



Распространение света в средах: открытие закона



Анатолий ВОЛКОВ
Anatoly A. VOLKOV

Константин ХРАМОВ
Constantin G. KHRAMOV



Волков Анатолий Алексеевич — доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.

Храмов Константин Григорьевич — аспирант кафедры «Инновационные технологии» (МИИТ), Москва, Россия.

Показано, что основной закон распространения света в средах был открыт в 1621 году голландским математиком Снеллом путем обработки экспериментальных данных древнегреческого ученого Клавдия Птолемея, полученных им в 140 году, почти 1,5 тысячелетия назад. Современные процессы в волоконно-оптических линиях связи базируются на этом законе. Вместо цифровых можно передавать по линиям такого типа аналоговые импульсные сигналы, но наибольший выигрыш в частотной эффективности без уменьшения помехоустойчивости обеспечивает передача клиппированных речевых сигналов.

Ключевые слова: распространение света в средах, история открытия, Птолемей, закон Снелла, волоконно-оптическая линия связи, полное внутреннее отражение, числовая апертура, дисперсия, виды сигналов, помехоустойчивость.

Уже привычно волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) занимают лидирующие положения в современных системах передачи информации. До сего дня проложено больше 100 млн км волокна и около 10 млн км его производится ежегодно. Все материи соединены между собой кабелями этого типа, и их общая длина превышает 350 тыс. км. Широко используется ВОЛС и на железнодорожном транспорте.

Оптическое волокно представляет собой нить из чистого стекла (диоксида кремния SiO_2), обеспечивающего распространение в нём светового сигнала с очень низкими потерями. Этот эффект достигается согласно явлению полного внутреннего отражения, вытекающего из закона Снелла.

История открытия закона была очень долгой по времени и интересной. Древнегреческий ученый Клавдий Птолемей в 140 году н. э. составил таблицу углов отклонения света в воде в зависимости от углов падения его из воздуха (таблица 1, первые два столбца).

Таблица Птолемея пролежала без обработки до 1621 года, то есть почти 1,5 тыся-

Таблица 1

Угол φ_1 в возду- хе, град.	Угол φ_2 в воде, град.	$\sin \varphi_1$	$\sin \varphi_2$	$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2}$
10	8	0,1736	0,1392	1,25
20	15,5	0,3120	0,2588	1,2
30	22,5	0,5	0,3746	1,335
40	28	0,6428	0,4095	1,369
50	35	0,7660	0,5736	1,335
60	40,5	0,8660	0,6428	1,347
70	45,0	0,9397	0,7071	1,33
80	50,0	0,9848	0,7660	1,286

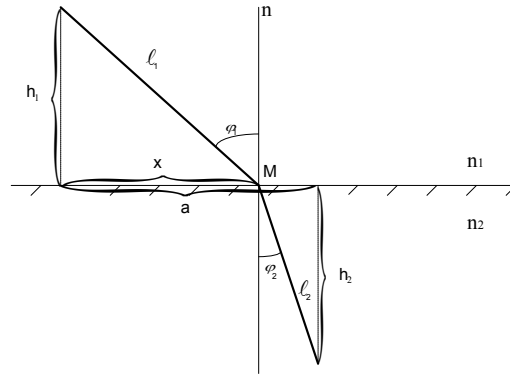


Рис. 1.

челения, пока голландский математик Виллеброрд Снелл (Snellius) не обратил на неё внимания. По-видимому, он составил синусы обозначенных там углов (3-й и 4-й столбцы таблицы 1) и обнаружил, что их отношение (5-й столбец) примерно постоянно и соответствует в среднем 1,33. Это, что подтвердилось позже, есть коэффициент преломления n_2 света в воде, в то время как коэффициент преломления света в воздухе $n_1=1$. Следовательно, отношение

$$\frac{\sin \phi_1}{\sin \phi_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1,33}{1} \quad \text{или}$$

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2 \quad (1)$$

и есть закон Снелла, обнаруженный голландцем при обработке измерений Птолемея. Поэтому справедливо было бы называть этот закон двумя именами: Снелла-Птолемея.

В 1650 году известный итальянский математик Ферма сформулировал закон Снелла, не используя опытных данных, а основываясь на предложенном им постулате: «из всех возможных путей, соединяющих две точки, свет выбирает тот путь, который требует наименьшего времени для его прохождения». Такой путь находится в результате решения экстремальной задачи, суть которой поясняет рис. 1.

Точка М должна быть расположена так, чтобы время

$$t = t_1 + t_2 = \frac{l_1}{v_1} + \frac{l_2}{v_2} = \frac{\sqrt{h_1^2 + x^2}}{v_1} + \frac{\sqrt{h_2^2 + (a-x)^2}}{v_2} = \min,$$

где v — скорость света; l — длина пути; n — высота точки.

Для этого возьмём производную по времени t и пути x и приравняем её к нулю:

$$\frac{dt}{dx} = \frac{x}{v_1 \sqrt{h_1^2 + x^2}} - \frac{a-x}{v_2 \sqrt{h_2^2 + (a-x)^2}} = 0$$

Отсюда

$$\frac{x}{l_1 v_1} = \frac{a-x}{l_2 v_2} \quad \text{или}$$

$$\frac{\sin \phi_1}{\sin \phi_2} = \frac{x}{l_1} : \frac{l_2}{a-x} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Поскольку скорость света v в среде обратно пропорциональна показателю преломления n среды, то

$$\frac{\sin \phi_1}{\sin \phi_2} = \frac{n_1}{n_2},$$

что совпадает с законом Снелла (1).

В принципе Ферма существенны не минимум и даже не экстремальность времени прохождения светом пути, а стационарность этого времени.

В такой форме этот принцип можно вывести из волновой теории света.

Из закона Снелла следует, что при $n_1 > n_2$ угол падения ϕ_1 меньше угла преломления

ϕ_2 . При $\phi_1 = \phi_{1m}$ угол $\phi_2 = \frac{\pi}{2}$ радиан

и значение $\sin \phi_{1m} = \frac{n_2}{n_1}$, когда отражённый луч движется по границе раздела двух



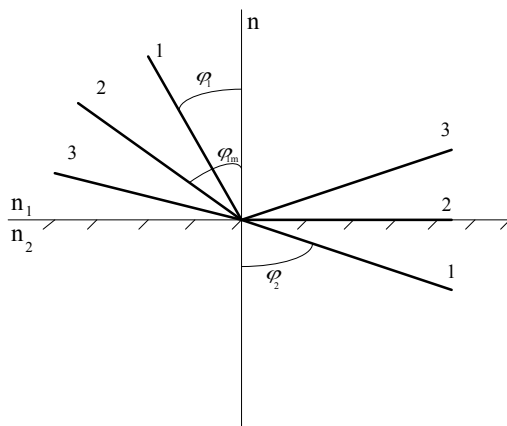


Рис. 2.

сред, обеспечивая полное внутреннее отражение (рис. 2). Раскрытию природы полного внутреннего отражения света, следует отметить, способствовал и выдающийся российский учёный-физик А. А. Эйхенвальд, который был профессором Московского института инженеров транспорта, а в 1908 году стал ректором МИИТ.

На рис. 3 представлена структура отрезка оптического волновода, содержащего сердечник — 1, оболочку — 2 и покрытие (не обозначено).

Максимальный телесный угол Θ относительно оси волокна, в пределах которого свет может быть захвачен волоконным световодом, называется числовой апертурой (ЧА), английская аббревиатура NA (numerical aperture). Из рис. 3 следует, что

$$\sin \Theta = \cos \phi_m = \sqrt{1 - \sin^2 \phi_m} = ,$$

$$\sqrt{1 - \left(\frac{n_{i\dot{a}}}{n_c}\right)^2} = \sqrt{\frac{n_c^2 - n_{i\dot{a}}^2}{n_c^2}} = \frac{NA}{n_c} ,$$

$$\text{т. е. } NA = n_c \sin \Theta.$$

И это тоже определяется законом Снелла. Реальное значение NA мало и составляет в радианах от 0,1 (для кварцевого волокна) до 0,5 (для пластикового). Поэтому допустимые углы входа света не превышают 3–20 градусов.

Сегодня по ВОЛС передается исключительно цифровой сигнал (ЦС) согласно рис. 4.

Однако по таким линиям связи можно передавать и аналогово-импульсные сиг-

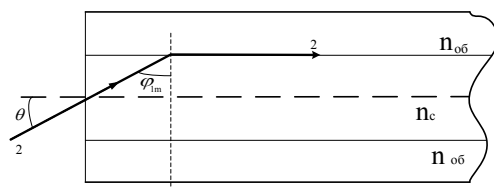


Рис. 3.

налы — с частотно-импульсной модуляцией (ЧИМ) или широтно-импульсной модуляцией (ШИМ).

Волокно с ЧИМ использовалось в авторской разработке измерителя напряженности электромагнитного поля в зоне индукции коротковолнового диапазона [2]. При этом удалось уменьшить погрешность измерения с 40 до 10% за счёт исключения антенного эффекта при замене отрезка проводной линии связи внутри измерителя на отрезок ВОЛС, являющегося диэлектриком (без переизлучения). В таком случае на рис. 4 вместо АЦП надо включить модулятор ЧИМ или ШИМ, а вместо ЦАП — фильтр нижних частот (ФНЧ).

Схема модулятора односторонней ШИМ представлена на рис 5. Он выполнен на таймере К 1006 ВИ1. На его ножку 2 подается импульсная поднесущая, а на ножку 5 — аналоговый модулирующий сигнал U_x . Сигнал ШИМ снимается с ножки 3 и подается на светоизлучающий диод (СИД) или лазер. На этой же ИМС может быть выполнен и модулятор ЧИМ.

Если немодулированную импульсную последовательность $u(t)$ разложить в ряд Фурье и представить как

$$u_1(t) = U_0 \left(\frac{\Theta}{2\pi} + \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{k\Theta}{2}}{k} \cos k\Omega_0 t \right),$$

а модулирующий сигнал считать гармоническим, при котором ширина импульса $\Theta = \Omega t = \Theta_0 + \Delta\Theta \sin \Omega_0 t$, то спектральный состав ШИМ-сигнала примет вид:

$$u_o(t) = U_0 \left[\frac{\Theta_0}{2\pi} + \frac{\Delta\Theta}{2\pi} \sin \Omega t + \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{k}{2} (\Theta_0 + \Delta\Theta \sin \Omega t)}{k} \cos k\Omega_0 t \right].$$

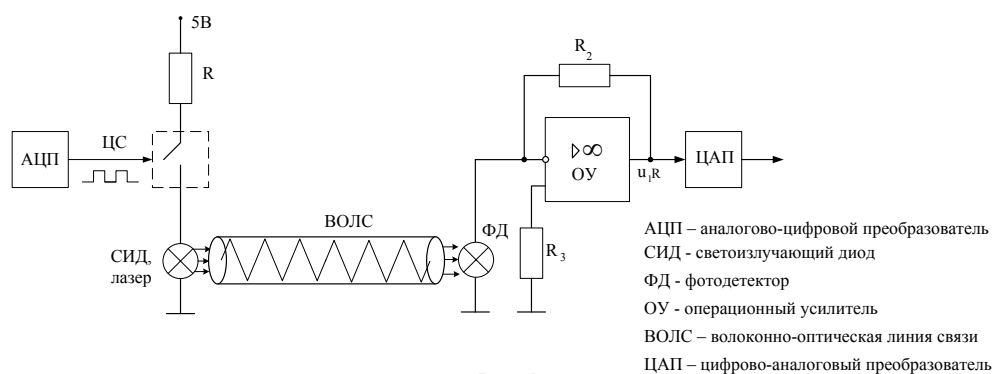


Рис. 4.

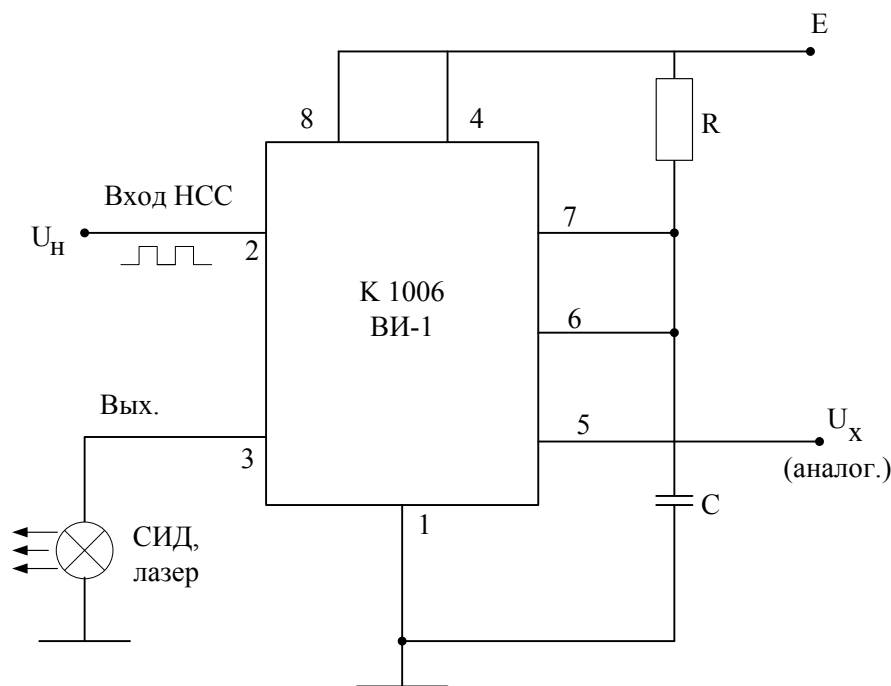


Рис. 5.

Как нетрудно заметить, переданный сигнал можно выделять фильтром нижних частот. Это значит, что при ШИМ модулятор (рис. 5) и демодулятор (ФНЧ) значительно проще АЦП и ЦАП.

По ВОЛС передаются не только цифровые сигналы и сигналы с ЧИМ и ШИМ, но и глубоко ограниченные по амплитуде (клиппированные) аналоговые речевые сигналы [4], при которых существенно повышается частотная эффективность канала, ибо полоса частот Δf_a аналогового сигнала в n раз меньше полосы частот Δf_δ цифрового сигнала ($\Delta f_a = \frac{\Delta f_\delta}{n}$). Где n – разрядность кодового слова цифрового сигнала; для речи $n=8$. Полоса частот клип-

пированного речевого сигнала значительно меньше полосы частот сигнала с ЧИМ и ШИМ. Остальные показатели клиппированного сигнала, передаваемого по ВОЛС, не ухудшаются. При этом восстанавливается огибающая речевого сигнала на приёмной стороне с помощью детектора сигналов с дельта-модуляцией.

Отметим, что в любом случае используются две ступени модуляции: первая – ШИМ, ЧИМ, ИКМ, клиппированные сигналы, а вторая – амплитудная манипуляция света сигналами данных модуляций. Причем при нецифровых видах модуляций имеет место дисперсия – изменение ширины оптического импульса при его передаче по волокну.





ВЫВОДЫ

1. Экспериментальные данные по распространению света в воде были получены древнегреческим учёным Клавдием Птолемеем в 140 году н. э., задолго до Снелла, который в конце концов удачно воспользовался ими. Поэтому закон логично было бы назвать двумя именами: Снелла–Птолемея.

2. Итальянский ученый Ферма подтвердил в 1650 году правомерность этого закона без экспериментальных данных, но на основании сформулированного им постулата о распространении света.

3. Показано, что отрезок ВОЛС, будучи диэлектриком, не переизлучает электромагнитные волны, и это позволило существенно повысить точность измерений напряженности электромагнитного поля коротковолнового диапазона в зоне индукции, уменьшить погрешность измерения с 40 до 10%.

4. В измерителе (см. п.3) использовались не цифровые сигналы, а сигналы

с частотно-импульсной модуляцией. Их применение, как и сигналов с широтно-импульсной модуляцией, существенно упрощает аппаратуру.

5. Наибольший выигрыш в частотной эффективности без уменьшения помехоустойчивости обеспечивает передача по ВОЛС клиппированных речевых сигналов по сравнению с аналого-импульсными или цифровыми.

ЛИТЕРАТУРА

1. Журавлёва Л. М., Волков А. А. Информационные и нанотехнологии в волоконно-оптической связи: Монография. – Электронное издание № Г.Р. 0321202172 от 1 августа 2012 года. Объем 15 а. л.

2. Патент РФ на ПМ № 110194. Измеритель напряженности электромагнитного поля КВ диапазона в зоне индукции/Волков А.А., Шаров А. А., Журавлёв О. Е. Приоритет от 04.07.2011. Оpubл. в БИ № 31 за 2011 г.

3. Мышкис А. Д. Введение в высшую математику. – М.: Наука, 1973.

4. Волков А. А., Карпова Г.А., Журавлёв О. Е. Повышение помехоустойчивости радиосвязи // Мир транспорта. – 2012. – № 3. – С. 30–33. ●

HISTORY OF DESCRIPTION OF THE LAW OF REFRACTION OF THE LIGHT

Volkov, Anatoly A. – D. Sc. (Tech), professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

Khramov, Constantin G. – Ph.D. student at the department of innovation technology of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

The authors demonstrate that the fundamental law of refraction of the light passing through a boundary between two different isotropic media was discovered in 1621 by Dutch astronomer Willebrord Snellius who, in their opinion, treated the experimental data of ancient Roman-Greek scientist Claudius Ptolemaeus, who discovered it in 140. (According to more accepted version the law is named Snell's law or the Snell–Descartes law, René Descartes

independently derived the law and described it in his 1637 treatise Discourse on Method – editor note). Modern processes in fiber-optic communication lines are based on that law. The authors argue that it is possible to use it to transmit digital and analog and pulse signals as well, but clipped speech transmission is most efficient from the point of view of frequency efficiency, and taking into account that there is no reduction in interference immunity.

Key words: diffusion of light in media, Ptolemaeus, Snellius law, fiber-optic line, complete internal reflection, numerical aperture, dispersion, signal types, interference immunity.

REFERENCES

1. Zhuravleva L.M., Volkov A.A. Information and nanotechnology in fiber-optic communications [Informatsionnye i nanotekhnologii v volokonno-opticheskoy svyazi]. Electronic edition № G.R. 0321202172. 1.08.2012.

2. Patent of Russian Federation PM № 110194. Device for measuring intensity of electromagnetic field of SW range in induction area [Measuring device of Izmeritel' napryazhennosti elektromagnitnogo polya KV diapazona v zone induktsii]. Volkov A.A., Sharov A.A., Zhuravlev O.E.

Priority dated 04.07.2011. Published in Bulletin of patents № 31, 2011.

3. Myshkis A.D. Introduction to higher mathematics [Vvedenie v vysshuyu matematiku]. Moscow, Nauka publ., 1973.

4. Volkov A.A., Karpova G.A., Zhuravlev O.E. Increasing interference immunity of radio communication [Povyshenie pomехoustoychivosti radiosvyazi]. Mir transporta [World of Transport and Transportation] Journal. 2012. Vol.41, №3, pp.30–33.

Координаты авторов (contact information): Волков А.А.(Volkov A.A.) – aavolkov2009@rambler.ru, Храмов К.Г. (Khramov C.G.) – bkxk@bk.ru.

Статья поступила в редакцию / article received 31.01.2013
Принята к публикации / article accepted 19.02.2013