光纤传送网物理层安全隐患与防护

主编　邓大鹏　林初善

西安电子科技大学出版社
http://www.xduph.com

光纤传送网物理层安全隐患与防护

主　编　邓大鹏　林初善
参　编　张引发　李　卫
　　杨　剑　解东宏
　　赵　峰　廖晓闽
　　李洪顺　冉金志

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书围绕光纤传送网物理层安全隐患与防护问题，按照光纤传送网的攻击与反攻击、窃听与防窃听、窃密与加密三条逻辑主线，系统全面地介绍了光纤、光缆的技术特性及针对光纤、光缆窃听和攻击技术，SDH 系统的一般原理及存在的安全隐患，DWDM 系统的基础知识、系统可能遭受的攻击及攻击效果，光缆线路窃听实现技术，基于长波长光信号法的光缆窃听监测技术，基于光干涉原理的光缆窃听监测技术和基于布里渊散射的光缆窃听监测技术，以及基于 A1、A2 字节和数据通信通道字节的 SDH 加密技术。

本书可供从事光通信技术研究及光传输系统开发、生产、维护、管理的人员参考，也可作为工程管理人员、网络运行维护人员的培训教材及高等院校光通信专业教师和学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

光纤传送网物理层安全隐患与防护/邓大鹏，林初善主编. —西安：西安电子科技大学出版社，2018.5

ISBN 978-7-5606-4909-2

Ⅰ.① 光… Ⅱ.① 邓… ② 林… Ⅲ.① 光纤网—网络安全—研究

Ⅳ.① TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 072394 号

策　　划　刘小莉

责任编辑　雷鸿俊

出版发行　西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电　　话　(029)88242885　88201467　　邮　　编　710071

网　　址　www.xduph.com　　电子邮箱　xdupfxb001@163.com

经　　销　新华书店

印刷单位　虎彩印艺股份有限公司

版　　次　2018 年 5 月第 1 版　2018 年 5 月第 1 次印刷

开　　本　787 毫米×1092 毫米　1/16　印张 10.5

字　　数　242 千字

定　　价　50.00 元

ISBN 978-7-5606-4909-2/TN

XDUP 5211001-1

前　言

光纤存在巨大的带宽资源和优异的传输性能，是实现长距离、大容量传输的理想传输媒质。经过30多年的技术发展，商用光通信系统的单波速率已从8 Mb/s增加到40 Gb/s，复用波数增加到几百波，在超长距离上实现了太比特/秒(Tb/s)容量级的信息传输。因此，光纤传送网名副其实地成为传输领域的主力军，无论在商用领域，还是在军事领域，都得到了最广泛的应用。然而，整个信息网络赖以生存的光纤传送网是否存在安全隐患？能否对抗恶意攻击和窃听？这是个值得深入研究的问题。

人们对无线信道的开放性早已具有安全共识，所以，无线通信网普遍采用了各种抗干扰手段和保密措施。然而，光纤传送网的安全问题，尤其是物理层的安全还没有引起高度重视，人们习惯认同光纤通信具有保密性好、抗干扰能力强等教科书上的观点。事实上，光纤传送网物理层也是不安全的。无论是光纤、光缆、光通信器件，还是SDH、DWDM系统，都可能被恶意攻击者或窃听者利用，从而造成数据信息被截取、被攻击、被窃听的严重后果。因此，对光纤传送网物理层安全问题的研究将有助于推进国家信息网络的规划、设计和优化，有助于保障国家信息安全。

本书围绕光纤传送网物理层安全隐患与防护问题，密切跟踪国外研究现状，是编者们多年对光纤传送网物理层安全研究成果的总结，按照光纤传送网的攻击与反攻击、窃听与防窃听、窃密与加密三条逻辑主线，有机结合相关理论、仿真和试验，系统全面地介绍了光纤、光缆、光器件、SDH系统及DWDM系统存在的安全隐患，以及窃听的监测技术、高速SDH信号的加密技术等安全防护措施。全书共七章。第一章介绍了光纤通信系统的基本组成、物理层的安全特点及常见的攻击类型。第二章介绍了光纤、光缆的有关物理特性，以及利用这些特性实施光纤光缆攻击、窃听的方法。第三章介绍了掺铒光纤放大器和喇曼光纤放大器的工作原理、结构、性能、系统应用及优缺点，重点分析了光放大器存在的安全隐患。第四章介绍了SDH系统的一般原理及存在的安全隐患。第五章介绍了DWDM系统的基础知识、系统可能遭受的攻击，并对DWDM系统进行了攻击实验，主要包括：不同攻击信号源、不同攻击位置的攻击有效性实验和不同光通道配置的抗攻击实验。第六章介绍了光缆线路窃听实现技术、基于长波长光信号法的光缆窃听监测技术、基于光干涉原理的光缆窃听监测技术和基于布里渊散射的光缆窃听监测技术。第七章介绍了针对A1、A2字节和数据通信通道字节的SDH加密技术、加密模型和加密实施方案。

本书由国防科技大学信息通信学院光通信实验室光网络物理层安全隐患研究小组的邓大鹏教授、张引发教授、李卫教授、杨剑副教授、解东宏教授、冉金志副教授、赵峰讲师、林初善讲师、廖晓闽讲师、李洪顺助教等编写，由邓大鹏教授统稿。在本书的编写过程中，得到了国防科技大学信息通信学院各级领导、国防科技大学信息通信学院科研部门的大力

支持和帮助，在此表示衷心的感谢；感谢国防科技大学通信学院参与系列课题研究的研究生们；同时感谢本书所引用的所有参考文献的作者们，是他们的研究给了我们启迪和指导。

光纤传送网物理层安全问题在国内尚属新的研究领域，书中观点只代表我们的研究结果。编者们水平有限，难免有疏漏和不当之处，欢迎同行交流讨论，恳请专家和读者批评指正。

编　者

2018 年 2 月

目录 contents

第一章 概 述

1.1 光纤通信系统物理层的安全形势

1.1.1 光纤通信系统物理层安全研究的必要性

我国光纤通信传送网经过了近 20 年的高速建设，目前已经形成了一个以 SDH、DWDM 和 ASON 技术为主体的光缆骨干网络，已能够为我国的各行各业提供足够大的带宽能力，成为我国信息化建设的基础平台，为各种用户需求提供不同速率的透明传输通道。但是，我国信息化建设，特别是像军事信息、国家安全信息赖以生存的光纤通信传送网是否真的安全？能否对抗恶意或敌意的攻击？

目前，有关通信系统安全问题的研究主要集中在网络层(IP 层)和传输链路层(MAC 层)，采用数据加密和用户认证等技术，但密码学并不总是合适的。虽然数据加密和用户认证等方法对敏感信息提供了一种有效的安全手段，但它们不能防止恶意用户的欺骗性干扰，不能防止物理层的窃听，也不能防止恶意用户对发送数据的收集和流量统计。例如，通过对用户发送数据的收集，就可以知道谁在通话、进行了多长时间，尽管暂时不知道他们正在说什么，但有时这已经够了。而且通过提高计算能力和有效的算法，最终是可以破译这些数据的。对于光纤通信系统，有时用很低廉的成本和技术手段就能够进行业务破坏，例如割断光缆，这不需要多少技术知识，实施破坏的成本很低，并且这是一种非常有效便捷的攻击手段。根据美国 Network Reliability Steering 委员会从 1992 年 7 月到 1997 年 7 月 5 年的统计发现，光纤通信设施的平均故障时间是 435 分钟。但对一个经过精心计划的破坏来说，故障时间要远远大于 435 分钟。中断几个小时对一个普通电话用户来说可能只是觉得不方便，但对于发送时间敏感信息的用户来说后果可能相当严重。而且，这种攻击如果发生在重要地域或具有重要政治意义事件的时刻，其威胁程度就很难估计了。

因此，研究光纤通信传送网的安全问题，不仅需要研究属于密码学范畴的语义安全问题和接入安全问题，还要研究其物理层方面的安全问题。

但是，光网络物理层的安全目前还没有引起足够的重视，在认识上有一定的误区。人们已习惯认为光纤通信具有保密性好、抗干扰能力强等一般教科书上罗列的观点，所以网络安全的研究主要集中在网络协议和计算机操作系统的防护以及计算机用户行为与加密技术等方面。

1.1.2 光纤通信系统物理层安全的特点

与传统的通信系统相比，光纤通信系统的物理层安全问题具有其特殊性，这是由于光纤通信系统的物理层在原理上与电网络的物理层有很大不同，其安全性能与结构密切相关。

(1) 光纤通信系统工作的可靠性很大程度上依赖于光管理网。虽然在计算机网络中有许多相应的安全机制，如密钥机制、数字签名机制、认证机制和加密机制等多种接入访问控制措施，但目前的光纤通信系统建设中对系统管理信息的传输并没有引入多少安全访问控制措施，而且由于 SDH 管理网采用 ECC 嵌入通道的传输方式，再加上 SDH 采用 STM 的标准信号格式，造成了光纤通信传送网网络管理信息的易受攻击性。同时，管理系统仅依靠用户口令的接入控制方式是无法阻止恶意用户从内部对网络进行破坏的。

(2) DWDM 网络对数据速率、数据格式、QoS 需求等方面具有一定的透明性。光纤通信系统的透明性在改善网络性能的同时，也给网络的安全带来了一定的隐患，因为网络的透明性对于攻击者的攻击信号同样透明。目前，在光纤通信传送网中已经形成了多个透明传输岛，有些地方透明传输跨度达到 1500 多千米，光纤通信系统中信息的透明传输会使失真累积，也会使攻击的破坏效果累积。

(3) DWDM 网络使用了许多波长，目前商用系统大部分为每根光纤 80～160 个波长，多波长之间容易发生相互干扰。攻击者可以利用信道间的串扰作为攻击信号，达到业务欺骗性破坏或窃听的目的。

(4) 光纤通信系统的传输数据速率很高，目前一般在几十吉比特/秒到太比特/秒，任何一个很小的中断时间都会引起大量数据的丢失或延迟，造成对许多用户通信的严重破坏。

(5) 尽管光纤通信系统传输的敏感信息可能已经采取了各种安全措施，如数据加密、数字签名等，但由于光物理层本身的不安全性，传输信息仍然可能遭到恶意用户的干扰、窃听以及对发送数据的收集。而且对高速数据的加密技术，目前尚无公认的较好实现方法。

因此，在光纤通信传送网已成为我国信息基础平台的今天，对光纤通信传送网的安全问题的研究已显得十分紧迫，对光纤通信系统物理层安全的研究，将直接关系到今后光纤通信传送网的建设、管理和维护。

1.2 光纤通信系统的基本组成

目前，实用光纤通信系统组成框图如图 1.1 所示。

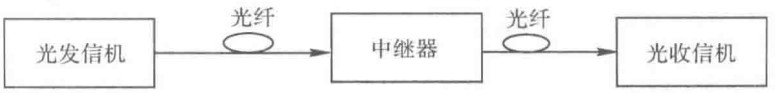

图 1.1 光纤通信系统的组成

从图 1.1 中可以看出，光纤通信系统由以下四个基本部分组成：

(1) 光发信机。光发信机是实现电/光转换的光端机，由光源、驱动器和调制器组成。其功能是用来自于电端机的电信号对光源发出的光波进行调制，成为已调光波后再将光信号耦合到光纤中去传输。电端机就是常规的电子通信设备。

(2) 光收信机。光收信机是实现光/电转换的光端机，由光检测器和光放大器组成。其功能是将光纤或光缆送来的光信号，经光检测器转变为电信号，然后，再将这微弱的电信号经放大电路放大到足够的电平，送到接收端的电端机。

(3) 光纤。光纤为光信号的传输媒介，构成光的传输通路。其功能是将发信端发出的已调光信号，经过光纤光缆的远距离传输后，耦合到收信端的光检测器上，完成传送信息的任务。目前我国光缆线路上使用的主要是 G.652 光纤和 G.655 光纤。

(4) 中继器。目前，中继器主要有两种。第一种是电中继器，主要由光检测器、光源和判决再生电路组成，它的作用有两个：一个是补偿光信号在光纤中传输时受到的衰减；另一个是对波形失真的脉冲进行修正，再生出规则的脉冲，以延长中继距离。第二种是光放大器，常用的有 EDFA 光放大器，它直接对光信号进行放大，以延长中继距离，但是光放大器在放大光信号的同时，会引入噪声，并且噪声有积累效应，因此，实际应用中，光放大器不能级联太多。

由于受光纤拉制工艺和光缆线路施工条件的限制，实际应用中光纤的拉制长度是有限度的，所以一条光缆线路就存在多根光纤相连接的问题，同时还存在着光纤与光端机的连接和耦合问题。因此，一个实用的光纤通信系统还不可避免地用到光纤连接器、耦合器等无源器件。

按照目前光端机所使用的技术和用途，光纤通信设备可以分为 SDH 设备、DWDM 设备以及数字交叉连接设备(DXC)。对于系统中的各个终端，不论是 SDH 复用终端设备(TM)、分插复用设备(ADM)、数字交叉连接设备(DXC)还是波分复用设备(DWDM)，其功能都是由各种基本的组件通过适当组合来构成的。所以，研究光纤通信系统的安全性能，也就可以从系统组件的安全性能开始。光纤通信系统的主要组件及其功能如表 1.1 所示，表中所列的光器件都有可能遭到某些方式的攻击。例如，目前大多数的光器件中存在着信道串扰，光信号可以从设备的某一组成部分泄漏到另外一部分。这样，串扰就具有被攻击者用来实现监听攻击或服务拒绝攻击的可能性。

表 1.1 光纤通信系统主要组件及其功能

器 件	用 途	举 例
光耦合器	将多路光输入耦合成一路光输出	合波器
分光器	将一路光输入分成多路光输出	星型耦合器
复用器/解复用器	完成多个波长信号的耦合/分离	DWDM
光放大器	提高输入信号的强度	EDFA
光开关	转换光路，实现光信号的交换	光开关
激光器	产生信号的载波	LED、LD
光接收器	接收光信号	PINP、APD
光纤及光缆	光信号的传输体	多模、单模

1.3 光纤通信系统的安全特征

SDH 或 DWDM 网络的结构通常可以分为光终端(用户网络接口)、网络节点(主要实现交叉连接、复用和解复用等功能)、光放大链路以及相关的网络管理与控制系统等。网络拓扑结构主要有线型、星型、环型和网状等，目前最常用的拓扑结构是星型结构、环型结构和网状结构。

就光网络的结构安全性来说，网络的安全缺陷主要与网络的生存性有关。网络生存性泛指网络遭受各种故障或攻击时仍能维持可接受的业务质量的能力。网络生存性策略包括恢复技术、控制管理技术等。恢复技术包括保护切换、重选路由、自愈等。通常将恢复技术统称为自愈技术。自愈技术的性能有：恢复率、恢复时间、冗余度(常指空闲容量率)、开销及复杂度等。对于光纤通信系统安全管理最基本的原则就是保护、探测以及探测到攻击以后的控制与恢复。

完善的性能监测和保护、恢复算法是实现光网络高生存性的保证。而目前的 SDH、DWDM 光传送网缺乏一整套保护与恢复策略。因此当链路或节点遭到攻击而失效时，网络无法自动启用高效的重新选择路由算法，来广泛调用网络中的任何可用容量以恢复业务和定位攻击位置及攻击类型。

就光纤通信系统安全性来说，安全缺陷主要与攻击信号干扰和设备的串扰有关。利用攻击信号的干扰可以衰减 QoS 或服务拒绝。而设备串扰普遍存在于目前的一些光器件中。光信号可以从设备的一部分泄漏到另外一部分，这样串扰也就可以用来拒绝服务或实现监听攻击。

1.4 光纤通信系统物理层攻击

在光纤通信系统中，攻击主要与强信号干扰、光网络组件的非线性或串扰等有关。攻击信号可以利用光网络组件的非线性、串扰或网络结构的不安全性来劣化系统服务质量(QoS)，甚至是造成服务拒绝。

信息安全主要指的是网络上可用的信息和服务不让非法用户访问、窃取、转移和破坏，包括保证数据的完整性，不允许非法访问网络资源，不允许非法监听或探测，不允许业务中断，等等。

根据恶意用户攻击方式和对系统造成影响的不同，可以把对光网络的攻击分为两类：一类称为服务破坏(Service Disruption，SD)攻击，恶意用户通过在用户终端模块、交换路由模块、放大链路模块以及传输链路等多个网络环节加入大功率恶意攻击信号，以至于瓦解整个通信系统，使整个网络瘫痪，让通信无法正常进行；另一类攻击称为窃听攻击，恶意用户可以通过放大链路模块、交换路由模块以及传输链路等网络环节，提取传输信号的信息，达到窃取信息的目的。相对于 SD 攻击，窃听攻击更具有隐蔽性，恶意用户可以伪装成合法授权用户，让网络管理系统无法及时察觉。DWDM 光网络的最大特点是信号在

光层上透明传输，这大大提高了网络的灵活性，但在安全性能上也带来了更大的隐患。例如，放大链路模块和交换路由模块对信号都不再识别，对恶意攻击信号和有用信号同样放大、交换及传送，相比于传统通信网络，这将给整个网络带来更大的破坏。

考虑到实现的可能性，对于光网络设备的特殊影响和与传统网络攻击方式的不同等方面因素，根据攻击实现的不同，可以将攻击方法划分为三种，如表 1.2 所示。在表 1.1 中所列出的光网络的每一组件都可以被表 1.2 中所列的方法进行攻击。

表 1.2 光网络攻击方法

攻击方法	所属类型	实 现 途 径
带内干扰	服务破坏	攻击者注入专门设计的信号来破坏接收器正确处理接收数据的能力
带外干扰	服务破坏	攻击者通过利用泄漏组件或交叉调制效应降低通信信号功率
非法探测	监 听	攻击者监听相邻信道，通过共享介质泄漏的串扰来得到相邻信息

1.4.1 带内干扰攻击

带内干扰是一种服务破坏类攻击，攻击者可能注入与正常通带内的波长相同的干扰信号来破坏接收器正确处理接收数据的能力。假如攻击者在某一光链路注入高功率的干扰光信号，该攻击有可能破坏该链路上的有效信号。而且由于光网络所用光器件(DWDM、EDFA 等)的透明性，攻击不但可以衰减该链路上的信号，而且可以衰减连接到此节点的其他链路上的信号。如图 1.2 所示的光网络，若在节点 5 和节点 2 的链路中间的某一点遭到攻击，这将不但影响到攻击信号首先到达的节点 2，而且影响到与节点 2 相连的节点 1 和节点 3，可以被攻击的组件包括合/分波器、复用/解复用器和光放大器，在节点 1 的功率检测将会错误地认为问题是由于在节点 1 和节点 2 之间的链路上遭到攻击造成的。这种攻击可以很廉价地实现，而且很隐蔽，主要针对个别用户。目前的探测方法不能正确地定位攻击点。

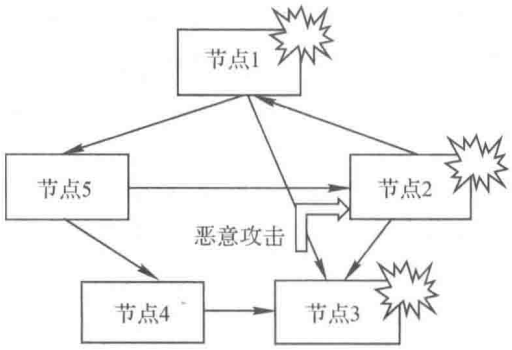

图 1.2 通道带宽内攻击

1.4.2 带外干扰攻击

带外干扰也是一种服务破坏类攻击，攻击者通过利用光器件的串扰或光放大器内的交叉调制效应来减少传输信号功率或流量，实现攻击。攻击者可能注入不同于正常通带内波长的带外高功率信号，但却位于放大器的通带内。如目前光网络中常用的光放大器EDFA，其不能辨别攻击信号和带内的网络传输信号，从而会不加区分地把有限的能量增益提供给所有通过的信号。再如，由于EDFA具有增益竞争的特点，即通过EDFA的所有信号共同分享Er^{3+}离子的放大，强功率光信号所获得的光子要大于弱功率光信号所获得的光子，于是放大器提供给攻击信号的那些光子既争夺用于正常通信信号的增益，又增加了自身的功率，并对下游的透明节点实施更强的攻击。对于光纤放大器进行带外干扰攻击示例如图1.3所示。

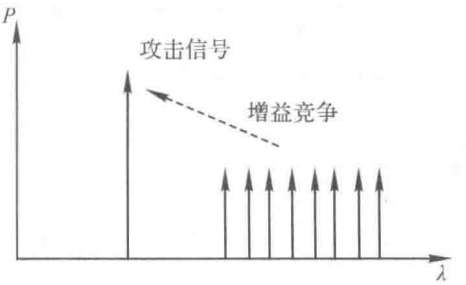

图1.3 对光纤放大器进行带外攻击

1.4.3 非法观测攻击

非法观测是一种监听类攻击，恶意攻击用户通过共享资源伪装成合法授权用户，通过光网络组件存在信道串扰的缺陷来非法窃听或者干扰通信。这种攻击在网络中很多地方都可以实现，但最常发生在光交换模块中。下面讨论它的三种主要攻击方式。

1. 利用光纤串扰

光纤是一种理想的传输媒质，与同轴电缆等传输媒质不同，正常工作情况下光纤电磁辐射非常小。但下面几种情况会破坏光纤的这种传输特性：

(1) 裸露的光纤对攻击者来说没有安全性。通过物理上接入或割断，业务很容易被观测或破坏。

(2) 轻微地弯曲光纤，可以使光辐射进光纤或使光纤中的光辐射出来。因此，不需要中断或其他破坏光纤的方法，采用相关的技术就可以实施非法观测或带内干扰攻击，而且这种方法比较隐蔽，较难定位。

(3) 在输入光信号较强(如光放大器的输出端)或传输距离较长的情况下，光纤中存在某种非线性效应，引起不同波长间的相互作用。例如，通过交叉相位调制和喇曼增益效应，在光纤中的不同波长之间产生串音，此串音可以被用来进行窃听或带外干扰攻击。

2. 利用组件串扰

在 DWDM 光网络中，解复用器是网络中的主要器件，其作用是将从一根光纤中接收到的信号按照不同的波长分解到不同的物理路径，但是信号之间的串扰可以让其中的一小部分泄漏到其他的路径。这部分泄漏的信号足以让攻击者检测到它的存在，很有可能从流量中恢复出一部分数据。目前网络节点中的解复用器一般的串扰水平为 0.03%～1.0%，存在被监听的威胁。串扰水平一般要求小于 0.03%，才可以有效降低通过串扰监听的威胁性。

非法串扰攻击的简单示意如图 1.4 所示。信道 1 中的用户 1 信号通过交换模块应该只发送到信道 3 中，用户 2 信号通过交换模块应该发送到信道 4 中，但由于交换模块输入端的解复用器存在串扰，在信号交换的过程中将部分用户 1 的信号串扰到用户 2 中，随着用户 2 的路由，通过放大器的放大，和用户 2 的信号同时传送到了信道 4 中，于是在信道 4 中就存在用户 1 的信号，这为恶意窃听创造了一个入侵点。

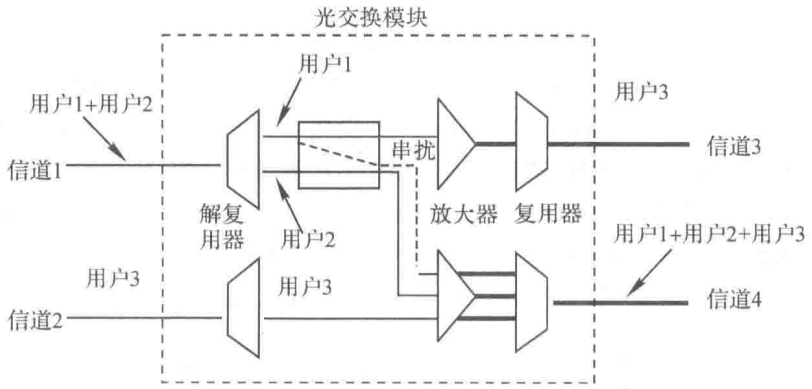

图 1.4 非法串扰攻击

3. 利用光放大器的缺陷

EDFA 提供给单一通道的增益是所有通过放大器信号幅度总和的函数。这意味着一起传输的信号经历着微小的基于相邻通道存在的幅度调制。攻击者可以利用这种轻微的调制在相邻的通道恢复想要观测的信号，实现对光放大器的攻击。

第二章 光纤和光缆的安全

2.1 光纤工作原理

2.1.1 光纤的结构

光纤就是用来导光的透明介质纤维，一根实用化的光纤是由多层透明介质构成的，一般可以分为三个部分：折射率较高的纤芯、折射率较低的包层和外面的涂覆层，如图 2.1 所示。纤芯是由高度透明的材料制成的；包层的折射率略小于纤芯，从而造成一种光波导效应，使大部分的光波被束缚在纤芯中传输；涂覆层的作用是保护光纤不受水汽的侵蚀和机械擦伤，同时增加光纤的柔韧性，它不用来导光，可以染成各种颜色。

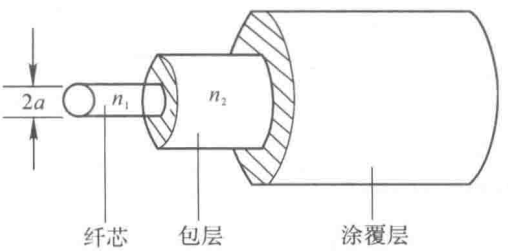

图 2.1 光纤结构示意图

为了满足不同的导光要求，包层有的是单层，有的是多层。涂覆层一般分为一次涂覆层和二次涂覆层，二次涂覆层是在一次涂覆层的外面涂上一层热塑材料，故又称为套塑。现在通信用光纤包层直径一般为 125 μm。纤芯的粗细、纤芯材料的折射率分布和包层材料的折射率分布，对光纤特性起着决定性的作用。包层材料通常是均匀材料，折射率为常数；如有多层包层，则各包层的折射率不同(如 W 型光纤)。

2.1.2 光纤的导光原理

一束光线从光纤的入射端面耦合进光纤时，光纤中光线的传播分两种情形：一种情形是光线始终在一个包含光纤中心轴线的平面内传播，并且一个传播周期与光纤轴线相交两次，这种光线称为子午射线，那个包含光纤轴线的固定平面称为子午面；另一种情形是光线在传播过程中不在一个固定的平面内，并且不与光纤的轴线相交，这种光线称为斜

射线。

1. 子午射线在阶跃型光纤中的传播

阶跃型光纤是由半径为 a、折射率为常数 n_1 的纤芯和折射率为常数 n_2 的包层组成的，并且 $n_1>n_2$，如图 2.2 所示。

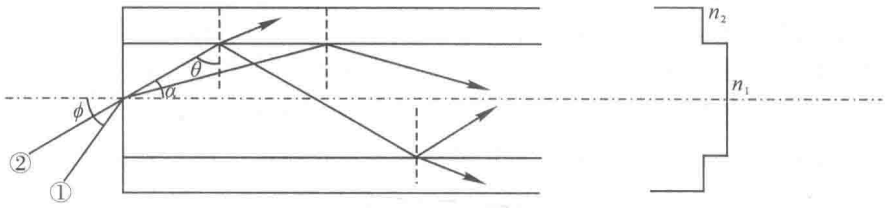

图 2.2　光线在阶跃型光纤中的传播

对于光线①，它是以 ϕ 角从空气($n=1$)中入射到光纤的端面，将有一部分光射入纤芯，此时 $1\cdot\sin\phi=n_1\sin\alpha$。由于 $n_1>1$，则折射角 $\alpha<\phi$。光线继续以 $\theta=(90^\circ-\alpha)$角入射到纤芯和包层的分界面上，如果 θ 角小于芯包界面的临界角 $\theta_c=\arcsin(n_1/n_2)$，则一部分光线折射进包层而损耗掉，另一部分反射回纤芯。如此这条光线经几次反射和折射后，很快就损耗掉了。如果 ϕ 角减小，如光线②所示，则 α 也随之减小，$\theta=(90^\circ-\alpha)$角就相应增大。如果 θ 增大到略大于芯包界面的临界角 θ_c，则此光线在芯包界面产生全反射，能量全部反射回纤芯，当它继续传播再次遇到芯包界面时，再次发生全反射。如此反复，光线从一端沿着折线就传输到另一端。下面来分析 ϕ 角小到多少才能将光线由光纤的一端传到另一端。

假设 $\phi=\phi_0$ 时，$\theta=\theta_c$，$\alpha=\alpha_0$，则

$$\begin{aligned}1\cdot\sin\phi_0&=n_1\sin\alpha_0=n_1\sin(90^\circ-\theta_c)\\&=n_1\sqrt{1-\sin^2\theta_c}\\&=\sqrt{n_1^2-n_2^2}\\&=n_1\sqrt{2\Delta}\end{aligned}\tag{2.1}$$

式中：Δ 称为光纤的相对折射率差。

$$\Delta=\frac{n_1^2-n_2^2}{2n_1^2}\tag{2.2}$$

$\sin\phi_0$ 称为光纤的数值孔径，一般用英文缩写 NA(Numerical Aperture)表示，ϕ_0 称为光纤的数值孔径角。

$$\mathrm{NA}=\sin\phi_0=n_1\sqrt{2\Delta}\tag{2.3}$$

数值孔径表示光纤的集光能力，即凡是入射到圆锥角 ϕ_0 以内的所有光线都可以满足全反射条件，在芯包界面上发生全反射，从而将光线束缚在纤芯中沿轴向传播。由式(2.3)可见，光纤的数值孔径与光纤相对折射率差的平方根成正比，即光纤纤芯和包层的折射率相差越大，则光纤的数值孔径越大，其集光能力越强。

2. 子午射线在渐变型光纤中的传播

渐变型光纤与阶跃型光纤的区别在于其纤芯的折射率不是常数，而是随半径的增加而递减直到等于包层的折射率。要分析渐变型光纤中光线的传播，我们可以采用与数学中