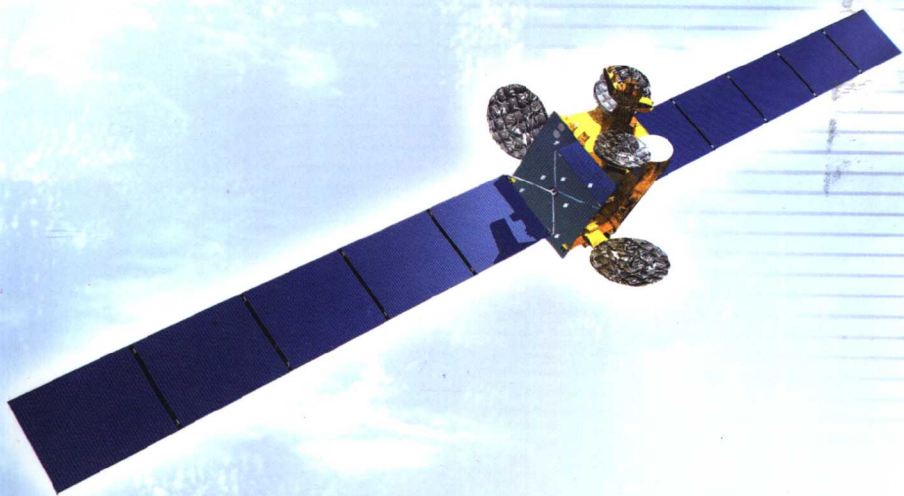


卫星光通信技术

谭立英 马 晶 著



科学出版社

www.sciencep.com

卫 星 光 通 信 技 术

谭立英 马 晶 著

内 容 简 介

本书介绍了卫星光通信基本理论及技术和器件情况。全书共分13章。内容包括:卫星光通信系统组成;激光星间链路系统分析;卫星光通信系统光波长影响分析;卫星光通信中的光场描述、光信号接收、调制及探测;不同光场分布下卫星光通信系统参量分析;卫星平台振动对卫星光通信影响;星地激光链路;星间激光链路中光信号的瞄准捕获和跟踪;小卫星光通信网络中信息传输的有效性对路由选择的影响。本书是作者的工作结晶及研究工作总结所形成的卫星光通信系统的初步理论和原理。

本书可以作为大专院校相关专业高年级大学生、硕士和博士研究生的教材和教学参考书,也适合于通信、光通信、光学、信息处理、激光雷达、激光测距等领域的研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

卫星光通信技术/谭立英,马晶著. —北京:科学出版社, 2004

ISBN 7-03-012366-2

I. 卫… II. ①谭…②马… III. 卫星通信:光通信
IV. TN927

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 099107 号

责任编辑:陈菊华 姜淑华 / 责任校对:刘小梅
责任印制:白 羽 / 封面设计:郭 建

科 学 出 版 社 出 版

北京东城根北街16号

邮政编码 100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2004年3月第 一 版 开本 850×1168 1/32

2004年3月第一次印刷 印张: 8

印数: 1—2 000 字数: 206 000

定价: 23.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

卫星光通信（激光星间链路）具有重要的应用前景，可应用于低轨道卫星与高轨道卫星间（LEO-GEO）通信链路、高轨道卫星与高轨道卫星间（GEO-GEO）通信链路、低轨道卫星与低轨道卫星间（LEO-LEO）通信链路、空间与地面（GEO-Ground）通信链路，也可应用于深空探测、载人航天空间站通信。可以预见，在不远的将来，由于用光实现了卫星链路，将给卫星通信领域带来巨大的变化。

但到目前为止，国内外还没有一部卫星光通信方面的系统论著。我们出版的这本专著是我们这些年来工作结晶及研究工作总结。目的是希望能推动卫星光通信技术的发展。

全书共分 13 章，各章内容如下：

第 1 章介绍卫星光通信系统主要组成及各部分工作原理和器件技术情况，各国采用的技术情况及发展趋势。包括光源、发射接受、调制解调、瞄准捕获跟踪等子系统。在卫星光通信中，通信光源至关重要。它直接影响天线的增益、探测器件的选择、天线直径、通信距离等参量，因此对光源子系统研究是十分必要的。发射、接收子系统是卫星光通信系统的关键子系统之一。光发射机大致可认为是光源、调制器和光学天线的级联。调制的作用是将需要发射信号调制到光载波上；解调是通过光电转换器件将光信号转换为电信号。探测部分包括滤波、放大部分，该部分也是卫星光通信系统中必不可少的。瞄准、捕获、跟踪子系统是卫星光通信系统中非常重要的子系统之一。光信号的瞄准、捕获、跟踪是卫星光通信的重点。

第 2 章主要讨论卫星定位问题，以及星间链路的指向问题。提及的指向问题均指不同轨道平面内的两颗卫星的星间链路变

化，这是因为在同一轨道平面内，卫星之间是相对静止的。

第3章分析波长选择对光通信系统的影响。系统初期设计中，对系统的可行性分析显得十分重要。并且，卫星光通信系统中采用光波长的不同关系到光学通信天线的质量、系统所采用技术以及系统结构的不同，因此系统初期设计中，对通信波长的选择就十分必要。我们采用通信系统中传输链路分析的链路冗余公式对系统可行性进行分析。

第4章描述卫星光通信中的光场。卫星光通信的基本原理是运用发射光场作为信息载体，以自由空间作为信道，通过对光场的发射和接收来达到通信目的。因此，在卫星光通信技术中，首先对载波光场进行正确的描述，然后给出卫星光通信中误码率的描述。

第5章主要讨论光场的准直与整形、功率探测、探测器上的光场、接收聚焦后的光场、滤波和背景辐射等。在卫星光通信系统中，接收系统的光学元件对光场进行接收，并将收集到的光场聚焦到光探测器的表面。在接收系统中，光学元件常常是透镜组，这些透镜组将接收到的光场成像到探测器上。为了确定系统的优良性能，须对这些接收到的光场进行描述。

第6章阐述卫星光通信调制解调原理。在卫星光通信中，高速调制及解调也是卫星光通信的较关键部分，用激光作为信息传递的载体的主要优点是其潜在的巨大信息容量，可实现高数据率通信。光通信的优点已被光纤通信的成功所证实。然而，卫星光通信中所采用的调制技术与光纤通信中所采用的调制技术要求不尽相同，在卫星光通信系统中，激光器的发射功率要比光纤通信所用激光器的功率大得多，因此在对光信号进行调制和解调时，存在许多特殊的问题和技术需要解决。而高功率下实现高数据率通信最根本的条件就是高速调制及解调技术。

第7章从光电探测的基本原理出发，介绍光电转换原理。光电探测是将接收到的光场转换成后续探测过程所要求的电流或电压波形，这是光接收机中最主要的功能。光电探测技术涉及光学

信号如何转换为电信号，以及进行转换过程的基本理论，因此需要在进行系统设计时了解光电检测过程的工作特性，这对于光信号处理过程优化设计具有重要的意义。如在优化设计中必须给出探测器波形的实际统计特性，系统的性能直接依赖于光电检测数学模型的检测和解码系统。

第 8 章分析卫星光通信系统。以便在设计卫星光通信系统时能够对系统的主要参量及其相互制约关系有所了解，找出设计的关键所在，使卫星光通信系统得到优化。

第 9 章分析发射光束截面的能量分布为高斯分布的情况。在上一章的分析中，假定发射光束横截面的能量分布为均匀分布。但另一种很可能的分布就是高斯分布，与上一章的考虑类似，我们首先分析高斯分布下不同比特率，卫星光通信系统的最大通信距离与其他参量的关系。

第 10 章从理论上分析振动对激光星间链路误码率的影响、振动对扫描速度等其他参量的影响，并作了初步的实验模拟。首先对几种基本振动类型（正弦函数型振动、方波函数型振动、三角函数型振动、锯齿函数型振动）进行了分析，从理论上给出这几种基本振动的振幅、频率、持续时间等参量对误码率的影响。然后对卫星平台振动时星间距离的变化、跟瞄系统的各个参量对误码率的影响进行了理论分析，并讨论了卫星平台的振动对扫描速度等参量的影响。

第 11 章初步分析星地激光链路。在我们前面关于卫星光通信系统的讨论中，假设信号传输发生在自由空间上。当激光链路通过大气层传输时，就必须考虑附加的效应，尤其是大气层产生的附加空间损耗和可能的光束畸变。因此，卫星-地球激光链路的系统就必须了解这些影响以确定合适的功率预算、进行链路分析、给出有效的系统设计。

第 12 章讨论星间激光链路中的瞄准、捕获和跟踪问题，并给出几种基本方法，以及瞄准、捕获、跟踪子系统对通信性能的影响。在卫星光通信中，由于光场的光束很窄，传输距离又很

长, 因此, 瞄准、捕获和跟踪的问题变得尤其突出。

第 13 章讨论小卫星光通信网络中信息传输的有效性对路由选择的影响。激光星间链路使得多个小卫星组成了空间光通信网络, 从而可充分利用空间资源。中低轨卫星移动通信系统只有通过足够数量的网络节点和其间的相应链路才能获得优良通信流量的分配, 增强网络克服链路或节点故障的能力。小卫星光通信网络建立之后, 与其他通信系统一样, 也有两个衡量这一通信系统优劣的标准: 有效性与可靠性, 也就是通信的效率与通信的质量问题。信息如何传递, 走什么样的路径, 才能传递得更加快速, 才能提高通信的效率, 这都涉及路由选择的问题。

本书第 1 章至第 7 章由谭立英撰写。第 8 章至第 13 章由马晶撰写。在著作过程中得到项目组中于思源、韩琦琦、陈云亮等同志的支持, 在此表示感谢。

本书可以作为大专院校相关专业高年级大学生、硕士和博士研究生教材和教学参考书, 也适合于通信、光通信、光学、信息处理、激光雷达、激光测距等领域的研究人员参考。

目 录

第 1 章 卫星光通信系统简介	1
1.1 引言	1
1.2 光通信系统组成	1
第 2 章 激光星间链路分析	18
2.1 卫星轨道	18
2.2 卫星轨道运动理论	21
2.3 卫星的星下点轨迹	22
2.4 激光星间链路的仿真计算	23
第 3 章 卫星光通信系统光波长影响分析	27
3.1 发射天线体积与采用光波长的关系	27
3.2 链路冗余影响	29
3.3 通信光波长的选择	32
第 4 章 卫星光通信中的光场描述	39
4.1 辐射光场描述	39
4.2 自由空间光通道	41
4.3 光场描述	43
4.4 现代通信系统所用各种码型	47
第 5 章 卫星光通信光信号接收	52
5.1 光场的准直与整形	52
5.2 能量探测	55
5.3 探测器上的光场	57
5.4 接收聚焦后的随机光场	58
5.5 背景干扰及滤波	59
第 6 章 大功率半导体激光器的调制	64
6.1 卫星光通信中信号调制概述	64

6.2	半导体激光器调制基本原理	67
6.3	匹配补偿网络的设计	73
第7章	光信号探测基础	82
7.1	光信号探测的物理基础	82
7.2	光电转换的基本规律	86
7.3	接收光场计数统计	99
7.4	直接探测原理	105
7.5	直接探测理论	107
7.6	相干探测接收	117
第8章	均匀分布下卫星光通信系统参量分析	123
8.1	发射天线体积与采用光波长的关系	123
8.2	影响卫星间光通信距离的主要因素分析	125
8.3	比特率与各主要参量关系分析	129
第9章	高斯分布下卫星光通信系统参量分析	137
9.1	高斯分布下卫星光通信系统各主要参量分析	137
9.2	高斯分布下天线横向半径与最大通信距离的关系 分析	138
9.3	高斯分布下发射功率与最大通信距离的制约关系	144
9.4	高斯分布下接收灵敏度的影响	146
9.5	高斯分布下接收天线处于光束中不同位置时的 情形	150
9.6	考虑实际系统具体情况时的系统参量分析	154
第10章	卫星平台振动对卫星光通信影响	156
10.1	卫星平台随机振动对卫星光通信系统误码率的 影响	157
10.2	卫星平台振动实测结果	165
10.3	基本振动对激光星间链路误码率的影响	166
10.4	其他几种基本振动对误码率的影响	175
10.5	卫星振动时星间距离的变化对误码率的影响	183

第 11 章 星地激光链路	187
11.1 大气影响	187
11.2 大气的折射率	189
11.3 大气对光束传输的影响	190
11.4 大气对探测接收的影响	194
11.5 大气对直接探测接收的影响	194
第 12 章 光信号的瞄准、捕获和跟踪	198
12.1 卫星光通信中光束的瞄准	198
12.2 激光星间链路中天线扫描捕获技术	201
12.3 扫描方式分析	207
12.4 卫星光通信复合轴跟瞄控制	212
12.5 跟瞄控制模拟系统结构	215
12.6 跟踪过程	216
12.7 双向跟踪过程	220
12.8 卫星振动时跟瞄系统的各个参数对误码率的 影响	222
12.9 振动对卫星光通信系统扫描速度的影响	225
第 13 章 卫星光通信网络分析	231
13.1 卫星移动通信系统的网络划分	231
13.2 激光星间链路子网络路由仿真的原则	235
13.3 目标星座——Inmarsat-ICO 系统	236
13.4 激光星间链路路由仿真结果	239
13.5 小结	244

第 1 章 卫星光通信系统简介

1.1 引言

卫星光通信（激光星间链路）具有重要的应用前景，可应用于低轨道卫星与高轨道卫星间（LEO-GEO）通信链路、高轨道卫星与高轨道卫星间（GEO-GEO）通信链路、低轨道卫星与低轨道卫星间（LEO-LEO）通信链路、空间与地面（GEO-Ground）通信链路，也可应用于深空探测、载人航空气空间站通信。可以预见，在不远的将来，由于用光实现了卫星链路，将给卫星通信领域带来巨大的变化。

可建立的激光星间链路有：

(1) 处于不同轨道高度卫星间的链路，如轨道高度小于 1000km 的低轨道卫星（LEO）与 36 000km 高的同步轨道上的卫星（GEO）间的链路，或轨道高度 10 000km 的中轨卫星（MEO）与 GEO 或 LEO 间的链路，一般称此为轨道间链路（IOL）；

(2) GEO（LEO 或 MEO）与 GEO（LEO 或 MEO）间的链路，称为星间链路（ISL）；

(3) GEO 与地面站之间的链路。

近年来的商业需求和空间信息公路、信息高速公路的发展，使得对激光星间链路（卫星光通信）技术的要求更加迫切，这些已经作为欧洲和美国、日本等国发展该方面技术的动力，并正向商业应用转化。

1.2 光通信系统组成

卫星光通信系统由下面几个主要子系统组成：

(1) 光源子系统。在卫星光通信中，通信光源至关重要。它直接影响天线的增益、探测器件的选择、天线直径、通信距离等参量，因此对光源子系统研究是十分必要。

(2) 发射、接收子系统。发射、接收子系统是卫星光通信系统的关键子系统之一。光发射机大致可认为是光源、调制器和光学天线的级联（图 1-1）。

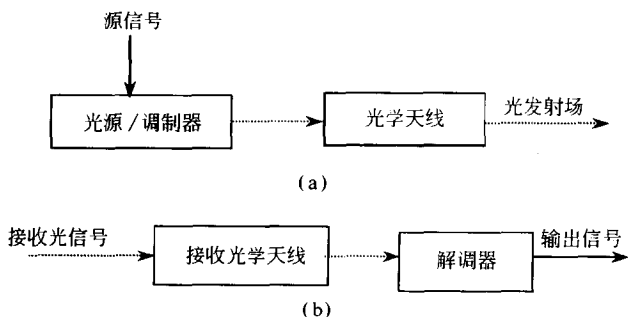


图 1-1 发射、接收子系统框图

(a) 光发射机框图；(b) 光接收机框图

(3) 信号的调制、解调、探测子系统。调制的作用是将需要发射的信号调制到光载波上。解调是通过光电转换器件将光信号转换为电信号。探测包括滤波和放大，这也是卫星光通信系统中必不可少的。

(4) 瞄准、捕获、跟踪子系统。瞄准、捕获、跟踪子系统是卫星光通信系统中非常重要的子系统之一。光信号的瞄准、捕获、跟踪是卫星光通信的难点、重点。所以应对此系统的关键技术进行研究。

另外，卫星光通信系统中，还有辅助器件、伺服系统、控制系统等。下面将分别对各子系统进行讨论，给出各国卫星光通信各子系统必要的参数。

光波频段通信与无线电射频通信有很大的不同。这是因为光波频段波长短，光波器件的设计与射频、微波、毫米波器件的设计技

术完全不同。下面将给出卫星光通信系统简图（图 1-2）并对该图作简要介绍。

图 1-2 中所包含的各个标准通信模块在任何光通信系统中都是适用的。信息源所产生的某种形式的信息（随时间变化的波形、数字系统等）将从一颗卫星传送到远处的另一颗卫星。信息源的输出被调制到一个光载波上，光载波以光场或光束的形式通过空间光通道（自由空间、湍流大气层）进行传输。在接收端，光场被接收和处理（光检测）。通常，检测时会伴有噪声干扰、信号变形、背景辐射等。在卫星光通信系统中传输载波是光波频段，系统的工作方式与其他采用调制方式的通信系统是相同的。但激光星间链路终端所采用的器件与无线电射频系统所采用的器件却不相同。

把信息源的信息调制到光载频上可以采用不同的方式，如调频（FM）、调相（AM）。理论上，这些方式都适用于电磁波的任何一个载波频率，但在卫星光通信中，常采用强度调制，即用待传播的信息调制光载波的光场强度；还可以采用极化调制，这是对光场的空间特性进行调制。

图 1-2 中的光接收机是用于收集入射的光场并处理、恢复传输的信息。典型的光接收机包括三部分：第一部分是光接收前端（通常包括一些透镜或聚光部件），第二部分是光探测器，第三部分是后续处理器。透镜系统把接收的光场进行滤波和聚焦，使其入射到光探测器上。光探测器把光信号变换为电信号。后续处理器完成必要的信号放大、信号处理及过滤处理，以从探测器的输出中恢复所需要的信息。

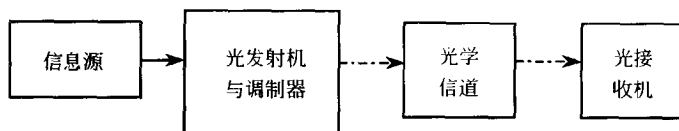


图 1-2 光通信系统方框图

光接收机可以分为两种基本类型，即功率探测接收机和外差接收机。功率探测接收机也称做直接探测或非相干接收机，透镜

系统和光电探测器用于检测所接收到的光场瞬间光功率。这种光接收机的工作方式是最简单的一种，只要传输的信息体现在接收光场的功率变化之中，就可以采用这种光接收机。外差接收机的本底产生的光波场与接收到的光场经前端镜面加以合成，然后由光探测器检测这一合成的光波。外差式接收机可接收以幅度调制、频率调制、相位调制方式传输的信息。外差式接收机实现起来比较困难，它对两个待合成的光场在空间相干性方面有严格的要求。因此，外差式接收机通常也称为空间相干接收机。不论是哪一种目的都需要对系统的能力进行了解，然后完成系统设计，使整个光通信系统达到所要求的性能。

接收机的前端系统除了把光场聚焦到光探测器，还具有一定程度的滤波作用。在探测器的前端用滤波器减小背景辐射光的影响。滤波器可以是空间滤波（如极化滤波、光阑滤波等），也可以是频率滤波，即让某一频带通过，而阻止其余频带，频率滤波器同时也决定了光探测器接收光场的带宽。光探测器把聚焦后的光场转换为待处理的电信号。尽管光探测器的种类很多，但其工作原理均可采用量子力学的理论加以解释，即利用光敏物质产生随入射光场功率变化的电流或电压信号。不同探测器的输出响应特性可能有所不同，但其基本的工作原理模型是相同的。从该模型得到的统计特性将用于探测器输出信号的处理过程。常用的光探测器包括光电管、光电二极管和光电倍增管。

在光接收机中存在各种噪声源，这对于光场的探测是一种阻碍。在远距离的卫星光通信中，最主要的噪声源是来自背景光或杂散辐射光，它们伴随着传输光场被接收机的透镜系统收集。采用适当的空间滤波可以在一定程度上减轻这些辐射光的影响，但它们仍然是光探测过程中的主要干扰。采用直接耦合光纤波导作为传输光路可以消除背景光的干扰。第二种噪声源来自光探测器本身，因为光探测器不是一个理想的器件，在光的探测过程中会产生内部干扰，这类噪声称为探测器噪声。最后一类噪声为电路和电子器件的热噪声。这是在处理探测器输出信号的过程中产生

的。这类热噪声的确切模型可以认为是可加性白高斯噪声，其噪声谱电平直接与接收机的工作温度有关，这种情况与各种射频或微波通信系统相同。在接收机的分析设计中，要充分考虑各种噪声的影响。

对于卫星光通信系统，需要把要传输的光场首先聚焦为一束光，然后以电磁场的形式发送到某种介质中进行传播。通信的方式可以是地面对卫星链路、卫星对卫星链路，或者甚至是卫星对水下链路，所有这些系统发送的光束都不是导波场，因此通信路径极易受到传输媒质的影响（如大气、云层、水等）。以后将专门就大气层对星地激光链路的影响进行探讨。

调制器把模拟或数字式的信号信息叠加在光源上。光调制器有两种基本类型，即内部调制器和外部调制器。内部调制器是信号对光源本身直接调制，产生调制的光场输出，通过偏置电流的变化，对光源进行幅度或强度调制。而改变激光管的腔长可以实现频率或相位的调制。脉冲调制比较简单，只要使驱动电流的变化大于或小于阈值电流就可实现二极管激光源的脉冲输出。所有这些调制都是在光功率输出的线性区段进行的。外部调制器对光源输出进行聚焦，然后通过一个外部器件，调制信号将使光波的传输特性产生变化。这种调制方式的优点是可以利用全部的光源功率输出，通过调制器物质的电光或声光效应来实现对传输光波的调制，比如外部电流可以改变入射光的传输特性。折射率的变化、极化方向的变化、传输方向的变化等，这些效应如果导致时延变化，则为相位调制；如果导致极化变化，则为强度调制。脉冲光输出可以通过阻断或改变光传输路径来实现。外部调制器将引入很大的耦合损耗，调制深度也有所限制，并且对于调制驱动功率也相对要求较高。

1.2.1 光源子系统

在卫星光通信系统中，光源是一个关键部件，因此采用的光源要容易调制，同时光源产生的能量要集中在一个很小波长范围

之内。卫星光通信系统中所采用的光源是激光二极管 (LD)。激光二极管是一种半导体 PN 结器件, 含有刻蚀或解理衬底作为反射面以增强 PN 结长的光场。因此, 激光二极管输出的激光功率比较高, 且聚光性也比较好。

对于卫星光通信使用的光源, 其调制带宽 (即光源可以承受多高码率的调制) 也是一个非常重要的参数。如果是一个具有非常窄的谐振腔的光源, 其调制带宽可以达到 $1 \sim 40\text{GHz}$ 。与射频通信相比, 具有巨大的带宽潜力。射频通信的调制带宽通常只有几百兆赫兹。

美国 JPL 实验室、加利福尼亚大学等都对光源系统进行了各方面的研究, 如电磁波在自由空间的传播损耗情况, 给定发射距离和发射孔径时接收能量密度与光源波长的关系, 光在大气中的传播、吸收和散射, 大气模型、大气起伏、探测器性能、激光光源性能、寿命和技术、滤波、瞄准、信道噪声等因素^[1~9]。考虑到上述各种因素之后, 美国不同链路的光源波长选择如表 1-1, 该表中光源波长是在考虑了各种探测器的参数情况下选择的^[10,11], 各探测器参数见表 1-2、表 1-3^[12]。

表 1-1 美国各激光链路的光源波长

激光链路	LEO-GEO	LEO-LEO	LEO-Ground
光源波长/nm	850	850	534

表 1-2 光电二极管 (PD) 参数

探测器	波长范围/nm	探测灵敏度	量子效率	增益
Si PIN	350~1130 峰值 850	0.1 (1064nm) 100 (850nm)	0.5 (1064nm) 0.9 (850nm)	1
InAs	1000~3800	0.04	0.85	1
HgCaTe	1000~5500	0.025	0.85	1

表 1-3 雪崩光电二极管 (APD) 参数

探测器	波长范围/nm	探测灵敏度	量子效率	增益
Si APD	400~1100 峰值 850	0.1 (1064nm)	0.4 (1064nm)	300
		50 (532nm)	0.8 (532nm)	
		100 (850nm)	0.9 (850nm)	
Geiger-Mode Si APD			0.22 (1064nm)	$10^4 \sim 10^6$
AlGaAs Staircase APD			0.8 (830nm)	300
InGaAs APD	800~2200 峰值 1600	0.4 (1600nm)	0.13 (830nm)	50
			0.14 (1064nm)	
Ge APD	800~1800		0.78 (1064nm)	200

日本不同链路光源波长范围见表 1-4。欧洲不同链路光源波长见表 1-5。

表 1-4 日本不同链路空间光通信系统所采用的光源波长

激光链路	LEO-LEO	LEO-GEO	LEO-Ground
光源波长/nm	800 附近	808 (探测信标) 825 (上行链路) 853 (下行链路)	514

表 1-5 欧洲不同链路空间光通信系统所采用的光源波长

激光链路	LEO-LEO	LEO-GEO	LEO-Ground
光源波长/nm	800 附近	801 (探测信标) 819 (前向链路) 847 (后向链路)	534

从上面表中可以看出, 美、欧、日在 LEO-LEO 和 LEO-GEO 链路中, 波长都采用 800~850nm 范围的 AlGaAs 激光器,