

王廷尧 编著

无线光接入技术 进展和应用



科学出版社
www.sciencep.com

无线光接入技术进展和应用

王廷尧 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍无线光接入技术,全书共分12章。首先扼要地介绍了无线光通信的基本概念及其在各类通信网络中的应用,接着讨论了无线光接入技术及其实际网络工程,特别介绍了将OTDM、WDM、OCDM及自动纠错编码等技术应用于无线光接入网中的进展情况。此外,书中还介绍了中微子通信、量子光通信等尖端技术应用于用户接入网的美好前景及下一代网络等研究情况。

本书可供光通信及接入网领域的工程技术人员和相关专业的高等院校师生参考阅读,也可作为工程设计院、通信研究院和工程公司有关技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

无线光接入技术进展和应用/王廷尧编著. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-024278-5

I. 无… II. 王… III. 无线电通信:光纤通信-接入网 IV. TN915.63

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第039728号

责任编辑:孙 芳 王志欣 / 责任校对:朱光光
责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年4月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2009年4月第一次印刷 印张:29

印数:1—3 000 字数:568 000

定价:72.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

前 言

无线光通信 (wireless optical communication, WOC) 或称自由空间光通信 (free space optical communication, FSO) 是一种新崛起的在世界上可与光纤通信形成鼎足之势并潜力巨大的通信方式。光纤通信受到光纤性能的约束, 具有只适合于固定通信、工作波段仅限于光纤允许传输的光波部分和价格比较昂贵等诸多局限性。而无线光通信具有经济、灵活等优越性, 且无线光通信技术发展迅猛, 使得 21 世纪将成为无线光通信大展宏图的辉煌时代。这不仅表现在地球上无线光通信网络的迅速形成, 而且也表现在近空 (卫星通信) 和深空通信的领域中, 甚至于无线光通信将成为人类遨游太空的主要通信方式。无线光通信可逐步地将其地面上的各种干线网、城域网和用户接入网采用的通信技术融为一体, 甚至可包括卫星之间和卫星与地面之间的通信。

在 2000 年悉尼奥运会上, Terabeam 公司成功地使用无线光通信设备进行图像传送, 并在西雅图的四季饭店圆满地实现了利用无线光通信设备向客户提供 100Mbit/s 的数据连接, 该公司已在全美国超过 100 个城市建设了无线光通信网络。在震惊中外的“9·11 事件”中, 美国世贸中心被摧毁, 其对外的一切通信被中断。但是, 在世贸中心受到袭击的第一时间, 纽约州联合法院系统选择了无线光通信技术, 在双塔倒塌后不到一周的时间内, 三个无线光通信系统迅速恢复了通向曼哈顿法院的通信业务。这一重大创举使得采用无线光通信技术的无线光接入网受到世界青睐, 成为当今科技和工程技术领域研究和关注的热点。如今, 美国几乎 90% 的办公大楼与电信业务提供商之间不再使用光纤连接, 而是采用无线光通信技术。在国外, 无线光接入网已成为一种时尚, 许多电信运营商及各行业的专业网络运营管理者都将其推广应用于商业服务中。

在近空和深空通信中, 无线激光通信将成为未来通信的主要主宰者, 其将解决星际间微波通信带来的通信瓶颈问题, 成为星际间通信的最佳方案之一。在近空通信中, 近期取得的突破性进展可表现在两方面: 一方面, 以激光为信息载体、以人造卫星为中继站转发激光信号的无线激光通信将作为近期实现在多个航天器之间以及航天器与地球站之间的通信手段; 另一方面, 不但成功地实现了卫星—地面、卫星—卫星之间的无线光通信实验, 而且正在进入实用化阶段。

在我国,早在2001年,清华同方研究发展中心就成立了“FSO通信技术跟踪研究小组”,并推出了无线光通信产品TFOW100-1,完成了1000m点到点通信样机的检测。此外,在各通信研究单位和大专院校纷纷成立了有关的专门研究机构,推进无线光接入技术的研究和工程应用。众所周知,我国有着宏伟的近空和深空通信蓝图,其征服月球的计划正在分步实施中。一些科研院所也正在考虑卫星—地面、卫星—卫星之间光通信的可行性方案。

目前,国内外关于无线光通信及其接入技术进展和应用方面的文章种类繁多,但由于篇幅所限,都只能从某个侧面作介绍,而不可能系统、全面地进行描述。在国内,还没有关于无线光接入技术领域方面的著作。为此,作者编著此书,向读者系统、全面地介绍无线光通信和无线光接入技术的各个方面,借以为我国无线光通信技术,特别是无线光接入网的发展提供支持。本书是作者在长期从事光通信技术、设备和系统工程的研究、试制与生产的基础上,翻阅大量国内外最新科技资料,结合作者创造性的科学实践编写而成。值得欣慰的是,其中部分技术已应用于工程设备中,并在捍卫祖国安全的斗争中发挥了作用。能把这部分写入书中,不但可为读者提供从实践得来的珍贵知识,而且对于作者本人也是一种精神安慰。

本书是反映当今无线光通信和其接入技术进展及在工程技术领域中应用的基础读物,特点是:① 简捷、系统地介绍了发展中的无线光通信技术,特别是以通俗易懂的方式介绍了无线光通信技术的基础理论。② 实用性,书中描述了无线光接入网的工程设计与施工验收技术程序。③ 融入了国内外关于无线光通信和无线光接入网相关的最新技术成就及最新标准规范。例如,光时分复用(optical time division multiplexing, OTDM)、光码分复用(optical code division multiplexing, OCDM)、波分复用(wavelength division multiplexing, WDM)和自动纠误编码技术在无线光接入网中的应用,因其具有安装简便、高带宽(可达10Gbit/s)、灵活(容易缩放)、适用于任何环境等优越性,使其具有了足够大的应用空间和极为广阔的发展前景。书中还讨论了用户接入网技术到下一代网络(next generation network, NGN)的融合,这将为克服用户接入网在通信网中面临的带宽瓶颈效应、为正在建设和将来建设的用户接入网提供充分的带宽保证。此外,书中还介绍了颇受关注的中微子通信,尤其是量子光通信尖端技术应用于用户接入网的美好前景及下一代网络和家庭网络(home network)的研究情况等。

书中反映了无线光通信技术在通信工程中的应用，特别是应用于无线光接入技术领域的最新成就和国内外最新公布的标准。主要内容包括无线光通信及其接入网基本工作原理、典型系统工程、网络组成与管理等，共分 12 章，并在附录中列入了无线光通信方面的“英汉缩略语对照”供读者查阅。

本书在编写过程中得到南开大学博士生导师董孝义教授、天津大学博士生导师李世忱教授等的热情关怀和支持。此外，还得到天津大学贾东方博士、天津光电捷通通信技术有限公司张同友总经理、天津欧迈光纤通信设备有限公司冯建春总经理、天津光电集团有限公司杨晓波总工程师、天津津泰电子有限公司籍生才董事长等的全力支持，在此一并致谢！

参加本书编写工作的还有许书云、马秀荣、王燊、柏嫫、王奕、周剑波、胡范春、李丽津、王艳芬等，对此，也表示深切的谢意！

由于时间仓促和作者水平有限，书中难免存在不妥之处，敬请读者批评指正。

作 者

2009 年 1 月于天津光电集团有限公司

目 录

前言

第 1 章 无线光通信的基本概念	1
1.1 什么是无线光通信	1
1.2 无线光通信分类	2
1.3 无线光通信的发展简史.....	14
1.4 无线光通信的工作频段.....	15
1.5 大气传输介质的传光性质.....	21
1.6 与光纤传送系统的相似之处.....	29
第 2 章 无线光通信系统组成及主要性能	30
2.1 无线光通信系统的组成.....	30
2.2 一般光通信的传输参考模型和性能要求.....	41
2.3 一般光通信数据网的传输性能参数.....	49
2.4 无线光通信系统的主要性能.....	51
2.5 网络的拓扑结构.....	62
2.6 用于无线光通信的 MAC 协议	66
2.7 无线光通信系统中使用的元器件和网元设备.....	74
第 3 章 无线光通信系统采用的关键技术	83
3.1 无线光用户接入网收发端光束快速准确的 ATP 技术	83
3.2 适应大气信道,减少气候对通信系统的影响.....	86
3.3 发送端采用的高发射功率光源及高码率调制技术.....	88
3.4 接收端采用的高灵敏度光信号接收技术和抗干扰性能.....	91
3.5 发射和接收天线的选择.....	92
3.6 传输距离与信号质量.....	94
3.7 光纤通信技术的应用.....	95
3.8 安全保密新技术.....	95
3.9 无线光通信面临的巨大挑战.....	96
第 4 章 无线光通信系统的优越性	97
4.1 无线光通信接入技术与其他通信接入技术的比较.....	97
4.2 无线光通信系统的优越性	110
4.3 无线光用户接入网有待改进的问题	116

4.4	更先进的通信途径	122
第5章	无线光通信技术在各类网络中的应用	151
5.1	无线光通信的几类典型网络	151
5.2	地面上的无线光通信网络	152
5.3	基于网格技术的无线光通信网络的基本概念	157
5.4	基于网格网络的无线光用户接入网	167
5.5	基于网格网络的混合网	175
5.6	大气湍流通道与 RF 分集的无线光接入网技术	180
5.7	使用 MEMS 自适应光学校正器的无线光通信	185
5.8	海上环境中工作波长为 1550nm 的多量子阱调制反射镜无线光链路	188
5.9	无线光通信多输入多输出系统的性能分析	195
5.10	Gbit/s 量级的高速无线光通信	197
5.11	大容量室内无线光局域网结构	205
5.12	Molex Canobeam 无线光通信系统概况	209
第6章	移动无线光通信技术及其在星际通信中的应用	211
6.1	移动无线光通信技术的概念	211
6.2	移动无线光通信技术在星际通信中的应用	221
6.3	星际微波通信系统	223
6.4	星际光通信的概念	227
6.5	星际光通信的系统组成	227
6.6	星际光通信系统的主要性能指标	230
6.7	星际光通信系统的优越性	234
6.8	星际光通信系统的关键技术	235
6.9	卫星光通信与微波通信的转换方法	238
6.10	星际光通信发展现状	239
6.11	星际光通信的美好前景	242
第7章	无线光用户接入网的基本概念	244
7.1	用户接入网的概貌	244
7.2	光用户接入网	269
7.3	无线光用户接入网的基本概念	272
第8章	复用技术在无线光接入网中的应用	280
8.1	复用光通信的概念	280
8.2	WDM 技术在无线光接入网中的应用	286
8.3	OTDM 技术在无线光接入网中的应用	314

8.4	OCDM 技术在无线光接入网中的应用	323
第 9 章	纠错码在无线光用户接入网中的应用	341
9.1	概述	341
9.2	纠错编码的基本概念	341
9.3	纠错编码在无线光用户接入网中的应用	348
第 10 章	无线光用户接入网的相关标准	356
10.1	IEEE 802.11 和其他无线局域网标准	356
10.2	IEEE 802.15 网格网络标准	366
10.3	IEEE 802.16 网格网络标准	367
10.4	IEEE 802.20 移动宽带无线接入新技术标准	370
10.5	使用算法设计的自由空间模型	375
第 11 章	无线光用户接入网的建设与管理	378
11.1	无线光用户接入网采用的供电系统	379
11.2	无线光用户接入网工程中的测量技术	395
11.3	无线光用户接入网的工程设计	405
11.4	用户接入网的工程施工	412
11.5	无线光用户接入网的系统管理与维护	417
第 12 章	无线光用户接入网的发展前景	424
12.1	现有的用户接入网	424
12.2	下一代网络的基本概念	424
12.3	家庭网络的基本概念	428
12.4	接入网在下一代网络中的地位	433
12.5	用户接入网的融合演进和技术难题	433
12.6	无线光接入技术的发展前景	434
参考文献		438
附录 英汉缩略语对照		441

第 1 章 无线光通信的基本概念

本章扼要介绍了无线光通信的基本概念，为深入了解和掌握无线光通信及相应的无线光接入技术做必要的准备。

1.1 什么是无线光通信

为了更清楚地理解无线光通信的含义，首先扼要介绍光通信和光纤通信。光通信是以光作为信息载体的一类通信方式，而光纤通信是以光作为信息载体、以光纤作为传输介质的一类通信方式。由于光纤的传光特性，目前只有波长在 700~1600nm 很小范围的光可在光纤中传播，并且光纤网络使用的光缆敷设只能架空或埋伏在地下或布入水中，不便于进行移动通信。

无线光通信是将载有信息的光载体从光纤的束缚中解脱出来，进入广阔的天地。因此，现阶段无线光通信可以定义为以光束为信息载体、其载信息的光束在自由空间中传输的一类光通信方式。这种承载信息的光束所传输的自由空间可以是没有任何物质的真空，也可以是可受气候和环境严重影响的大气传输介质或汹涌澎湃的海水传输介质。因此，根据传输介质的情况可将无线光通信分为地面上无线光通信、深空无线光通信、近空无线光通信和水下无线光通信等几类。

地面上无线光通信是以大气作为传输介质，以激光或光脉冲作为信息载体，在太赫兹 (THz) 光谱范围内传送数据信息的通信系统，在有的资料中也称为无线光网络 (wireless optical network, WON) 系统或光无线系统。这是一种以光束为信息载体的双向点到点无线通信技术，可提供数据信息的点对点或点对多点无线高速连接。由于无线光通信中的信息不需要光纤，而是在空气介质或真空中传播，因此，无线光通信技术也常称为虚拟光纤 (virtual fiber) 通信技术。

发展无线光通信意义重大而深远，其不但可将地面上的各类通信网络融为一体，采用统一标准制式，而且在近空，乃至将来人类进入宇宙深空的通信也要采用无线光通信制式。发展无线光通信面临着严峻的技术挑战，包括地面上无线光通信如何克服大气传输介质造成的对通信传输距离的约束；高速、高功率光发送技术；抗干扰、高灵敏度光接收技术；高精度、高增益、高可靠收发天线；快速、精确的捕获、跟踪和瞄准 (acquisition, tracking, pointing, ATP) 技术等。

1.2 无线光通信分类

无线光通信的分类可从不同角度进行。通常,从光载体的存在形式、工作原理以及网络的配置位置等进行分类。这里扼要介绍如下。

1.2.1 从光载体的存在形式进行分类

从经典相对论观点出发,又可将光通信进一步分为经典光通信和量子光通信两类。经典相对论认为,世界上一切物体存在形式都具有双重性,即具有波动性和微粒性。当物体尺寸远大于波动幅度时,从宏观上看微粒性特别明显,而其具有的波动性几乎察觉不出来,这时,可以测准物体的物理尺寸与相对的确切位置。这种情况就是关于物体有确定的位置、质量、尺寸大小以及时间的绝对性等日常生活所感觉到的时空概念。而随着物体物理尺寸的减小,其波动性逐渐地被观察出来,物体位置的不确定性逐渐地明显起来。当物体的物理尺寸与其波动幅度可以相比时,或在一个量级上时,则物体开始具有明显的波动性,此时,再也测不准物体的确切位置了。这时,将有与日常生活所感觉到的时空概念不相同的时空概念。因此,时间、空间的概念只具有相对意义。

光载体存在形式的双重性特别明显。从波动性的观点来研究光,可以发现光是一种振荡于光频的电磁波,光的相干性和衍射现象就是作为电磁波的有力证明。因此,光作为电磁波将遵守有关的电磁场理论。从微粒性的观点来研究光,则光是由具有一定能量的光量子的光子微粒流组成,其中,光压现象便是光的微粒性存在形式的有力证明,这时,光量子将遵守量子理论,其运动规律遵守量子电动力学规律。

从光载体的存在形式出发,对光通信进行分类,其实质上涉及光载体所载信息的容量问题。从光存在形式具有双重性的观点出发,将光通信分为经典光通信和量子光通信两大类。

1. 经典光通信

经典光通信是从将光作为有一定波段范围的电磁波观点出发进行研究的。这种用光载波传输信息的机制使得光通信与现有的长波、中波、短波与微波无线电通信相类似,都是以电磁波作为信息载体,因此,无线电通信中的所有概念、理论与技术都可以方便地引申到经典光通信领域。一般地,把用电磁波作为信息载体的通信方式统称为经典通信,其信道称为经典信道,这种光通信系统的通信容量的上限受所谓的高斯噪声限制,一般的容量不超过 10^4 GHz。

经典光通信是将光作为一种光波来研究。因此,其自然具有一切波动性,有

直线传播、反射、折射和衍射等一切波的传播特性。根据光波的传播,也可将无线光通信分为视距(line of sight, LOS)传播无线光通信和非视距传播无线光通信两类。视距传播无线光通信是指作为无线光通信信息载体的光束在通信系统中间传播,不允许有阻碍光传播的障碍物存在,在发射机和接收机之间,光束可实现直接的直线传播。非视距传播无线光通信是指作为无线光通信信息载体的光束在通信系统中间传播,可允许有阻碍光传播的障碍物存在,光束可通过绕射的方式从发射机绕过障碍物到达接收机。目前,已实用化的无线光通信都是视距传播无线光通信,由于其通信是在视线范围内,因此,通信距离是很有限的,中间障碍物的存在会造成通信的中断。为了扩大无线光通信的传输距离,许多专家学者正在把研究的焦点集中在非视距传播无线光通信上,试图利用光波的绕射(或称衍射性质)扩大无线光通信的传输距离。

从总体上看,经典光通信是以光波作为信息载体的一种先进的通信手段。由于经典光通信是一种以光波作为信息载体的通信方式,因此,它具有传输频带宽、通信容量大和抗电磁干扰能力强等优点。光波按其波长长短,依次可分为红外光、可见光和紫外光等。红外光和紫外光属于不可见光,它们同可见光一样都可作为信息载体。光通信按光源特性又可分为激光通信和非激光通信两类。

经典光通信种类繁多,包括已经相当成熟、普遍采用的光强度调制/直接检测(intensity-modulation/direct-detection, IM/DD)制式,以及正在研究开发中的相干光通信、光复用通信、光孤子(soliton)通信等。

1) 光 IM/DD 制式

在光通信系统中,对于要在光载波上传输的电信号调制/解调方式,目前主要有两种体制,即内部 IM/DD 制式和外调制/外差检测制式。当调制电信号速率较低时,多采用内部 IM/DD 制式调制/解调方式;而当调制电信号速率高于 2Gbit/s 时,则可采用外调制/外差检测制式的调制/解调方式。

内部 IM/DD 制式是一种广泛采用的相当成熟的原始模式,这种制式是在发射机中直接用准备传输的电信号去调制光源的某个参数。例如,经常用电信号调制半导体光源流过电流的方法来实现对光源发光强度的调制;在接收机中则是对光载波信号进行直接检测得到原传输的电信号。目前,广泛应用的内部 IM/DD 制式有直接光强度调制、副载波预调制-光强度调制和数字式调制等。数字式调制是直接光强度调制的一个特例,是用要发送的数字电信号作为控制光源发光的开关,其开关的速率可达 10^9 次/s 以上,因此,可用于实现长距离、大容量光信号的传输。

在发送端,用准备好的要传输的电信号直接调制光源的工作电流,从而实现将要传输的电信号载到光波上的目的;在接收端,直接将光信号变换为电信号,

经放大、判决等处理恢复原电信号。这种模式的优点是设备简单，缺点是接收灵敏度较低，选择性差，通信容量也较低。这是当前光通信普遍采用的制式，目前，光纤用户接入网主要是采用此种制式。

2) 光复用通信

通信中的复用技术是一种充分利用传输介质信道提高通信容量的多维通信手段。首先，把来自多个信息源的信息进行合并（称为复接），然后，将这个合成的信息群经由单一共用的传输设备进行传输，在接收端再将这个信息群进行分离（称为分接或解复），并分别重现原信息。因此，复用技术实质上是一种起着多信道作用的信息传输方式。

一般来说，光复用通信可分为光波复用通信和信号复用通信两类。其中，光波复用通信主要包括光 WDM 光通信和光空分复用（space division multiplexing, SDM）光通信两类；信号复用通信主要包括 OTDM 光通信和光频分复用（optical frequency division multiplexing, OFDM）光通信两类。此外，经常使用的复用手段还有 OCDM 光通信等多种。关于光复用通信在后面有关章节中还要详细介绍，这里不再赘述。

3) 光孤子通信

光孤子通信是利用光纤的非线性补偿来抵消光纤的色散，从而形成光孤子。这种通信制式是将光孤子作为信息载体。由于无色散的影响，可实现长距离的传输，其系统中间只需加入光放大器将光信号放大即可，不必对传输过的光信号进行整形。由于光孤子通信有造价低廉、复用简单等许多优点，已成为通信领域的热点。光孤子通信系统比特率与传输距离之积可达 $30\text{Tbit/s} \times \text{km}$ 以上。在国际上，实用化的光孤子通信系统码速已达到 $20 \sim 40\text{Gbit/s}$ ，传输距离可达近万千米。

4) 相干光通信

相干光通信又称为外差光通信。凡是使用外差或零差检测方式的通信都可以称为外差光通信或相干光通信。这种通信模式在发送端利用光波的相干特性将要传输的信息载入光波的波幅、相位或频率等各种参量之中，在接收端则采用光外差检测方式恢复原信号。

外调制/外差检测制式是在高速光缆传输系统的光发射机中通过用要发送的电信号调制光载波的振幅、相位、光频中的一个或几个参数的方法将要发送的电信号载到光波上。当前，广泛应用的外调制/外差检测制式的外调制器有电吸收调制激光器（electro-absorption-modulated laser, EML）调制器和马赫-曾德尔（Mach-Zehnder）调制器等，其调制速率可超过 10Gbit/s 。在接收机端则通过光外差检测方法将载在光载波的信号解调下来。一般来说，光外差检测要通过接收光信号与接收机内设置的本地光频振荡器（本地光源）的差频处理，将原光载波

频率范围从 200THz (10^{12}Hz) 量级的光频区域搬移到 GHz (10^9Hz) 量级的射频 (RF) 中频频率范围。

外调制/外差检测制式与内部 IM/DD 制式相比有许多难得的优越性, 其最突出的优点是有很高的接收灵敏度, 与内部 IM/DD 制式相比, 其灵敏度可提高 $15\sim 20\text{dB}$, 并且有优良的选择性, 这在光纤通信中尤其重要。例如, 在一根光纤中, 设计的频道间隔仅为几百赫兹, 可以通过相干光通信外差接收的选择性方便地将其区分开来, 很好地检出每个信道的传输信息。

图 1-1~图 1-3 是传输介质为光纤的情况, 对于无线光通信来说, 电路需要适当地调整。

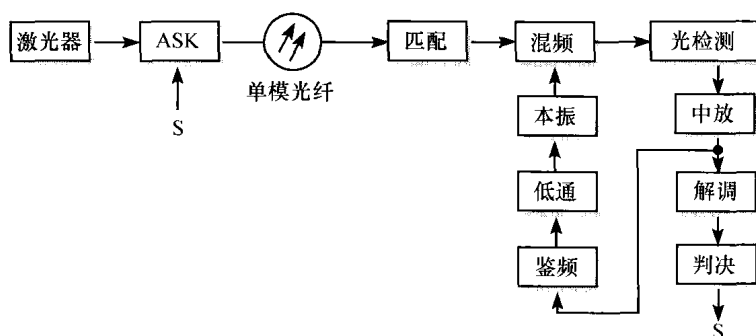


图 1-1 幅度键控 (ASK) 的包络解调

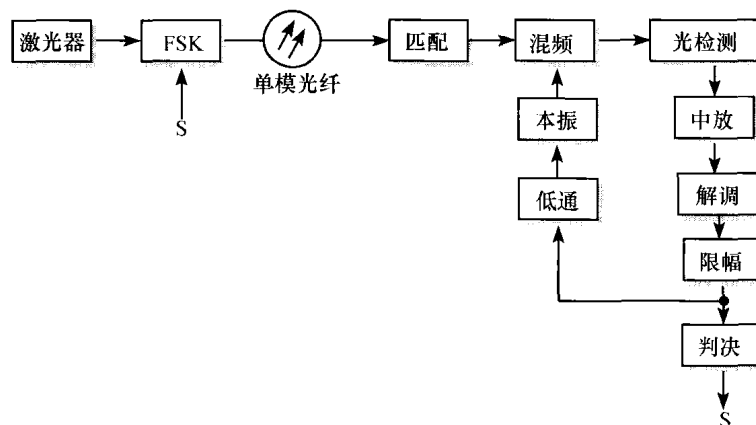


图 1-2 频移键控 (FSK) 的双滤波解调

2. 量子光通信

量子光通信是以光作为具有一定能量 $h\nu$ 的光量子的光子流观点出发的概念

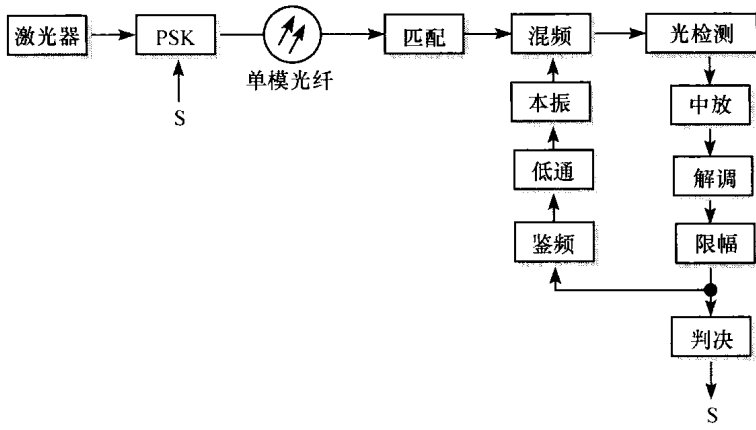


图 1-3 相移键控 (PSK) 的差频解调

来研究光通信的。因此，量子光通信是以光子作为信息载体的一种非常先进的通信手段。从经典相对论观点出发，光存在形式的双重性特别明显。量子光通信就是从微粒性的观点来研究光的，光量子将遵守量子理论，其运动规律遵守量子电动力学规律。这里，由于信息的载体是光量子，所以，其传输与作用应由量子力学原理来规范。因而，研究量子光通信应服从量子信息论遵守的规律，信息的载体是光量子微粒，其运动、传输及相互作用要遵守量子电动力学原理。

量子光通信也称为光子通信，这是由光量子态来携带信息的。其理论研究表明，一个光量子可以将无限的信息传递给无限个分支终端和无限个受信者。根据量子信息论原理，一个光子在常温下可携带几十比特信息，而现行的经典光通信系统，折合一个光子在常温下仅能携带几十分之一比特信息，这使得量子光通信具有显著的优越性。因此，这种新通信模式的开发与应用将会引起光通信领域内一场深刻的革命。

量子光通信系统的基本部件包括量子态发生器、量子通道和量子测量装置等。量子光通信采用的硬件与经典光通信有显著区别，其关键技术是光子计数技术、量子无破坏测量技术以及亚泊松态激光器等。此外，在接收端，量子光通信所采用的光子计数技术不需从发射信息端吸取信息能量。也就是说，量子光通信系统中光子所携带的信息能量可供给极多的受信者使用。

1) 量子光通信的分类

量子光通信信息分为经典和量子两类信息。前者是经由经典通道传送的，后者是经由量子通道传送的。在这两类通信中，前者主要用于量子密钥的传输，后者则可用于量子隐形传态和量子纠缠的分发。

(1) 量子隐形传态和量子纠缠的分发。

隐形传态是指脱离实物的一种“完全”的信息传送方式。从物理学角度来看，

隐形传态过程是：先提取原物的所有量子态信息，然后将其传送到接收点，接收者依据这些量子态信息选取与构成原物完全相同的基本单元（如原子），恢复出完美的复制品。经典信息是发送者对原物进行某种测量而获得的，量子信息是发送者在测量中未提取的其余信息。接收者在获得这两种信息之后，就可制造出原物量子态的完全复制品。这个过程中传送的仅仅是原物的量子态，而不是原物本身。

在光量子的世界里，有特殊关系的两个光子之间，信息的传递是不需要媒介的。当其中的一个光子接受信息时，它本身无需运动，也不用借助其他媒介，另一个光子自然会接收到这个信息。这种特殊关系，专业术语叫“纠缠”。经研究分析可发现，在纠缠光量子对中，一个光子进行操作的同时，另一个光子也会发生相应的变化，这说明光子本身没有被传递，而其状态（即携带的信息）已被传递过去。这里是以量子态作为信息载体，通过量子态的传送完成大容量信息的传输，实现原则上不可破译的量子保密通信。

为了进行远距离的量子态隐形传输，往往需要事先让相距遥远的两地共同拥有最大量子纠缠态。但是，由于存在各种不可避免的环境噪声，量子纠缠态的品质会随着传送距离地增加而变差。因此，如何提纯高品质的量子纠缠态是目前量子通信研究中的重要课题。

（2）量子密钥的传输。

在普朗克量子理论中，光量子的不可复制性是一项基本定律。因为任意光量子的状态在受到复制或测量时都会发生变化，所以，利用光量子的这一特性制作的密码，从理论上讲是一种最为安全的密码。这是因为一个光量子在被传送过程中就像光在光纤里传输过程一样，若窃听者在某一个地方偷听或将该信息内容复制下来，这就是一种测量行为，因而就会造成对整个体系的破坏，其结果是被测量的信息全部消失。使用光子做密钥分配一般有利用单光子极化编码和利用纠缠源来做密钥分配两类方法。

可以研究制造出特殊结构的光探测器，实现对单个光子的探测。吸收一个光子，产生的电子在电场当中要加速得到很高能量，产生光子雪崩效应，从而能够由探测到单个光子产生电流。

2) 量子光通信中存在的关键技术

（1）光子源问题。最近，在这方面已取得突破性进展。日本的一些专家实验成功一种可用于量子光通信的小型激光器光子源，目前正在努力完成其实用化。

（2）量子无破坏测量技术。量子无破坏测量技术的研究也有了实质性进展。最近，已研制成功使用光纤的量子无破坏测量装置，很适合于量子光通信系统使用。

（3）光子计数技术。以前使用的光子计数器均为光电倍增管型，而且需要冷却设施，因而难于应用于系统之中。现在，正在着手于雪崩光电二极管（avalanche photon diode, APD）型的光子计数器的研制。但是，由于这种器件的噪

声系数还远高于光电倍增管型，因而开始有了采用 PIN 型的光子计数器的想法。

鉴于上述情况，量子光通信系统目前还处于实验室的研究阶段。但是，由于这种通信模式的高超构思和极为优异的特性一直引人注目，仍有不少人为之倾注全部精力，而且其研究越来越吸引人。因此可以说，实现量子光通信虽然不是近期可办到的，但绝非是遥远的不可思议的事情，特别是在 21 世纪信息技术迅猛发展的时代，一些技术难题常常会出人意料地、奇迹般地得以解决，加之一些关键技术问题已出现转机，并使量子光通信的研制得以受益，因此，可望在 21 世纪前期实现量子光通信的实用化。这种量子光通信的实用化不仅将引起通信领域一场深刻的革命，而且会给人类社会带来翻天覆地的变化，为人类进入更加美好的社会创造极其有利的条件。

表 1-1 中列出了从光载体存在形式对无线光通信的分类。

表 1-1 从光载体存在形式对无线光通信的分类

无线光通信				
经典光通信			量子光通信	
光 IM/DD 制式	光复用通信	光孤子通信	相干光通信	容量比经典光通信提高几个数量级，关键技术是光子计数技术、量子无破坏测量技术以及亚泊松态激光器
	WDM、OTDM、OFDM、OCDM 等			

1.2.2 从网络的配置位置进行分类

无线光通信使用的载信息光束可以在环绕地球的大气层内或水下传播，即不离开地球，也可以离开地球穿过大气层进入太空在星际之间传播。一般来说，通常将前者称为近空无线光通信，而将后者称为深空无线光通信。

无线光通信网络一方面正在地球上迅猛发展，形成近空无线光通信网络，另一方面也在卫星之间的深空通信中大展宏图，形成深空无线光通信网络，甚至人们预言无线光通信将成为人类遨游太空的主要通信方式。无线光通信可逐步将地面上的各种干线网、城域网和用户接入网采用的通信技术融为一体，并在地球和深空星际之间形成立体多维通信网。

综上所述，在运用无线光通信技术融为一体的立体多维通信网中，为便于研究开发各种类型的无线光通信网络，可将其分为地球上的近空无线光通信网络和在卫星之间和深空中的深空无线光通信网络两大类。限于篇幅和我们研究的主题，下面仅扼要讨论地球上的近空无线光通信网络。按一般常规，地球上的近空无线光通信网络又可分为地面上无线光通信和水下无线光通信两大类。

地面上无线光通信是以激光束为信息载体、以大气为传输介质的无线光通信方式，其使用的激光波段目前基本上与光纤通信使用的激光波段相一致，即波长