

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КЕПСТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА В ЗАДАЧАХ МОНИТОРИНГА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

Представлены результаты экспериментальных исследований по обнаружению оборудования для несанкционированного доступа к волоконно-оптическим линиям связи, установленного в пределах мертвой зоны оптического рефлектометра. Рассмотрен метод определения задержки отраженного зондирующего сигнала на основе кепстральной обработки, позволяющий значительно сократить размер мертвой зоны оптического рефлектометра.

В настоящее время в распределенных информационно-вычислительных системах (ИВС) различного назначения все большее распространение получают волоконно-оптические линии связи (ВОЛС). По сравнению с медными кабелями они имеют более широкую полосу пропускания, позволяющую передавать данные со скоростью до 1...2 Тбит/с и более, низкий уровень потерь на распространение сигналов, абсолютную нечувствительность к электромагнитным помехам, малую массу и размеры, а также относительно высокую защищенность от несанкционированного перехвата передаваемой информации. Вместе с тем, при использовании специальных способов и средств возможность съема информации, передаваемой по оптическим волокнам, сохраняется. Анализ способов съема информации с ВОЛС, приведенных в работах [1, 2], показывает, что общей их чертой является воздействие на оптическое волокно и отвод из него части мощности оптического сигнала.

Одним из эффективных способов противодействия несанкционированному доступу к ВОЛС является мониторинг оптического волокна с помощью рефлектометрического контроля. Данный метод позволяет обнаруживать нарушения в оптических волокнах, вызванные как преднамеренными воздействиями с целью несанкционированного доступа (НСД), так и непреднамеренными (повреждения, обрывы линий связи, нарушения коммутации и др.), а также локализовывать их местоположения. Удаленный контроль оптических волокон выполняется, как правило, с помощью оптических импульсных рефлектометров, принцип действия которых основан на зондировании линии мощным оптическим импульсом и измерении мощности и времени запаздывания импульсов, вернувшихся обратно в рефлектометр. Отраженные импульсы образуются в местах, где в линии имеются скачки волнового

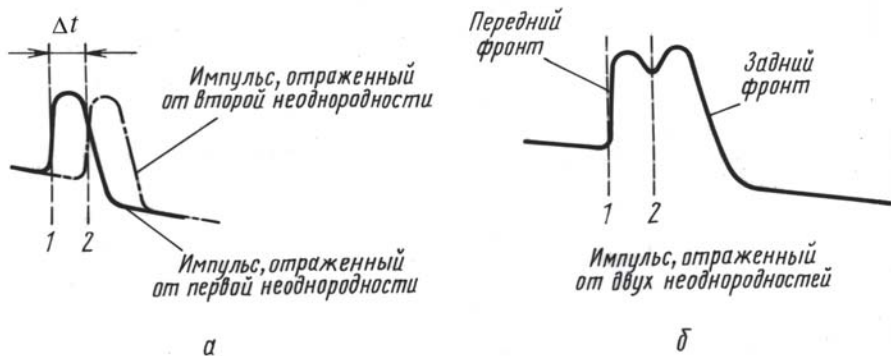


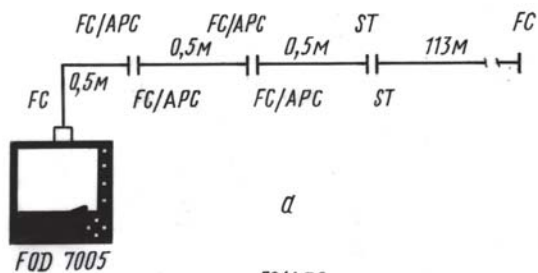
Рис. 1. Отражение импульса света от двух одинаковых неоднородностей 1 и 2, расположенных на расстоянии, равном ширине мертвой зоны

сопротивления (неоднородности). Каждый тип неоднородности (сварное соединение волокон, несанкционированное подключение, трещина, оптический разъем и т.д.) имеет свой характерный образ на рефлектограмме и может быть легко идентифицирован.

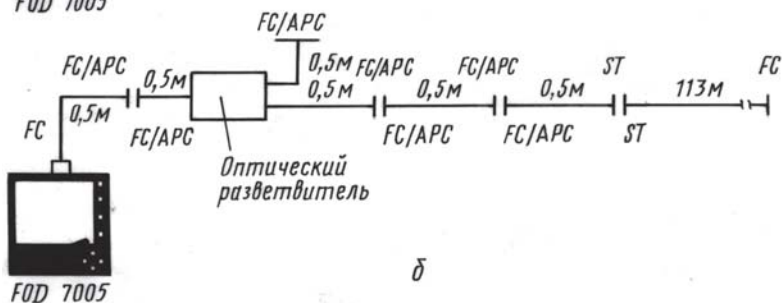
Существенным недостатком оптических импульсных рефлектометров при решении задач мониторинга ВОЛС является наличие у них так называемых мертвых зон [3]. Ширина мертвой зоны определяется как минимальное разрешимое расстояние между двумя неоднородностями (рис. 1).

Если расстояние между неоднородностями заметно больше ширины импульса, они легко разрешаются, так как отраженные от них импульсы не перекрываются. Чем меньше расстояние между неоднородностями, тем сильнее перекрываются отраженные от них импульсы. Когда расстояние между неоднородностями становится равным ширине импульса, отраженные импульсы перекрываются настолько сильно, что сливаются в один импульс с небольшим провалом на вершине и становятся неразличимы. Таким образом, ширина мертвой зоны оптического рефлектометра определяется длительностью зондирующего импульса и может быть сокращена за счет ее уменьшения. Однако в связи с тем, что доля мощности света, рассеиваемая назад, в моду волокна, крайне мала, в рефлектометрах используются зондирующие импульсы большой мощности и большой длительности.

Ширина мертвой зоны в современных рефлектометрах лежит в пределах от одного до десятков метров. В пределах данной мертвой зоны может быть установлено оборудование для НСД, которое невозможно выявить с помощью рефлектометрического контроля. На рис. 2, *а* приведена схема составного участка ВОЛС с подключенным рефлектометром, а на рис. 2, *б* — схема этого же участка, но с включенным в пределах мертвой зоны оптическим разветвителем.



a



б

Рис. 2. Схема составного участка ВОЛС:

a — с подключенным рефлектометром; *б* — с подключенным рефлектометром и оптическим разветвителем

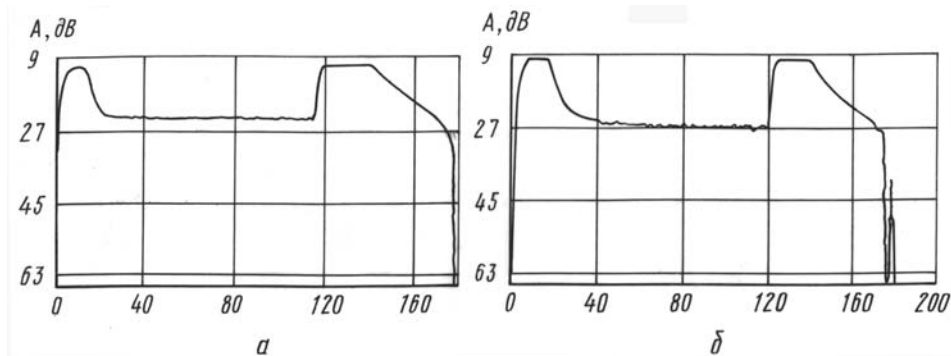


Рис. 3. Рефлектограмма составного участка ВОЛС без оптического разветвителя (*a*) и с подключенным оптическим разветвителем (*б*)

Рефлектограммы данных участков представлены соответственно на рис. 3, *a* и *б*.

Анализ рис. 3 показывает, что на рефлектограмме (см. рис. 3, *б*) незначительно выросли потери света при прохождении зондирующего импульса, однако принципиальных отличий между рефлектограммами трасс до и после введения разветвителя нет и, следовательно, обнаружить оптический разветвитель, подключенный в пределах мертвой зоны, практически невозможно.

Одним из эффективных способов сокращения мертвой зоны рефлектометра является кепстральная обработка зондирующих сигналов.

Под кепстральной обработкой сигнала понимается обработка в соответствии с формулой [4]

$$C_s(q) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \ln [S(\omega)]^2 e^{i\omega q} d\omega, \quad (1)$$

где $S(\omega)$ — амплитудный спектр сигнала $s(t)$.

Кепстры мощности получили распространение при анализе сигналов, представляющих собой свертку двух функций времени, таких, что после преобразования $s(t)$ по алгоритму (1) образуются неперекрывающиеся на оси q импульсы. В этом случае фазовый спектр составных функций, образующих свертку сигналов $s_1(t)$ и $s_2(t)$, может не приниматься во внимание.

При решении задач контроля и диагностики ВОЛС на основе импульсного метода решается задача обработки сигналов, являющихся суммой исходного (зондирующего) сигнала и сигнала, отраженного от различных неоднородностей ВОЛС. При этом сигнал на входе устройства обработки можно представить в виде

$$s[m] = s_1[m] + \alpha s_1[m - m_0], \quad \alpha < 1, \quad (2)$$

где $s_1[m]$, $m = 0, 1, \dots, N - 1$, — дискретизованный зондирующий сигнал, представляющий собой последовательность отсчетов с шагом T ; $\alpha s_1[m - m_0]$ — отраженный сигнал, представляющий собой задержанную на время $t_0 = m_0 T$ копию исходного сигнала; α — коэффициент отражения.

Пусть исходному сигналу $s_1(m)$ соответствует z -преобразование $S_1(z)$. Тогда z -преобразование последовательности $\alpha s_1[m - m_0]$ будет $\alpha S_1(z)z^{-m_0}$, а суммарного сигнала $s(m)$ [4]

$$S(z) = S_1(z) + \alpha S_1(z)z^{-m_0} = S_1(z)(1 + \alpha z^{-m_0}) = S_1(z)S_2(z). \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что сигнал на входе устройства обработки $s[m]$, определяемый выражением (2), можно трактовать как свертку $s[m] = s_1[m] \otimes s_2[m]$, где $s_2[m]$ — сигнал, z -преобразование которого равно $1 + \alpha z^{-m_0}$. Таким сигналом является сумма двух дельта-функций: $s_2(t) = \delta(t) + \alpha \delta(t - m_0 T)$.

Таким образом, задача определения задержки отраженного сигнала в ВОЛС сводится к обработке свернутых сигналов. При этом множитель $S_2(z) = (1 + \alpha z^{-m_0})$ в выражении (3), учитывающий задержку отраженного сигнала $m_0 T$, и коэффициент отражения α от структуры спектра исходного сигнала не зависят. Выражение для кепстра мощности сигнала $s[m]$ имеет вид [4]

$$C_s[m] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \ln |S_1(e^{i\omega T})|^2 \cos(m\omega T) d\omega T + \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \ln |1 + \alpha e^{-im_0\omega T}|^2 \cos(m\omega T) d\omega T = C_{s1}[m] + C_{s2}[m]. \quad (4)$$

Как видно из выражения (4), информация о задержке t_0 содержится в кепстре $C_{s2}[m]$ (рис. 4). Истинная задержка определяется по положению первого пика. Кепстр $C_{s2}[m]$ наблюдается на фоне кепстра $C_{s1}[m]$ исходного сигнала, поэтому для надежного определения задержки t_0 требуется достаточное превышение $C_{s2}[m]$ над $C_{s1}[m]$, а также разнесение их на оси кепстрального времени mT . Кроме того, важно, чтобы кепстр $C_{s1}[m]$ концентрировался вблизи начала отсчета кепстрального времени. Степень выполнения этих требований зависит от структуры спектра $S_1(\omega)$ исходного сигнала $s_1(t)$.

Расчеты показывают [4], что, например, для длительности зондирующего импульса 5 мкс уже при $t_0 > 5T$ обеспечивается существенное превышение $C_{s2}[m]$ над $C_{s1}[m]$, что позволяет измерять весьма малые задержки даже при наличии помех. При этом минимальная измеряемая задержка t_0 составляет всего $\approx 5\%$ длительности импульса, что позволяет значительно сократить размер мертвой зоны, определяемый длительностью зондирующего импульса. Для реализации такого же разрешения путем укорочения зондирующего импульса его длительность должна быть не больше $\approx 0,25$ мкс.

На рис. 5, а приведен интерфейс программы, предназначенной для исследования возможностей кепстральной обработки в задачах контроля и диагностики ВОЛС. Программа моделирует прохождение зондирующего импульса по оптическому волокну, суммирует отраженный от неоднородности сигнал с исходным, затем суммарный сигнал подвергается кепстральной обработке.

На рис. 5, б показан вариант исходного сигнала в виде суммы зондирующего и отраженного от неоднородности ВОЛС импульсов (вверху), а также его кепстр (внизу). Как видно, кепстр позволяет довольно

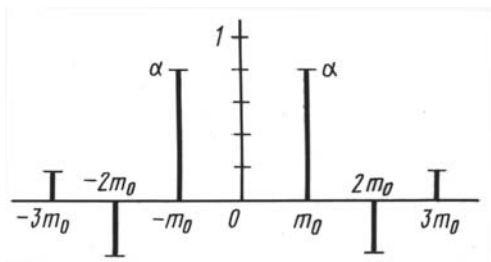


Рис. 4. Кепстр $C_{s2}[m]$

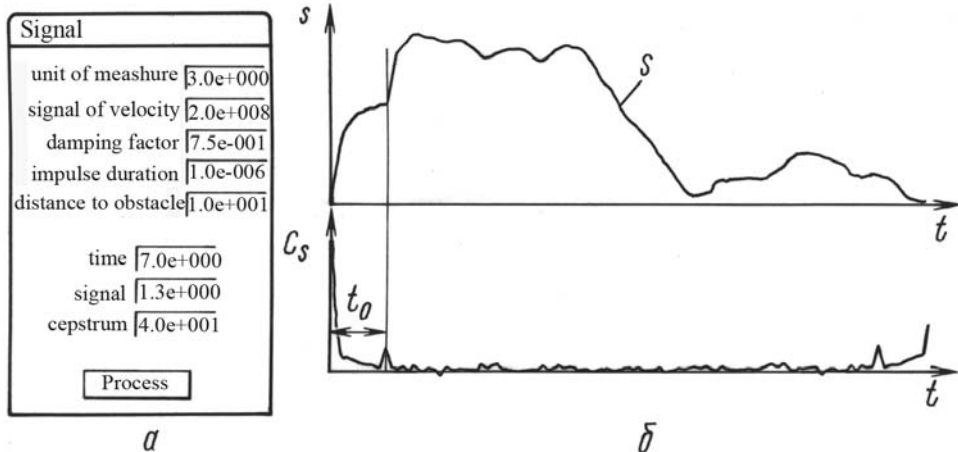


Рис. 5. Интерфейс программы кепстральной обработки (а), вариант исходного сигнала и его кепстр (б)

точно определить задержку t_0 отраженного сигнала и соответственно расположение неоднородности даже в том случае, если импульсы перекрываются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов С. Н. и др. О защите информации в волоконно-оптических системах // Вопр. защиты информации. – М.: ВИМИ, 1993. – № 1.
2. Соколов А. В., Степанюк О. М. Защита от компьютерного терроризма: Справ. пособ. – СПб.: ЮХВ-Петербург, Арлит, 2002.
3. Листвин А. В., Листвин В. Н. Рефлектометрия оптических волокон. – М.: ЛЕСАРпт, 2005.
4. Гоноровский И. С., Демин М. П. Радиотехнические цепи и сигналы: Учеб. пособ. для вузов. – М.: Радио и связь, 1994.

Статья поступила в редакцию 21.05.2007

Олег Анатольевич Акулов родился в 1966 г., окончил в 1989 г. ВИКИ им. А.Ф. Можайского. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Информационная безопасность” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных работ в области информационной безопасности и исследований систем обработки информации и управления.

O.A. Akulov (b. 1966) graduated from the Military Institute for Engineering and Space n. a. A.F. Mozhaikii in 1991. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Information Security” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 20 publications in the field of study and development of data security and study of systems of data processing and control.

Андрей Валерьевич Фурашов родился в 1978 г., окончил в 2001 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Старший преподаватель кафедры “Информационная безопасность” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 10 научных работ в области исследования и разработки защищенных систем автоматической обработки информации.

A.V. Furashov (b. 1978) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1989. Senior lecturer of “Information Security” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 10 publications in the field of study and development of protected systems of automated data processing.