

Методы и средства обработки сигналов и изображений

УДК 681.778 – 681.069

А.Т. Орлов, канд. техн. наук, Г.Н. Розоринов, д-р техн. наук, Е.Г. Розоринова

Особенности расчета потерь, возникающих при соединении ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Рассмотрены виды соединения оптических волокон кабелей связи и уточнены основные расчетные соотношения, позволяющие определить возникающие при этом потери оптического сигнала.

The types of optical cable fibres connection and basic calculated correlations are considered and precised allowing to define the appearing here optical signal losses.

Ключевые слова: оптическое волокно, соединители, френелевское отражение.

Введение

Соединение оптических кабелей приводит к потерям энергии оптического сигнала, при этом потери в самих соединениях могут превышать уровень километрического затухания волокон. Выбор типа оптического волокна (ОВ) определяется не только техническими требованиями, но и во многих случаях его стоимостью. Для связи на небольшие расстояния могут использоваться соединители и ОВ с относительно большими потерями и низкой стоимостью, в том числе многомодовые (ММ) ОВ. Конструкция волокон в оболочке с защитным покрытием показана на рис. 1, а их основные характеристики сведены в табл. 1 [1].

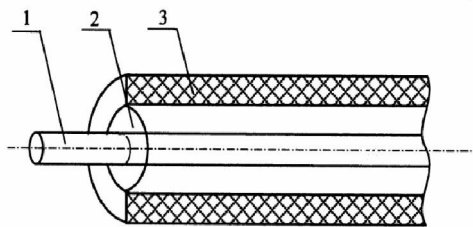


Рис. 1. Оптическое волокно: 1 – сердцевина; 2 – оболочка; 3 – защитное покрытие

Диаметр сердцевины ММ ступенчатого ОВ обычно превышает несколько десятков мкм, числовая апертура составляет 0,2...0,4, оптические потери – 1...3 дБ/км, частотная полоса пропускания – 50...100 МГц·км. Оболочка таких ОВ может быть как стеклянной, так и пластмассовой. В одномодовом (ОМ) ОВ для передачи сигналов с длинами волн $\lambda = 1,3$ и $\lambda = 1,55$ мкм диаметр серд-

цевины составляет 8...9 мкм (оболочки – 125 мкм), числовая апертура – около 0,1, оптические потери находятся в диапазоне 0,3...0,5 дБ/км, частотная полоса пропускания превышает 100 ГГц·км.

При эксплуатации волоконно-оптических линий возникает необходимость их соединений [2]. Наиболее характерными примерами являются соединения типа: источник излучения – ОВ; ОВ – ОВ; ОВ – приемник излучения. Различают неразъемные и разъемные соединения ОВ (рис. 2). Неразъемные соединения используются в местах постоянного монтажа кабельных систем. Разъемные соединения допускают многократное соединение/разъединение кабелей и компонентов систем. Промежуточное положение занимают соединения типа механического сплайса.

Основная трудность при соединении волокон заключается в их малых поперечных размерах. Требуется микрометрическая точность при стыковке подготовленных (сколотых, полированных) торцов соединяемых ОВ. Причем юстировка должна обеспечить не только соосность волокон, но и минимально возможный зазор между их торцами, чтобы предотвратить оптические потери.

Целью работы является систематизация видов оптических потерь, возникающих при разных способах соединения волокон, уточнение и обобщение расчетных формул, приведенных в различных литературных источниках.

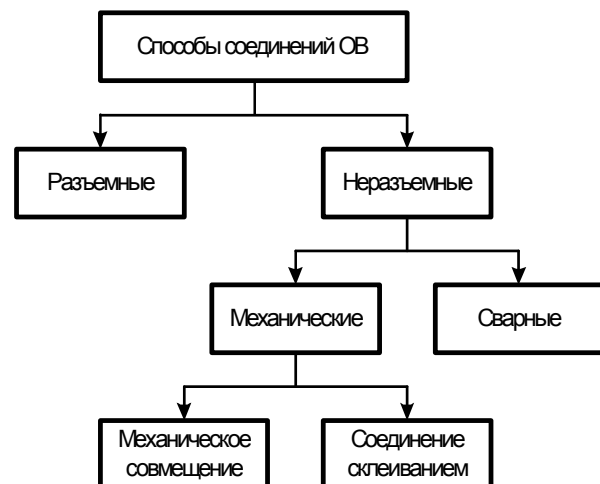


Рис. 2. Основные способы соединений ОВ

Таблица 1. Характеристики некоторых ОВ

Тип ОВ	Диаметр сердцевины/оболочки, мкм	Оптические потери, дБ/км			Полоса пропускания ($\lambda = 1300$ нм), МГц·км
		$\lambda = 0,85$ мкм	$\lambda = 1,31$ мкм	$\lambda = 1,55$ мкм	
Многомодовое ступенчатое	50/125	3	1	—	100
Многомодовое градиентное	62,5/125	3	1	—	160...500
	85/125	3	1	—	500...2000
	100/140	3	1	—	500...2000
Одномодовое ступенчатое	4...5/80	—	0,4	0,3	>1000
	8...9/125	—	0,5	0,25	>10 ⁹
Пластмассовое	1000	~1000 ($\lambda = 0,665$ мкм)	—	—	~5

Основная часть

К устройствам соединения ОВ предъявляют следующие основные требования: малые вносимые потери, малое обратное отражение, устойчивость к внешним механическим, климатическим и другим воздействиям, высокая надежность и простота конструкции, незначительное ухудшение параметров после многократных соединений/разъединений.

Вносимые потери зависят от типа ОВ (одномодовое или многомодовое), типа и качества соединителя и составляют 0,25...3 дБ. Коэффициент передачи оптической мощности при

соединении волокон торец к торцу определяется как

$$K_T = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{P_{\text{вх}} - P_{\text{отр}}}{P_{\text{вх}}} < 1, \quad (1)$$

а соответствующие ему вносимые соединением потери (дБ) –

$$a_T = -\lg K_T = -10 \lg \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{вх}}$, $P_{\text{вых}}$, $P_{\text{отр}}$ – оптические мощности на входе, выходе и отражения, соответственно.

Различают вносимые потери внутренние и внешние (рис. 3).



Рис. 3. Вносимые потери при соединении ОВ

Внутренние потери вызваны факторами, которые невозможно контролировать и они складываются аддитивно. Величина этих потерь изменяется случайным образом даже в случае одного стандарта ОВ и одного производителя. На внутренние потери оказывает влияние технология производства ОВ и критерии контроля его параметров при вытяжке, но не конструкция соединителя.

Формулы для расчета вносимых потерь при идеальном соединении неидентичных ОВ приведены в табл. 2. Здесь введены такие обозначения: a – радиус сердцевин ОВ; w – радиус модового поля ОВ; n_1, n_2 – показатели

преломления веществ по обе стороны границы раздела

Потери из-за различия диаметров ОВ возникают, когда диаметр передающего ОВ $2a_1$ больше диаметра принимающего ОВ $2a_2$. В противном случае потери не возникают. Аналогично, если значение числовой апертуры $NA_1 < NA_2$, то потери отсутствуют. Потери вследствие френелевского отражения существуют всегда ввиду различия показателей преломления сердцевин ОВ независимо от направления распространения световой волны.

Таблица 2. Потери при идеальном соединении ОВ

Тип ОВ	Факторы, обуславливающие потери	Расчетная формула, дБ
ММ	Различие в диаметрах сердцевин $2a_1 > 2a_2$	$a_d = -10 \lg \frac{a_1^2}{a_2^2}$
	Различие в значениях числовых апертур $NA_1 > NA_2$	$a_{NA} = -10 \lg \frac{NA_1^2 - NA_2^2}{NA_1^2}$
	Поперечное смещение (между осями) x	$a_x = -10 \lg \frac{4x}{\pi d}, \quad d = 2a$
	Угловое смещение (наклон торцов) φ	$a_\varphi = -10 \lg \left(1 - \frac{2\varphi}{\pi \sqrt{2\Delta}} \right), \quad \Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$
	Френелевское отражение от торцов	$a_{фр} = -10 \lg \left[1 - \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \right]$
ОМ	Различие в диаметрах модовых полей $2w_1 > 2w_2$	$a_w = -10 \lg \frac{2w_1 w_2}{w_1^2 + w_2^2}$
	Различие в диаметрах сердцевин $2a_1 > 2a_2$	$a_d = -10 \lg \frac{a_1^2}{a_2^2}$
	Поперечное смещение (между осями) x	$a_x = -10 \lg \left[\exp \left(-\frac{x^2}{w^2} \right) \right]$
	Угловое смещение (наклон торцов) φ	$a_\varphi = -10 \lg \left[\exp \left(-\frac{\pi n_2 w \varphi}{\lambda} \right)^2 \right]$
	Френелевское отражение от торцов	$a_{фр} = -10 \lg \left[1 - \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \right]$

Внешние потери определяются механическими (геометрическими) погрешностями, плохим качеством подготовки торцов ОВ (шероховатостью), загрязнением зазора между ними, а также френелевским отражением. Формулы для расчета составляющих внешних потерь в соединениях одинаковых ОВ различных типов приведены в табл. 3.

Следует отметить, что расчеты потерь при соединениях ОВ, особенно при наличии зазора между ними, является сложной математической задачей, которая в настоящее время полностью не решена, поэтому на практике пользуются приближенными соотношениями. В табл. 2, 3 сведены уточненные формулы для

расчета потерь, приведенные в работах [3–5].

Для оценки качества соединения используются также такие параметры как коэффициент отражения

$$R_{\text{фр}} = \frac{P_{\text{отр}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (3)$$

и потери обратного отражения (дБ)

$$b_{\text{фр}} = 10 \lg R_{\text{фр}} = 10 \lg \frac{P_{\text{отр}}}{P_{\text{вх}}}, \quad (4)$$

где n_1, n_2 – показатели преломления веществ по обе стороны границы раздела (рис. 4).

Таблица 3. Внешние потери при соединении ОВ различных типов

Тип ОВ	Продольное смещение s , дБ	Поперечное смещение x , дБ	Угловое смещение φ , дБ
Многомодовое ступенчатое	$a_s = -10 \lg \left(1 - \frac{sNA}{4an_0} \right)$	$a_x = -10 \lg \left[\frac{2}{\pi} \left(\arccos \frac{x}{2a} - \frac{x}{2a} \sqrt{1 - \frac{x^2}{4a^2}} \right) \right]$, $a_x = 10 \lg \left(1 - \frac{2x}{\pi a} \right)$, $\frac{x}{a} < 0,2$	$a_\varphi = -10 \lg \left(1 - \frac{n_0 \varphi}{\pi NA} \right)$
Многомодовое градиентное	$a_s = -10 \lg \left(1 - \frac{4 sNA}{3\pi an_0} \right)$ (для малых s)	$a_x = -10 \lg \left(1 - \frac{8x}{3\pi a} \right)$ (для малых x)	$a_\varphi = -10 \lg \left(1 - \frac{8\varphi}{3\pi \frac{n_1}{n_0} \sqrt{2\Delta}} \right)$, $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$
Одномодовое ступенчатое	$a_s = -10 \lg \left[\frac{4(z^2 + 1)}{(4z^2 + 2)^2 + 4z^2} \right]$, $z = \frac{3\lambda}{2\pi n_2 w^2}$	$a_x = -10 \lg \exp \left(-\frac{x^2}{w^2} \right)$	$a_\varphi = -10 \lg \exp \left[-\left(\frac{\pi n_2 w \varphi}{\lambda} \right)^2 \right]$
Потери френелевского отражения	$a_{\text{фр}} = -10 \lg \left(\frac{2n_1 n_0}{n_1^2 + n_0^2} \right)$	$a_{\text{фр}} = -10 \lg \left[\frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2} \right]$	—

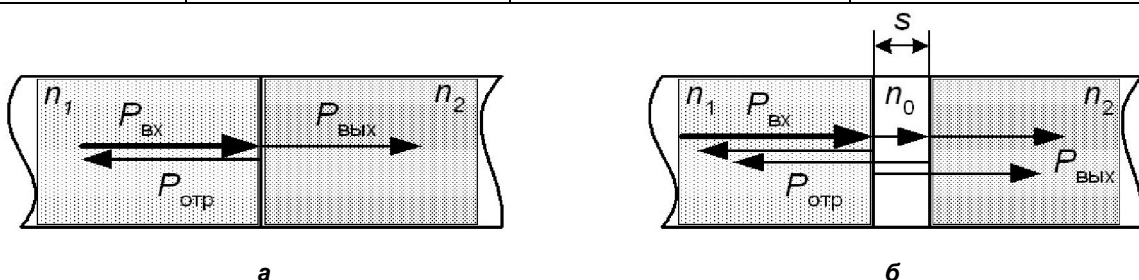


Рис. 4. Обратное отражение оптической мощности от торцов ОВ

Например, для границы раздела сердцевина ОВ – воздух получаем из соотношения (3): $n_1=1,64$; $n_2=1,0$; $R_{\text{фр}}=0,035$; $b_{\text{фр}}=-14,6$ дБ. То есть 3,5 % оптической мощности отражается от гладкого торца ОВ.

Основной вклад в обратное отражение вносит френелевское отражение из-за зазора s (обычно воздушного) между торцами ОВ (рис. 4, б). Поэтому наиболее общее выражение для коэффициента отражения имеет следующий вид [3]:

$$R_{\text{фр}} = \frac{(n_1 - n_0^2)^2 \sin^2\left(\frac{2\pi n_0 s}{\lambda}\right)}{4n_1^2 n_0^2 + (n_1 + n_0^2)^2 \sin^2\left(\frac{2\pi n_0 s}{\lambda}\right)}, \quad (5)$$

где n_1 , n_0 – показатели преломления сердцевины ОВ (одинаковые для обоих ОВ) и среды в зазоре, соответственно. Обычно пренебрегают разницей в показателях преломления соединяемых ОВ. В соответствии с законом сохранения энергии $R_{\text{фр}} + K_T = 1$. Непараллельность торцов приводит к разным значениям зазора s (разным показателям преломления среды в зазоре n_0') для различных участков сердцевины. В этом случае обратные потери $b_{\text{фр}}$, дБ, определяются по усредненным значениям $\overline{R_{\text{фр}}}$:

$$b_{\text{фр}} = 10 \lg \overline{R_{\text{фр}}} = 10 \lg \frac{(n_1 - n_0')^2}{(n_1 + n_0')^2}. \quad (6)$$

Например, можно посчитать, что при $n_1=1,5$ и $n_0'=1,0$ $b_{\text{фр}}=-11$ дБ. Теоретически коэффициент отражения $R_{\text{фр}}$ может быть и нулевым при некоторых значениях зазора s , но практически этого не бывает. Более того, это выполнялось бы только для одной длины волны или узкого диапазона длин волн. То есть только уменьшением зазора можно несколько снизить обратные потери. В табл. 4 приведены полученные в работе значения вносимых и обратных потерь для некоторых отношений $\frac{s}{\lambda}$ при $n_1=1,5$ и $n_0=1,0$, которые близки к результатам работы [3].

Отражение не только ослабляет прямой световой поток, но и увеличивает обратный поток, который может достигать передающего оборудования и значительно ухудшать параметры излучения, например, модовый состав, ширину спектральной линии излучения и уровень собственных шумов. Из табл. 4 видно, что

при значениях $\frac{s}{\lambda} < 0,1$ вклад френелевского отражения во вносимые потери мал, однако, именно оно ухудшает параметры излучения.

На практике создание строго перпендикулярных осей плоских торцов ОВ для обеспечения их физического контакта (Physical Contact – PC) затруднительно. Даже небольшие отклонения на угол $\alpha=0,05^\circ$ между плоскостями концов ОВ приводят к зазору около 1 мкм (при диаметре конца 2,5 мм) (рис. 5, а). При сферически выпуклых поверхностях обоих торцов соприкосновение всегда происходит в окрестности светонесущей сердцевины волокон (рис. 5, б).

На практике по уровню потерь обратного отражения различают три типа физических контактов: PC < -30 дБ, Super PC < -40 дБ, Ultra PC < -50 дБ. Радиус кривизны r в PC-соединениях лежит в диапазоне 15...25 мм. При этом столь широкий диапазон значений r объясняется не технологией процесса полирования торцов, а предъявляемыми требованиями к конструкциям и элементам соединителей (металлические, керамические).

Величина обратного рассеяния может быть существенно снижена при использовании соединителей с угловым физическим контактом (Angled PC – APC) (рис. 5, в). При наклоне торцов, даже при отсутствии физического контакта, отраженная часть мощности не распространяется обратно по сердцевине ОВ, а уходит в оболочку. Потери на обратное отражение для APC-соединителей ниже минус 60 дБ. Для стандартного ступенчатого ОМ ОВ угол наклона $\beta=8^\circ$, что приводит к потерям на обратное отражение около минус 70 дБ. При использовании ОМ ОВ со смещенной дисперсией, которое имеет большую числовую апертуру по сравнению со ступенчатым, для обеспечения низких потерь на обратное отражение, угол наклона делают больше, обычно $\beta=12^\circ$. Как вариант APC-соединения может быть использован сферически выпуклый-вогнутый физический контакт (рис. 5, г). При этом выпуклый торец плотно входит в вогнутый торец соосно сердцевинам. Потери на обратное отражение такого соединителя ниже минус 75 дБ. Однако для него имеет значение направление передачи светового потока, потому что в противном случае отраженная часть мощности не уходит в оболочку. APC-соединители ввиду сложности технологии изготовления и высокой стоимости используются в гибридных волоконно-коаксиальных сетях широкополосного доступа и высокоскоростных цифровых оптических магистралях.

Таблица 4. Зависимость потерь от величины зазора

$\frac{s}{\lambda}$	Коэффициент передачи K_T	Вносимые потери a_T , дБ	Коэффициент отражения $R_{фр}$	Обратные потери $b_{фр}$, дБ
0,250	0,85001	0,69530	0,14795	-8,4
0,100	0,94339	0,25293	0,05657	-12,6
0,050	0,98360	0,07140	0,01633	-18,0
0,020	0,99722	0,01187	0,00275	-25,8
0,010	0,99930	0,00295	0,00067	-31,8
0,005	0,99980	0,00075	0,00018	-37,6
0,002	0,99997	0,00013	0,00003	-45,2
0,001	0,99999	0,00004	0,00001	-51,3

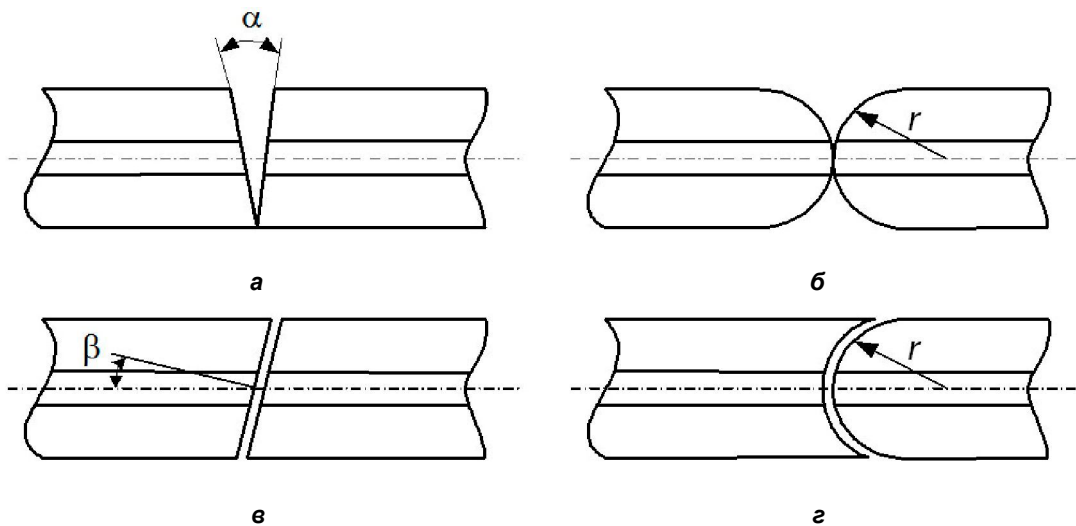


Рис. 5. Варианты физического контакта ОВ

Выводы

1. Рассмотрены и систематизированы виды оптических потерь и способы разъемного соединения ОВ кабелей связи. Приведены уточненные расчетные соотношения, позволяющие определить оптические потери при разных способах соединения ОВ.

2. Несмотря на относительно небольшой вклад френелевского отражения во вносимые оптические потери, оно не только ослабляет прямой световой поток в соединениях ОВ разных типов, но и увеличивает обратный световой поток, который ухудшает параметры излучения.

Литература

1. *Косяченко Л.А.* Основы интегральной та волоконной оптики: Навч. посіб. – Чернівці: Рута, 2008. – 348 с.
2. *Розорінов Г.М., Соловійов Д.О.* Високошвидкісні волоконно-оптичні лінії зв'язку. – К.: Ліра-К, 2007. – 198 с.
3. *Корнейчук В.И.* Измерение параметров компонентов и устройств ВОСП: Учебн. пособ. – Одесса: УГАС им. А.С. Попова, 2000. – 323 с.
4. *Семенов А.Б.* Волоконно-оптические подсистемы современных СКС. – М.: Академия АйТи; ДМК Пресс, 2007. – 632 с.
5. *Бейли Д., Райи Э.* Волоконная оптика: теория и практика. – М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2006. – 320 с.