависят от их назначения.

- **Одномодовое волокно** имеет размер сердцевинки $r_1=5$ мкм. Указанное выше соотношение показателей преломления позволяет при таких размерах достигнуть одномодового режима распространения и достаточно просто реализуется практически. Одномодовые волокна, как правило, применяют с одномодовым источником света – лазером. Они обеспечивают наибольшую полосу пропускания и минимальный уровень потерь.
- Сердцевина **многомодового волокна** имеет диаметр, доходящий до 100мкм, что облегчает состыковку волоконно-оптических линий, позволяет передавать более мощные световые сигналы. Это важно для применения в технологиях, связанных с обработкой материалов. Поскольку величина групповой скорости распространения у разных мод разная, такое волокно обладает дисперсией. Это вызывает расплывание фронта сигнала и ограничивает скорость передачи информации.

Типичные размеры (диаметр) оболочки обоих типов волокон составляют 75-100 мкм и задаются в основном из соображений механической прочности и удобства процедур соединения и сращивания волокон. Для указанных оболочечных волокон поле направляемой волны сосредоточено в основном в области сердцевинки волокна радиусом r_1 . Некоторая часть поля проникает в оболочку, но она быстро спадает в радиальном направлении от границы сердцевинки и за границы оболочки не попадает. Следовательно, волокном можно манипулировать, не изменяя его передаточных свойств. Типичный уровень потерь для распространенных типов волокон составляют 2-3дБ/км.

Метод измерения скорости света

Для определения групповой скорости распространения света в оптоволоконной линии связи создадим автоколебательную систему (автогенератор) на основе участка оптоволоконна. Частота стационарных колебаний в такой системе целиком определяется ее параметрами. Автогенератор удобно представить в виде усилительного элемента K и устройства обратной связи β . Усилительный элемент является широкополосным и обеспечивает фильтрацию высших гармоник и усиление. В общем случае усилитель нелинеен и усиление зависит от амплитуды сигнала. При небольших амплитудах сигнала коэффициент усиления $K=U_1/U_2$ можно считать не зависящим от амплитуды сигнала и его частоты. Коэффициент передачи линейного устройства обратной связи называют коэффициентом обратной связи $\beta=U_3/U_2$. Поскольку в автогенераторе выход устройства обратной связи – это вход усилительного элемента, то произведение βK характеризует устойчивость системы и представляет собой усиление в кольце обратной связи. Если $\beta K > 1$, а фазовый угол на некоторой частоте равен нулю (условие баланса фаз), то на входе усилителя на этой частоте обычно возникает колебание. Амплитуда его будет возрастать до тех пор, пока не наступит ограничение амплитуды. Усиление K снижается с ростом амплитуды из-за нелинейности усилительного элемента и достигает величины $1/\beta$. Дальнейший рост амплитуды прекращается.

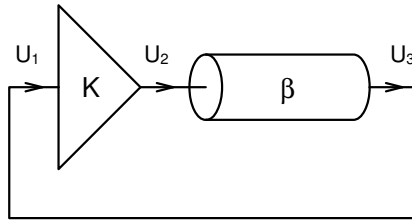


Рис. 3. Устройство автогенератора

Условие баланса фаз в автогенераторе можно записать в форме

$$\varphi_y + \varphi_{OC} = 2\pi.$$

Все факторы, оказывающие влияние на фазовые сдвиги в отдельных звеньях автогенератора, влияют на частоту генерируемых колебаний, поэтому изменение параметров обратной связи изменяет частоту генерации. Чтобы система не имела устойчивого состояния, усилитель сделан инвертирующим. Он дает сдвиг фазы равный π , почти не зависящий от частоты сигнала. В качестве устройства обратной связи используется линия задержки на основе отрезка световода, поэтому *частота автоколебаний задается задержкой в оптоволокне и позволяет определить скорость распространения сигнала*. Потери на распространение по оптоволокну пренебрежимо малы, поэтому можно основываться на подходе к линии задержки как к идеальному четырехполюснику с передаточной функцией

$$\exp(-i\omega T).$$

Таким образом, введение в схему линии задержки не изменяет модуля передаточной функции, а существенно влияет на результирующую фазовую характеристику. Усилитель дает постоянный сдвиг фаз π , поэтому наклон результирующей фазовой характеристики определяется в основном слагаемым ωT . Баланс фаз и амплитуд выполняется на частоте $\omega = \pi/T$ которая является частотой автогенерации.

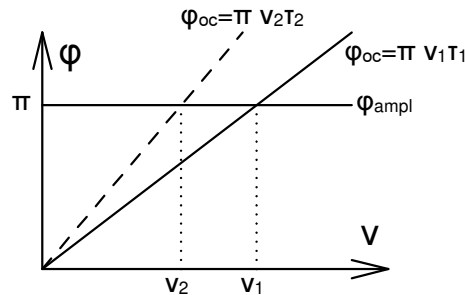


Рис. 4. Условие согласования фаз

Допустим, что частота колебаний автогенератора равна ν_1 , а длина образующей устройство обратной связи линии задержки равна λ_1 . (Оптоволоконная линия обеспечивает задержку на половину периода). Пусть скорость распространения сигнала в волокне равна v , тогда

$$\nu_1 = v/2\lambda_1. \quad (1)$$

Удлинение оптоволоконного дополнительным участком такого же волокна длиной ΔL изменяет задержку в цепи обратной связи и приводит к новой частоте ν_2 .

$$\nu_2 = \frac{v}{2(\lambda_1 + \Delta\lambda)}.$$

Так как скорость света при этом должна остаться постоянной, то:

$$2\lambda_1\nu_1 = \nu_2 \cdot 2(\lambda_1 + \Delta\lambda), \quad (2)$$

откуда

$$\nu_2 \cdot \Delta L + (\nu_2 - \nu_1) \cdot \lambda_1 = 0, \quad (3)$$

$$\lambda_1 = \frac{v_2 \cdot \Delta L}{v_1 - v_2}. \quad (4)$$

а для скорости распространения сигнала в волокне – по формуле

$$v = 2v_1\lambda_1 = \frac{2v_1 \cdot v_2 \Delta L}{v_1 - v_2}, \quad (5)$$

тогда

$$v = \frac{2 \Delta L}{T_2 - T_1}. \quad (6)$$

Описание установки

Схема установки приведена на Рис. 5. В качестве усилительного элемента используется приемопередатчик HFBR-5205 (transceiver) работающий на многомодовый оптический кабель с оптоволоконным диаметром 62,5 мкм. Передающая часть содержит InGaAsP светодиод (LED), излучающий на длине волны 1300нм. Светодиод управляется интегральной схемой (driver), которая преобразует дифференциальный логический сигнал в уровнях ЭСЛ в электрические токи для управления светодиодом. Приемная часть содержит InGaAs pin-фотодиод, связанный с интегральной схемой преобразователя импеданса (предусилителя). Окончательно выделение входных сигналов и преобразование их в дифференциальный логический сигнал в уровнях ЭСЛ осуществляется формирователем (quantizer).

Устройством обратной связи служит отрезок оптоволоконна (fiber), снабженный оптическими ST-разъемами (pathcord) длиной от 1 до 10 м. Чтобы уменьшить влияние свойств усилителей на работу генератора и из конструктивных соображений, в систему введена дополнительная электрическая линия задержки на основе сетевого кабеля категории 5 (delay line).

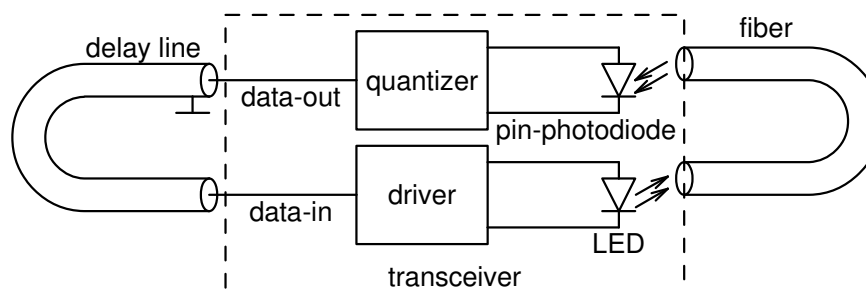



Рис. 5. Схема экспериментальной установки

Порядок выполнения работы

ВНИМАНИЕ! При использовании оптоволоконна соблюдать осторожность:

- избегать резких изгибов (с радиусом кривизны < 5 см);
- избегать царапин и загрязнений торцов волноводов;
- после измерений входные торцы волноводов и входные разъемы приемопередатчика закрываем защитными колпачками.

1. Включаем компьютер.

- Запускаем программу «Bordo», расположенную на рабочем столе компьютера.
- Знакомимся с описанием экспериментальной установки и описанием приборов, используемых в ней (описание цифрового осциллографа прилагается к программе «Bordo» в электронном виде. Вызов через меню .)

2. Проверяем режим работы платы осциллографа на панели управления:

- развертка по горизонтали 40нс/дел, задать режим «эквивалентных выборок»;
- чувствительность усилителя 50mV/дел, вход закрытый;

- синхронизация – «ждущая от внутреннего источника», вход закрытый;
 - длина данных – 256 отсчетов в одном сегменте;
 - наблюдение – «сигнал».
3. Собираем схему автоколебательной системы:
 - включаем стабилизированный источник питания (блок ИПС), устанавливаем напряжение (7 ± 0,5) В;
 - блок приемопередатчика (ПП) должен быть соединен с:
 - а) источником (ИПС) с помощью разъема ХБ-0,1 с соблюдением полярности;
 - б) участком сетевого кабеля UTP категории 5 (delay line);
 - в) платой осциллографа через разъем BNC.
 - освобождаем входы на ПП и подсоединяем оптоволокно длиной $L=1$ м через ST – коннекторы;
 - запускаем режим измерения («измерения» □ «запуск»);
 - наблюдаем сигнал в виде периодических импульсов. При отсутствии сигнала подбираем уровень синхронизации (кнопка «поиск»);
 - проводим измерения периода колебаний T_1 .
 4. Измерения повторяем для волокна с другой длиной $L=3$ м и $L=5$ м:
 - сначала подключаем волокно с длиной $L=3$ м, затем $L=5$ м;
 - с помощью дополнительных коннекторов, имеющихся в наборе, составляем комбинации: (1+3) м, (1+5) м, (3+5) м и (1+3+5) м.
Каждый раз проводим измерения периодов колебаний и вычисляем соответствующие изменения ΔL .
 5. Вычисляем скорость распространения сигнала в оптоволокне по формуле (6).
 6. Строим график зависимости периода автоколебаний от длины подключаемого оптоволокна и по наклону графика определяем среднее значение скорости сигнала в оптоволокне.
Сравниваем результаты расчетов.
 7. Используя полученное в п. 5 значение скорости света в волокне v и с помощью формулы

$$c = n_c v,$$

где c – скорость света в вакууме (приложение 2), рассчитываем значение коэффициента преломления сердцевинки волокна n_c (с точностью до 4-го знака после запятой).

8. Из формулы Селмейера для чистого кварца:

$$n^2 - 1 = \frac{1,6961 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - (0,0684)^2} + \frac{0,4079 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - (0,1162)^2} + \frac{1,8974 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - (2,2026)^2}$$

вычисляем коэффициент преломления оболочки n_{δ} волокна (с точностью до 4-го знака после запятой) для рабочей длины волны $\lambda = 1,3$ мкм.

Объяснить полученные результаты.

Содержание отчета

1. Схема экспериментальной установки.
2. Таблица длин оптоволоконных линий и соответствующих им частот автоколебаний системы.
3. График зависимости задержки распространения сигнала от длины подключаемого отрезка оптоволокна.
4. Результаты расчета скорости распространения сигнала для разных отрезков оптоволоконной линии и оценка погрешности измерений.

Дополнение 1

Скорость света

Астрономические наблюдения. Измерения скорости света в земных условиях. опыты Физо. опыты Майкельсона. Современные методы измерения скорости света. Эталоны времени и длины.

Скорость света в вакууме c — фундаментальная физическая константа: имеющая огромное значение не только для физической и прикладной оптики, но и для физики в целом, астрономии и астрофизики. Она представляет собой предельную скорость распространения любых физических воздействий и инвариантна при переходе от одной системы отсчета к другой. Абсолютные и относительные измерения скорости света привлекают внимание астрономов, физиков и инженеров вот уже на протяжении более трехсот лет. За это время точность измерений величины c возросла от значения $\Delta c/c = 0,3$, полученного из астрономических наблюдений, выполненных еще в XVII в., до $\Delta c/c \approx 3 \cdot 10^{-9}$, реализованного в лазерных экспериментах последнего времени.

Данные абсолютных измерений скорости света, выполненных в XIX в. Физо, пожалуй, впервые убедительным образом подтвердили электромагнитную теорию света. Как уже упоминалось выше, для Максвелла решающим в этом смысле стало совпадение прямо измеренного Физо в земных условиях значения c , с электродинамической постоянной.

Тщательные относительные измерения зависимости скорости света от направления распространения в земной системе отсчета позволили решить стоявшую перед физикой почти в течение двух столетий проблему эфира — гипотетической среды, "проводящей" световые волны. Опыт, накопленный физикой при изучении волн различной природы (распространения звука, волн на воде), прямо показывал, что для возникновения волнового движения необходима соответствующая среда. Поэтому, начиная с Гюйгенса, все сторонники волновой природы света считали очевидным существование специальной среды, эфира¹, в которой и распространяются световые волны.

Однако физические свойства эфира оставались загадкой не только для Гюйгенса, Юнга и Френеля, но и для ученых второй половины XIX в., когда стала очевидной электромагнитная природа света. Установленные к этому времени закономерности оптических явлений заставляли предполагать, что эфир заполняет все пространство, имеет пренебрежимо малую плотность, практически не взаимодействует с веществом — т. е. приписать эфиру совершенно необычные свойства.

Гипотеза эфира делала естественным выделение преимущественной системы отсчета, в которой он покоится; во всех же остальных координатных системах, в частности в координатной системе, связанной с Землей, тогда должно наблюдаться движение эфира или, как принято было говорить, "эфирный ветер". Непосредственным следствием эфирного ветра, как нетрудно убедиться, должна стать неодинаковость (анизотропия) скорости света вдоль и поперек направления движения Земли.

Прямой опыт, призванный измерить скорость эфирного ветра, был выполнен в 1881 г. Майкельсоном и дал четкий отрицательный результат — величина скорости света не зависит от направления распространения. "Гипотеза неподвижного эфира ошибочна" — заключил Майкельсон в своей статье, опубликованной в 1881 г. Последующие эксперименты, выполненные Майкельсоном и Морли, многочисленные опыты других исследователей с высокой степенью точности подтвердили этот результат. Его значение вышло далеко за пределы собственно оптики. Опыт Майкельсона-Морли заложил экспериментальные основы специаль-

¹ Слово "эфир" — греческого происхождения. Буквально "эфир" значит "воздух", "небо". Значение, которое придавали древние понятию "эфир", иллюстрирует цитата из Аристотеля: "Земля окружена водой, вода воздухом, воздух — эфиром. Дальше нет ничего".

ной теории относительности. Сейчас усилия физиков и инженеров направлены на повышение точности абсолютных измерений величины c .

Астрономические наблюдения.

Первые измерения скорости света на основе астрономических наблюдений были выполнены датским астрономом Ремером еще в 1675 г. (рис.1). Он регистрировал моменты вхождения одного из спутников Юпитера в тень планеты и обнаружил, что, когда Земля находится на максимальном удалении от Юпитера, время наступления затмения запаздывает по сравнению с предсказанным. Ремер предположил, что разность времен запаздывания, соответствующих минимальному и максимальному расстояниям между Землей и Юпитером, и есть то время, за которое свет проходит расстояние, равное диаметру земной орбиты. Им было получено значение скорости света $c = 214000$ км/с, ее отличие от современных данных объясняется неточным знанием диаметра земной орбиты.

Последующие измерения были выполнены английским астрономом Брадлеем в 1726 г. на основе наблюдения звездных aberrаций. Поясним идею метода рис. 2, на котором изображена звезда S , находящаяся в плоскости эклиптики, и два положения Земли на орбите. В первом из них направление скорости движения Земли v совпадает с направлением на звезду, а во втором — перпендикулярно к нему. Пусть в точке 1 орбиты наблюдатель видит звезду в зените, тогда в точке 2 кажущееся направление на звезду будет отличаться от истинного на угол α , называемый углом aberrации. Поскольку $v \ll c$ (практически $v/c \approx 10^{-4}$), угол aberrации удовлетворяет соотношению

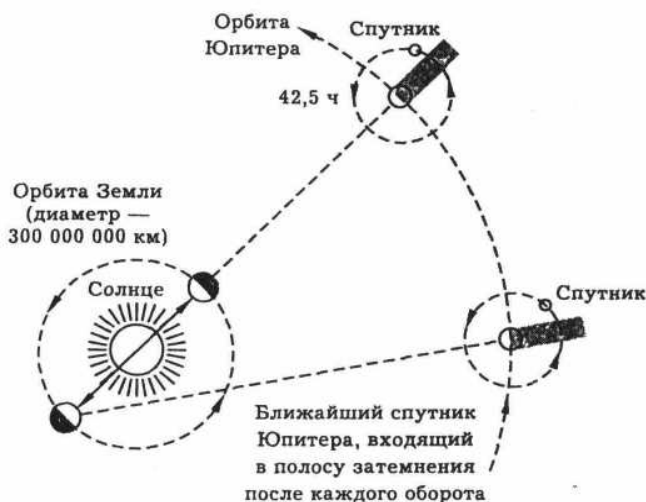


Рис. 1. Схема рассуждений Ремера.

Период обращения ближайшего к Юпитеру спутника равен приблизительно 42,5 ч. Поэтому спутник должен был заслоняться Юпитером или выходить из полосы затмения каждые 42,5 ч. Но в течении полугода, когда Земля удаляется от Юпитера, затмения наблюдались каждый раз со все большим запаздыванием по сравнению с предсказанными сроками. Ремер пришел к выводу, что свет распространяется не мгновенно, а имеет конечную скорость, поэтому ему требуется все больше времени для достижения Земли, по мере того как она, двигаясь по орбите вокруг Солнца, удаляется от Юпитера.

$$\operatorname{tg} \alpha = v / c.$$

Брадлей получил результат $c = 301000$ км/с. Особое значение методов Ремера и Брадлея заключается в том, что они позволяют определить скорость света при распространении в одном направлении, в то время как в лабораторных методах обычно измеряется средняя скорость на двойном проходе туда и обратно.

Измерения скорости света в земных условиях. Наиболее естественным методом измерения скорости света на поверхности Земли представляется прямая регистрация времени, затрачиваемого светом на прохождение известного расстояния. Возможность постановки та-

кого опыта обсуждалась еще Галилеем. Согласно идее Галилея, два наблюдателя, располагающиеся на расстоянии L друг от друга, снабжены фонарями с заслонками. В некоторый момент времени один из наблюдателей открывает заслонку, создавая таким образом световой импульс. Второй наблюдатель делает то же самое, как только увидит свет первого фонаря. Тогда скорость света $c = 2L/\tau$, где τ — регистрируемое первым наблюдателем время, прошедшее между открытием заслонки его фонаря и моментом, когда он увидит свет другого фонаря. Совершенно правильный, в принципе, опыт Галилея был обречен, однако, на неудачу.

Причина этого заключена в огромной величине скорости света. Передний фронт светового импульса, формируемого галилеевским наблюдателем, вряд ли мог быть короче $\tau_{\text{ф}} \approx 0,1 \text{ с}$; за это время свет пробегает расстояние в 30000 км.

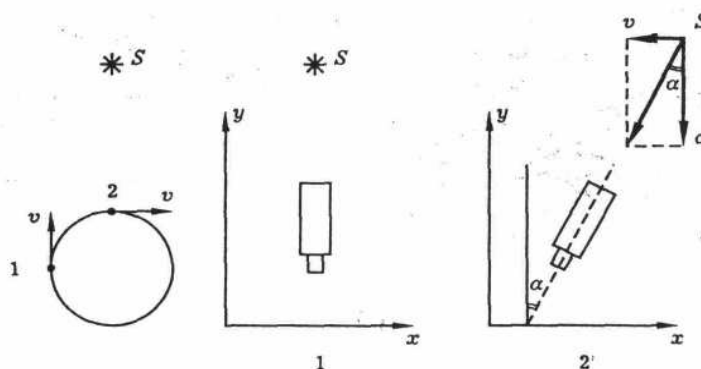


Рис. 2. К измерению скорости света на основе наблюдений звездных aberrаций

Очень инерционен и приемник света в обсуждаемом опыте — человеческий глаз — он имеет постоянную времени $\tau_{\text{пр}} \approx 0,1 \text{ с}$. Таким образом и длительность фронта светового импульса $\tau_{\text{ф}}$ и постоянная времени приемника $\tau_{\text{пр}}$ намного превышают время прохождения τ , подлежащее измерению, поскольку в земных условиях расстояние L не может превышать 1-10 км. Поэтому наблюдатели Галилея пришли бы к выводу, что скорость света равна бесконечности.

Надо сказать, что с современными экспериментальными средствами опыт Галилея может быть осуществлен даже в лаборатории. Сейчас мы располагаем лазерами, генерирующими импульсы длительностью $\tau_{\text{и}} \approx 10^{-12} \text{ с}$ (его продольный размер в направлении распространения — "длина" в пространстве $L_{\text{и}} = c\tau_{\text{и}} \approx 3 \cdot 10^{-2} \text{ см}$) и приборами, регистрирующими короткие временные интервалы, достигающие 10^{-12} с . В этих условиях поставить опыт Галилея и получить точность в определении $\Delta c/c = 10^{-5}$ можно, проводя измерения на дистанции всего лишь в несколько метров. Такие эксперименты широко вошли сейчас в практику — они лежат, в частности, в основе оптической дальнометрии.

Важно подчеркнуть, однако, что впервые успешные опыты подобного рода были осуществлены более ста лет назад Физо и Фуко, разумеется, с гораздо более скромными экспериментальными средствами. Надо сказать, что эти опыты представляют не только исторический интерес; разработанные Физо и Фуко методы управления световыми пучками использовались уже в наше время создатели лазеров.

Прежде чем перейти к более детальному изложению техники и результатов прямых измерений скорости света, обратим внимание на одно обстоятельство принципиального характера. Следует уточнить смысл, вкладываемый в наглядное на первый взгляд понятие — "время, затрачиваемое светом на прохождение заданной дистанции". Фактически измерение этого времени предполагает необходимость "поставить метку" на световом пучке (именно скорость ее перемещения в пространстве и регистрируется затем на опыте) или, другими словами, промодулировать волну. Сказанное означает, что в экспериментах рассматриваемого ти-

па мы всегда имеем дело с модулированными волнами, а измеряемой величиной является скорость распространения модуляции.

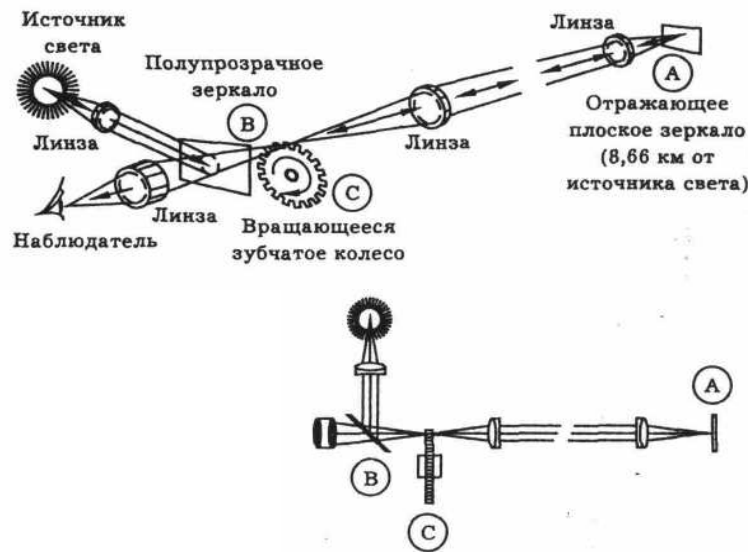


Рис. 3. Опыт Физо.

Через 174 года после того, как Ремер вычислил скорость света из наблюдений затмений спутника Юпитера, Физо сконструировал устройство для измерения скорости света в земных условиях. Зубчатое колесо С разбивало луч света на вспышки. Физо измерил время, за которое свет проходил расстояние до зеркала А и обратно, равное 17,32 км. Слабостью этого метода было то, что момент наибольшей яркости света определяется наблюдателем на глаз. Такие субъективные наблюдения недостаточно точны.

Опыты Физо. В опытах Физо, выполненных в 1849 г., амплитудная модуляция света осуществлялась с помощью вращающегося зубчатого колеса (рис.3). Колесо, вращающееся со скоростью n оборотов в секунду и имеющее N зубцов, превращает падающий на него непрерывный пучок света в последовательность световых импульсов, длительность каждого из которых $\tau \approx (Nn)^{-1}$. Если ширина щели равна ширине зубца, то $\tau_n \approx (2Nn)^{-1} = T/2$, где T — период следования импульсов. Для измерения времени прохождения световым импульсом расстояния L до зеркала и обратно Физо применил остроумный прием. Поскольку единственным оптическим приемником, которым он располагал, был глаз, необходимое временное разрешение достигалось путем прерывания приходящего от зеркала светового потока с помощью того же самого вращающегося колеса. Другими словами, с помощью колеса производилось временное стробирование приемника.

Схема эксперимента Физо изображена на рис.3. Свет от источника фокусируется линзой на край зубчатого колеса. Пройдя сквозь промежуток между зубцами, расходящийся световой пучок преобразовывался линзой в параллельный и отразившись от плоского зеркала, установленного на расстоянии 8,66 км от колеса, возвращался к зубчатому колесу. Попадая на зубец, свет не достигал наблюдателя, а попавший в промежуток между зубцами свет можно было наблюдать через окуляр. На обратном пути пучок вновь проходил сквозь промежуток между зубцами и через делительную пластинку попадал к наблюдателю. При сравнительно малой скорости вращения колеса экспериментатор видит яркую точку. По мере возрастания угловой скорости вращения ω яркость точки уменьшается, и источник света становится невидимым. При дальнейшем увеличении скорости вращения колеса светящаяся точка появляется вновь.

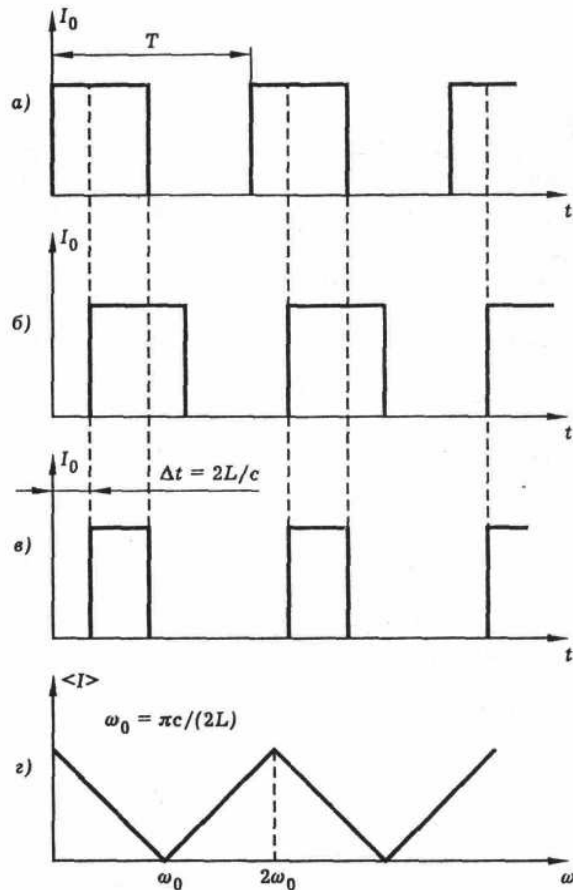


Рис. 4. Результаты опыта Физо

Рис. 4 поясняет результаты опыта Физо. На рис. 4,а показаны импульсы света, посылаемые к зеркалу. Проходя по трассе, световые импульсы испытывают временную задержку $\Delta t = 2L/c$, и поэтому модулятор пропускает их лишь частично (рис.4,б,в). Благодаря инерционности восприятия света глазом, наблюдатель видит не последовательность "укороченных" импульсов, а среднюю интенсивность света $\langle I \rangle$. Иными словами, наблюдатель регистрирует постоянную составляющую импульсной последовательности. Если время задержки $\Delta t = T/2$, то экспериментатор регистрирует полное затемнение и $c = 4L/T$.

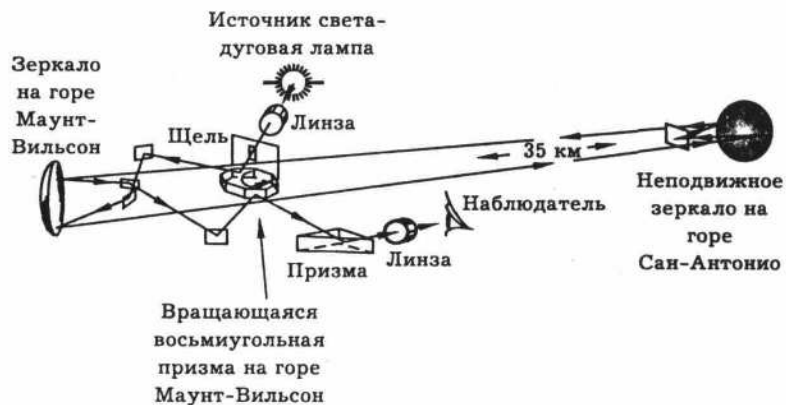


Рис.5. Установка Майкельсона

При $\Delta t = T$ яркость светящейся точки вновь становится максимальной и т. д. (рис. 4, з). С помощью колеса, имевшего 720 зубцов, Физо наблюдал первое затемнение при 12,6 оборо-

тах в секунду. Им было получено значение c — 315000 км/с. Важное достоинство схемы Физо состоит в том, что измерение коротких промежутков времени ($\Delta t \approx 10^{-5}$ с) ему удалось заменить измерением частоты посылок; это оказалось гораздо проще осуществить технически.

Существенно повысить точность измерений в установке, предложенной Физо, сумел в 1872 г. Корню; он использовал несколько зубчатых колес различного типа и длину светового пути около 2,3 км. Корню получил значение $c = 298\,500$ км/с, а ошибка достигала $\Delta c = 900$ км/с. Погрешность измерения c в этом эксперименте оценивалась в 3%.

В 1850 г. Фуко для модуляции светового пучка и стробирования приемника использовал вращающееся зеркало; это позволило уменьшить потери света, улучшило условия формирования светового пучка.

Опыты Майкельсона. Метод вращающегося зеркала существенно усовершенствовал Майкельсон, который в период с 1870 по 1931 г. провел несколько серий измерений. В опыте 1927 г. Майкельсон использовал дистанцию длиной L — 35 км между вершинами гор Маунт-Вильсон и Сан-Антонио в Калифорнии (рис.5). В качестве модулятора света применялась восьмигранная призма из никелированной стали. Частота вращения призмы измерялась с помощью камертона и достигала 500 оборотов в секунду. В качестве источника света в этом опыте использовался мощный дуговой прожектор, разработанный для военных целей. Погрешность измерения расстояния не превышала 10^{-6} . Был получен результат $c = (299\,796 \pm 4)$ км/с.

Современные методы измерения скорости света. Эталоны времени и длины.

В современных измерениях скорости света используется модернизированный метод Физо (модуляционный метод) с заменой зубчатого колеса на энкстро-оптический дифракционный, интерференционный или какой-либо иной модулятор света, полностью прерывающий или ослабляющий световой пучок. Приемником излучения служит фотоэлемент или фотоэлектронный умножитель.

Применение лазера в качестве источника света, УЗ-модулятора со стабилизированной частотой и повышение точности измерения длины базы позволили снизить погрешности измерений и получить значение $c = 299792$. В заключение остановимся на современных методах определения скорости света, которые основаны на одновременном измерении частоты света ν и длины волны λ , связанных простым соотношением $c = \lambda\nu$. В экспериментах Ивенсона и сотрудников (1972 г.) в качестве источника света использовался гелий-неоновый лазер, работающий на длине волны $\lambda = 3,39$ мкм. Рабочая частота лазера стабилизировалась линией поглощения молекулы CH_4 с огромной точностью

$\Delta\nu/\nu \approx 6,25 \cdot 10^{-10}$. Затем возникла проблема сравнения частоты стабилизированного лазера с эталонной, в качестве которой в настоящее время принята частота ν_0 , соответствующая квантовому переходу между линиями сверхтонкой структуры атома цезия ^{133}Cs ($\nu_0 = 9,19263177 \cdot 10^9$ Гц). С помощью пяти различных стабилизированных лазеров и устройств для умножения и смещения частот авторам удалось преобразовать эталонную частоту в ИК диапазон и, сравнив ее с частотой гелий-неонового лазера ν_L , определить, что $\nu_L = 8,8376181627 \cdot 10^{13}$ Гц.

Вторая часть проблемы — это сравнение длины волны лазера с эталонным метром, который определяется как $1,65076373 \cdot 10^6$ длин волн в вакууме излучения стандартной криптоновой лампы (переход $5d_5 \rightarrow 2p_{10}$ атомов ^{89}Kr). Сравнение двух длин волн — лазерной и эталонной — проводилось в интерферометре Фабри-Перо, и дало результат

$\lambda_L = 3,39231376$ мкм с точностью $\Delta\lambda/\lambda = 3,5 \cdot 10^{-9}$. Авторы получили значение скорости света $c = 299792,4562 \pm 0,0011$ км/с, повысив точность по сравнению с лучшими предыдущими результатами на два порядка. Анализ экспериментальных ошибок показывает, что основным их источником является погрешность, связанная с асимметрией контура линии криптона, приводящая к неопределенности эталонного метра.

Решением Генеральной ассамблеи Международного комитета по численным данным для науки и техники, обобщившим все известные экспериментальные данные, скорость света в вакууме принято считать равной

$$c = 299792458 \pm 1,2 \text{ м/с.}$$

Чрезвычайно высокая точность, с которой известна эта фундаментальная физическая постоянная, послужила основой для пересмотра определения единицы длины. В 1983 г. международным соглашением установлено, что 1 метр — это расстояние, проходимое светом в вакууме за $1/299792458$ долю секунды.

Литература

1. Джефф Б. Майкельсон и скорость света. — М.: ИЛ, 1963.
2. Фрум К., Эссен Л. Скорость света и радиоволн. — М.: Мир, 1973.
3. Киттель Ч., Найт У., Рудерман М. Механика. — М.: Наука, 1975.
4. Басов Н. Г., Колмогоров Г. Д. Единый эталон частоты, времени и длины//Наука и человечество. Международный ежегодник. — М.: Знание, 1988. С. 245-261.
5. Летохов В. С., Чеботаев В. П. Нелинейная лазерная спектроскопия высокого разрешения. — М.: Наука, 1990.
6. Evenson K. M., Wells J. S., Petersen F. R., Danielson B. L., Day G. W.//Appl. Phys. Lett. 1973. V. 22. P. 192.