

# 无线激光通信概论

柯熙政 席晓莉 编著

北京邮电大学出版社  
·北京·

## 内 容 简 介

本书对国内外最新资料中最成熟、最稳定的部分进行了合理的取舍,系统地介绍了无线激光通信系统的工作原理,对无线激光通信中涉及到的激光在大气、海水中的传播问题进行了详细论述;从工程应用角度对无线激光通信的信息编码进行了系统的分析比较,同时介绍了空间激光通信 ATP 系统的工作原理,对 ATP 系统的特性进行了详细分析。作为无线激光通信系统的应用,最后介绍了几种典型的无线激光通信系统。

本书兼顾理论分析与工程实际的统一,既可作为高等院校通信工程类学生的教材,又可作为工程技术人员参考书籍。书中每章都附有思考题和参考文献,以备读者检查所学的知识,并可将参考文献作为进一步学习相关知识的线索。

### 图书在版编目(CIP)数据

无线激光通信概论/柯熙政,席晓莉编著. —北京:北京邮电大学出版社,2004

ISBN 7-5635-0893-7

I. 无... II. ①柯...②席 III. 光通信—概论 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 041606 号

---

书 名:无线激光通信概论

编 著:柯熙政 席晓莉

责任编辑:王琴秋

出 版 者:北京邮电大学出版社(北京市海淀区西土城路 10 号) 邮编:100876

发行部电话:(010)62282185 62283578(传真)

经 销:各地新华书店

印 刷:北京源海印刷厂

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:19.75

字 数:490 千字

印 数:1—3 000 册

版 次:2004 年 8 月第 1 版 2004 年 8 月第 1 次印刷

---

ISBN 7-5635-0893-7/TN·327

定价:29.60 元

·如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系·

# 前 言

现代人类社会有三大基础结构,那就是交通、能源和通信。交通就是转移人或物资;能源,如电力、煤炭和石油等,就是传递能量;而通信就是传递消息。通信作为人类社会的“神经系统”,无论是对物质文明还是对精神文明的建设,都具有深远的影响。当代社会基础结构真正重大的变革不在运输与能源,而将发生在通信领域,光通信的崛起并逐渐引起人们的重视,就是这种变革的一个重要组成部分。人们利用光传递消息的技术(方法)由来已久,总的来说可以划分为三个阶段。第一阶段是第二次世界大战前,可以上溯到公元前700多年前。这一阶段是人们利用光进行通信的朴素应用阶段,如利用燧进行报警,传递边防敌人入侵的消息,通过接力延长通信的距离,通过火光或燧的多少代表不同的内容,相当于现代的通信编码。即使到了近代,军队还利用旗语进行通信联络。江河、港口的航标灯就是通过灯光传递导航信号,轮船通过灯进行相互联络。在这一阶段,人的视觉就相当于“光信号检测器”,但只能在人视觉的能见度范围内传递消息,依赖于人类自身的敏感特性。第二阶段从第二次世界大战开始,以贝尔发明光电话为标志,人类开始了利用光进行通信的新时代。这一时期利用的光源都是非相干光,其目的都是完成军事通信。人们开始采用红外光源进行通信,增加了通信的保密性,但由于采用非相干光源,信道噪声大,限制了光通信在实际中的应用。这期间最大的技术进步是采用电子检测,提高了光通信的自动化程度,通信码率提高到了实用的程度。第三阶段以西方发达国家进行空间光通信为标志,开创了人类利用激光进行信息传递的新时代。由于采用了相干光源——激光,通信距离进一步增大,可以进行卫星—卫星、卫星—地面的通信,码速率达到了1~2 GHz的水平,使人们增强了对激光通信的研究热情,各个著名的实验室和一些大国为特定的军事用途在激光通信领域展开了激烈的竞争,从单元技术到系统集成都取得了重要的突破。这一时期人们开展了光束自动对准技术的研究,进行了各种通信编码技术在激光通信领域应用的探索。可以说,凡是人们在传统射频技术领域内成熟的技术,都有人在试图将其应用到激光通信领域,以提高激光通信的质量。

现代激光通信的发展方向应该是光机电集成技术。采用系统集成技术之后,可以增强通信系统的可靠性,提高通信码速率,完成光束的自动对准。克服大气信道对激光通信的影响将是一个相当长的研究阶段,一方面人们研制功率更大的激光器,抑制大气对激光信号的衰减,另一方面探索采用新的激光器,在大气“窗口”进行激光信号传递,以期解决激光大气通信中的信号衰减问题。光机电集成激光通信技术的发展,将会为人类解决“最后一公里接入问题”提供新的契机,使人类的通信方式更加灵活,通信的频谱更加广泛。

本书是作者在承担相应的科研和教学任务的背景下完成的,是对该领域现阶段相关技术的有机融合,从信号的编码调制、信号在大气中的传递特性一直到信号接收,进行了系统的总结和提炼。第1章是对激光通信领域的简单回顾,介绍了激光通信发展的自然沿承性,分析了无线激光通信的特点。第2章讨论激光通信系统。详细介绍了发射机和接收机设计中需要解决的问题。从电磁理论着手,分析了发射光场的特点、检测光场的性质,介绍了外差检测的原理及其存在的问题。从统计理论的观点阐述了光电检测的统计基础,对激光通信的光路进行了详细分析。第3章介绍了光束自动跟踪及瞄准的问题,分析了APT(Acquisition, Pointing and Tracking)系统的动态特性,简单分析了空间稳定平台与系统误码率之间的关系。第4章讨论激光通信常见的编码技术,着重分析了脉冲位置调制编码(PPM)技术,讨论了激光通信系统的信息量。第5章介绍激光通信系统的时间同步技术,这是正确解调编码信息的基础。第6章分析光CDMA技术。第7章分析了大气激光通信信道,讨论了大气对激光信号的衰减、散射等问题,着重讨论了湍流对激光通信的影响。第8章简单介绍了水下激光通信技术。考虑到不同读者的知识背景,书未增加了简单的附录,用以加强对教材中内容的理解。

本书是对现有研究成果的总结,基本沿承了前人的研究结果。为了读者查阅引用文献的方便,编者尽量著录国内作者发表的成果,对于国外的一些研究成果,也尽量参阅国内研究者撰写的综述性文章,力求做到对现有研究进展进行融合与提炼,既可以用作电子、通信及光信息专业学生的教科书,又可以作为从事该领域科研、设计及运行维护人员的参考书。本书是对前人研究成果的综合,不可避免地对采用的材料进行了取舍,文中尽可能对引用的参考文献加以著录,但很难保证没有遗漏和错误,敬请有识之士不吝指正。

编者感谢参考文献的作者,是他们的创造性工作推动了人类激光通信技术的发展,才使编著者能够对该领域的科学技术问题有系统深入的了解,感谢他们允许我们引用他们的研究成果。

本书是编著者在西安理工大学讲授“无线激光通信”课程的基础上完成的,首先感谢西安理工大学对我们工作的支持。感谢我们的研究生丁德强、杜安源、刘长城、薛菊华、王瑞、朱代先等,他们对书中的内容进行了仔细的讨论,使本书的编写体系得以不断完善,研究生李建勋、刘长城和王瑞撰写了书后的附录,在此一并致谢。

作为教材,应该介绍给读者最成熟、稳定的科学内容。鉴于无线激光通信是一门正在发展的技术,我们在照顾到一般读者的基础上,对正在发展的激光通信技术也作了适当的介绍,以期对进一步进行研究的学者和研究生有所帮助。书中带\*的章节是比较难的内容,本科生可以不学习该部分内容,跳过这些章节不影响全文的连贯性。本科生学习本书约需40学时,研究生学习全书约需54学时。使用者可以根据需要进行取舍。

本书是编者从事西安理工大学中青年教师特色与创新研究计划“无线激光通信系统研制”和陕西省教育厅专项科研计划项目“无线光宽带接入网通信协议研究”课题中完成的,本研究计划同时列入陕西省“火炬计划(2002KH52)”。

编者

2003年12月于西安理工大学

# 目 录

第 1 章 概 论.....	1
1.1 由微波通信到激光通信 .....	1
1.2 无线激光通信的基本框架 .....	7
1.3 空间激光通信进展.....	10
1.4 激光器技术的发展.....	15
1.5 激光通信关键技术.....	20
1.6 光—电通信系统的相似性.....	21
1.7 无线激光通信系统的特点.....	23
习题一 .....	27
本章参考文献 .....	27
第 2 章 无线激光通信的系统模型 .....	29
2.1 系统模型.....	29
2.2 光发射机.....	31
2.3 发射光场.....	33
2.4 检测光场.....	36
2.5 光电检测.....	38
2.6 光电检测的统计基础* .....	42
2.7 非相干检测和相干检测.....	46
2.8 激光与激光器.....	53
2.9 光学透镜与光路.....	60
2.10 一种典型无线激光通信系统* .....	66
习题二 .....	81
本章参考文献 .....	82
第 3 章 瞄准、捕获和跟踪(APT).....	84
3.1 光束的瞄准.....	84
3.2 空间捕获.....	86
3.3 空间跟踪.....	91

3.4	APT 系统中的光学天线 .....	93
3.5	APT 系统的结构与工作原理 .....	102
3.6	位置检测原理 .....	108
3.7	自动跟瞄系统* .....	118
3.8	APT 系统的动态特性* .....	124
3.9	空间平台抖动与误码率* .....	131
	习题三 .....	140
	本章参考文献 .....	141
<b>第 4 章</b>	<b>通信编码 .....</b>	<b>144</b>
4.1	信源编码 .....	144
4.2	光 PPM 调制 .....	148
4.3	多脉冲 PPK 调制* .....	157
4.4	光 PPM 通信的 Turbo 编解码及性能* .....	161
4.5	光 PPM 取样信号的最大似然解调* .....	165
4.6	光通信中信息量 .....	169
4.7	译码系统的误差概率* .....	173
	习题四 .....	177
	本章参考文献 .....	178
<b>第 5 章</b>	<b>时间同步 .....</b>	<b>180</b>
5.1	脉冲到达时间估计与边沿跟踪 .....	180
5.2	PPM 的字同步技术 .....	186
5.3	PPM 通信时隙同步器 .....	187
5.4	触发计数式帧同步器 .....	191
5.5	判决式帧同步器* .....	194
5.6	相关式数字锁相环时隙同步器* .....	196
5.7	码时钟提取方法* .....	199
5.8	PPM 接收机的最佳帧节同步* .....	203
5.9	时间同步的误差分析 .....	207
	习题五 .....	209
	本章参考文献 .....	209
<b>第 6 章</b>	<b>光 CDMA 技术 .....</b>	<b>210</b>
6.1	概 述 .....	210
6.2	信道模型 .....	214
6.3	信道编码 .....	216
6.4	多用户检测技术* .....	222

6.5 地址码的构造与实现 *	224
习题六	226
本章参考文献	226
第7章 光信道	227
7.1 空间随机场 *	227
7.2 激光在大气传输中的损耗和折射	234
7.3 大气信道对激光信号的衰减	239
7.4 激光在湍流大气中的闪烁现象	245
7.5 激光光斑束心的抖动	250
7.6 背景光及其对信号检测的影响	258
7.7 光滤波器 *	260
习题七	264
本章参考文献	266
第8章 水下激光通信 *	267
8.1 水下通信发展现状	267
8.2 水下激光通信中的激光器	270
8.3 水下激光通信信道特性	275
8.4 激光对潜通信的信号检测方法	278
8.5 激光对潜通信中的 RS 码时域编码	284
8.6 分集多路信号的自适应增强	286
习题八	287
本章参考文献	288
附录 A 常用物理常数	289
附录 B 泊松分布及泊松过程	290
附录 C 二阶系统的动态响应及其分析	293
附录 D 合流超几何函数简介	297
附录 E 贝塞尔函数	299
附录 F $\Gamma$ 函数	303
附录 G 几何像差	305

# 第 1 章 概 论

---

人们利用光通信具有悠久的历史,从古代的烽火传递消息,到近代军队的“旗语”,都是光通信的朴素应用,而现代的光纤通信,更是将光通信推向新的高度。光纤通信以其极高的通信码率得到了人们的广泛应用,但与微波通信相比,光通信以其灵活的通信方式在某些领域仍有不可替代的作用。无线激光通信结合了微波通信和光纤通信的优点。

无线激光通信是指利用激光束作为载波在空间(陆地或外太空)直接进行语音、数据、图像信息双向传送的一种技术,又称为“自由空间激光通信”(Free Space Optical Communication)、“无纤激光通信”或“无线激光网络”(Wireless Optical Network)。通信的目的就是把信息由一个地点传递到另一个地点。传统的无线通信系统中,信息的转移几乎都是把信息迭加在电磁波上完成的,然后把已调载波发送到目的地。无线激光通信以激光束作为信息载体,不使用光纤等有线信道的传输介质。早期的研究应用主要是在军用和航天上,随着无线激光通信各个单元技术的不断发展,近年来逐渐应用于商用的地面通信,各个单元技术也在逐步完善,日臻成熟。

## 1.1 由微波通信到激光通信

### 1.1.1 光通信发展的历史

公元前 700 多年前,我国就已经利用烽火台进行火光通信,而在欧洲只是到了公元前 5 世纪才出现的。古希腊人在特洛伊战争中,攻克了小亚细亚的特洛伊城,他们就是利用火光通信将捷报跨过爱琴海传递回希腊的米康。

我国古代的烽火台就是一种最简单的光通信系统:烽火就是光源,调制方式是点燃烽火与熄灭烽火,这是最简单的二进制编码调制方式;传输介质是大气;光探测器是人的眼睛。这种古代的烽火台通信系统已包括了现代光电子系统中最基本的技术单元:发射、调制、接收(眼睛)、解调(人的大脑)。但是,这种原始的系统有许多不足和缺点:第一,传送的信息量太少,只能告诉人们有敌人(烽火燃)和无敌人(烽火灭)这两种信息,至于敌人多少,谁带领,携带什么武器,从哪个方向来等等,都无法给出;第二,传送距离太近,只能传到人眼看得到的地方;第三,抗干扰能力差,雨雾天很难传送;第四,保密性很差,点燃烽火后,不仅自己人能看见,敌人也能看见;第五,不能进行识别,城池一旦被攻占,敌人也可根

据需要点燃烽火,但自己无法识别究竟是谁点的烽火;第六,响应速度慢,从点火到火光冲天人们能看到,没有十几分钟到半个小时是不行的。

到了公元前 102 年,我国的烽火台通信有了新的发展。汉武帝重修长城,在城垣上每隔 5 公里左右修一个烽火台,用来报警。当时利用接力的方式增加通信距离,把报警装置分为烽表、烽烟和营火三种,对应入侵敌人的多寡和严重程度,这就类似于现代的通信编码,与“烽火点燃”和“烽火熄灭”的编码方式相比,这种编码方式具有较多的信息容量。烽表由红布、白布缝制成帆状物,悬挂在高杆上,根据敌人入侵的远近、多寡和严重程度,来增加这些帆状物。这种通信方式非常简单。近代军队中利用的旗语就与此类似,现代江河港口的航标灯,就是利用光信号来传递导航信息。

到了近代,当电话出现之后,人们就开始了用光进行通信的研究。1880 年,贝尔研制成功第一个光学电话,1881 年他宣布了《利用光线进行声音的复制与产生》的论文。贝尔采用弧光灯作为光源,调制器直接采用话筒的薄膜,弧光灯发出的光线光束投射在薄膜上,薄膜随着声音的振动而振动,反射光线的强弱就代表着声音的变化规律。接收端采用一个大型抛物面反射镜和一个硅光电池。光电池接收到反射镜反射来的、强弱随着发射端声音变化的光信号后,将其转换成光电流。最后将光电流传递给听筒,就完成了信息的传递。

在第二次世界大战期间,人们曾用硅弧光灯作为发射机,用硅光电池作为接收器件,在能见度好的情况下,通信距离可以达到 5 哩。为了增加通信的保密性,人们将光源换成红外光源。西门子-哈萨克公司曾为德军研制军用红外线通信机,采用乙炔光源和 0.3 米口径的反射镜,有效通信距离达到 5 千米。美国、日本和前苏联都曾经使用过红外线光通信系统。这一时期所采用的光源都是非相干光源。

进入 20 世纪 80 年代以来,国际上著名的实验室和发达国家都十分重视无线激光通信的研发,大气激光通信已到几近实用的程度。Terabeam 公司曾在悉尼奥运会上成功地使用 FSO 设备进行图像传送,并在西雅图的四季饭店成功地实现了利用 FSO 设备向客户提供 100 Mbit/s 的数据连接。Aitfiber 公司则在美国波士顿地区将 FSO 通信网与 SONET 通过光纤网借助光节点连接在一起,完成了该地区整个光网络的建设<sup>[14]</sup>。

从贝尔发明光电话到第二次世界大战,光通信使用的都是热光源,是非相干光。这种光源调制困难,硅光电池的内部噪声也很大,话音质量差,红外线在大气中传输的损耗也很大,这极大地限制了光通信的发展和运用。激光技术的出现,使得光通信有了转机,才开创了光通信的新纪元。

### 1.1.2 我国现代通信事业的发展历程<sup>[7]</sup>

从 19 世纪后期至 20 世纪初期,莫尔斯(Morse)发明电报、贝尔(Bell)发明电话、马可尼(Marconi)发明无线电,这三大发明对人类社会产生非常重大和深远的影响,它们标志着人类通信和信息事业新纪元的开始。

从 20 世纪 20 年代起,通信在我国开始建设、运营,人们称之为“电信”(Telecommunication),包括市内电话、长途电话、电报、国际无线电信等等。在 20 世纪 30 年代,我国市内电话用铅包电缆,长途电话则是架空明线,国际电信主要依赖短波无线电报。新中国成立之后,为了满足我国社会对通信业务的需求,我国的通信事业也随之开展起来。

## 1. 载波电话的发展

由于我国地域辽阔,新中国成立后,国家特别加快推动有线通信长途电话建设。20世纪50年代上半期,为了更有效地利用架空明线线路,以适应急剧增长的长话业务量,在一对架空明线上,先是用话音电路以上的频谱加装3路载波电话,接着用3路载波以上的频谱加装12路载波电话。采取载波遏止、单边带传输方式。在话音频带4kHz以上,先装3路去方向,后装3路来方向,每路各占频带4kHz,这是3路载波电话,最高频率为30kHz。在该频谱以上,又装12路去方向和12路来方向,也是每路各占频带4kHz,这是12路载波电话,最高频率140kHz。这样,一对明线可以同时传输 $1+3+12=16$ 路双方会话的电话通信,线路的利用率显著提高。由于每路频带在线路频谱上依次排列,载波电话就是频分复用的思想。到了60年代中期,我国尝试设计制造中同轴电缆所用1800路载波电话系统。

## 2. 由模拟向数字过渡

20世纪50年代下半期,半导体晶体管在国际上开始应用,晶体管很快在电子电路中替代电子管,通信使用的电子管式载波电话终端机,就可能很快改成晶体管式载波机。20世纪60至70年代起,国际上众多的计算机都利用晶体管集成电路,应用越来越普遍。相应地,计算机的数据信息处理和传输越来越重要,话音编码技术利用脉冲编码调制(PCM)趋于成熟,模拟电话信号300~3400Hz转换为数字电话信号64kbit/s,话音质量得到保证。于是国际上开始出现从模拟通信向数字通信过渡。

## 3. 光纤通信的兴起

光纤通信和无线激光通信同属于光通信范畴,光纤通信属于有波导的光通信,无线激光通信属于大气波导的激光通信。20世纪60年代,高锟和他的合作者霍克汉(G. A. Hockham)在进行一系列理论和实验研究之后,提出用光纤进行长距离通信的建议。他们预言光波导材料的衰减率有可能从当时的1000分贝每千米(即1000dB/km)降低到20分贝每千米(即20dB/km),他们证明单模光纤每秒有可能传送十亿位数字信号,并论证了通信对单模光纤的要求和特性。他们认为关键技术是研制损耗低于20dB/km的光纤材料。这一指标在1966年实在难以实现,但是在高锟的激励下,仅仅过了4年,就有人宣布达到了这个指标。从此,光纤通信技术开创了人类光通信的新纪元。

20世纪60年代下半期,光纤通信逐渐引起了人们的重视。20世纪70年代,玻璃光纤拉制成功,纤芯直径有 $62.5\mu\text{m}$ 和 $10\mu\text{m}$ 两种,包层直径都为 $125\mu\text{m}$ ,在某些光波段确实有较低的光纤损耗,且色散也小,可把很窄的数字脉冲传送至较长距离而不需要进行光放大。1978年光纤光缆投入市内电话网线路试用,它们传输几十兆比特每秒的数字信号。自20世纪80年代起,从多模光纤至单模光纤,从短波长 $0.85\mu\text{m}$ 至长波长 $1.31\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ ,光纤传输性能优于原来长期使用的铜线电缆,也优于同轴管电缆。一般认为短距离线路使用多模光纤,中长距离线路使用单模光纤,逐步替代铜线电缆。新建线路将是光纤光缆,不再采用铜线电缆。尤其在中、长距离传输线路总是使用长波长单模光纤,其次在市内网的局间线路,也陆续使用长波长单模光纤。

## 4. 综合业务数字网

音频、视频和数据三类不同信源发出的信息业务应该能够综合起来使用统一的通信

网称之为综合业务数字网(ISDN: Integrated Services Digital Network)。数字通信网又利用异步转移模式(ATM: Asynchronous Transfer Mode)承担复接和交换功能。它采用信元(cell)制,把每53个字节(byte)作为一个信元,实际上就是一个分组(packet),不过它是固定长度的分组。信元交换(cells witching)实际上就是快速分组交换(FPS: Fast Packet Switching)。不论信源发出什么信息(音频、视频或数据)ATM都同等对待。

## 5. 卫星通信

自从前苏联发射成功第一颗人造卫星开始,人类就首先进行卫星通信的研究。20世纪60年代,国际上发射了3颗人造卫星,定位于赤道上空36000 km高度的平面,围绕地球均匀间隔分布。卫星就在这样高度的平面随着地球自转运行。卫星相对地面上看的位置是静止的,因而这一高空轨道称为GEO(Geostationary Earth Orbit),卫星相对对地球同步运行,因而称它们为同步卫星。这样,3颗卫星在轨道上运行就可以覆盖地球上居住人口的面积。因此,同步卫星可以合适地用于国际和远地通信。每一卫星内部各装置同样的转发器(transponder)。在地面上适当地点设置卫星地面站(Earth Station),装置适当大小的收发信机和对准卫星的抛物面收发信天线。地面站的发信机向卫星发送信号和无线电波,属于上行线路;对方地面站的收信机从卫星接收信号和无线电波,属于下行线路。就这样利用上行和下行线路和对方可以传送信号和互相通信。

20世纪70年代,我国就在几十个大城市设置了一定规模的卫星地面站,利用这样的同步卫星与有关国家开通国际通信,国内有些地点也利用同步卫星与边远地区开通直达通信。还可以经过同步卫星按需要传送国际电视节目,或者向边远地区传送电视节目。我国的卫星广播电视是1985年正式开始的,中央电视台利用高空通信卫星向全国省级电视台传送中央广播电视节目,其效果优于过去依赖地面利用微波或短波播送的方式;并且利用卫星数字压缩技术传送广播电视,提高各地转播中央和省级的广播电视信源质量并扩大广播电视的人口覆盖率。

## 6. Internet 兴起

20世纪90年代中期,国际互联网(Internet)兴起,吸引越来越多的计算机用户踊跃“上网”,也吸引人们更多地购置和使用计算机。人们有了计算机终端,就可以在网上快速实现国内和国际通信,并检索各种有用信息。

## 7. 电子瓶颈

20世纪90年代中期起,由于用户信息业务量的迅速增长,要求通信网相应地加大容量以适应需要。自从早些时候从模拟通信网过渡至数字通信网,利用TDM技术,数字群系列进化至SDH,最高一级的数字速率10 Gbit/s,这是电的TDM(E-TDM)在目前阶段能够做到的最高速率。光纤传输线路每一光载波受到TDM数字信号的调制,一根光纤有能力传输该TDM最高数字速率为10 Gbit/s,但不能再提高,因为这是电的TDM的极限,常称“电子瓶颈”。

通信网络的发展已经经历了两代,第一代是全电网络,它的容量已经远不能满足要求,第二代是用光纤取代电缆后形成的电光网络,这是目前正广泛使用的网络。光纤通信的高速率和大容量等优越性能已经使人们认识到光纤通信取代传统的电子通信的必然趋势,但目前,在光通信系统中的电子线路严重限制了光纤通信优势的发挥,全光网络即是基

于克服“电子瓶颈”这一局限性的第三代网络。

人类通信发展的历史,由 HF、VHF 到 UHF 以至毫米波,调制方式由调幅、调频、单边带到数字调制,通信方式由单工单信道对讲到双工多信道共用;多址方式由 FDMA、TDMA 到 CDMA,通信业务由通话为主增加数据、图像到多媒体业务;通信规模由单机到系统,由专线到网络;网络结构由单一网到多区网,由全电网络、电光网络以至正在发展的全光网络;网络制式由大区制到蜂窝小区制;传播环境由地面室外环境、室内环境、室外至室内环境到卫星环境;系统覆盖由有限服务区、国内服务区、区域服务区至全球服务区;通信环境由水上、陆地再空中到陆海空一体化以至地下、水下和深空;通信容量由小容量、中容量、大容量到超大容量以至满足全球个人通信的需求;通信用户由军政机要用户、业务用户到公众用户,亦即由专业网到公众网;移动终端体积由人背马驮至便携、手持以至袖珍;重量由几十千克、几千克到几百克以至几十克;器件由电子管、晶体管、集成电路、大规模集成电路至超大规模集成电路与微处理器;设备由硬件为主到硬件+软件以至软件为主的软件无线电台应运而生。

### 1.1.3 无线激光通信

目前主要的通信传输手段有微波、光纤等。微波通信与有线通信相比,可节省大量有色金属,并易于跨越复杂地形;可以较灵活地组成点、线结合的通信网,使一些海岛、山区、农村等偏远地区的用户较方便地利用干线进行信息交换。但相对于光纤通信系统,其频带窄,信道容量小,码率低,尚有许多不足。光纤通信系统的线路容量较大,不易受外界干扰,但必须有安装光缆用的公用通道,当遇到恶劣地形条件时,工程施工难度大、建设周期长,费用高。随着通信信息量的增大,扩充网络带宽资源,提高通信流量已成为当前通信事业应该面对的重要课题。光无线通信结合了光纤通信与微波通信的优点,既具有通信容量大的优点,又不需要铺设光纤。它以激光束作为信息载体,是不需要任何有线传输媒介的通信方式,可用于空间及地面间通信,其传输特点是光束以直线传播。作为对微波通信的革命,光无线通信系统得到人们的普遍重视。近年来,随着相关元器件工艺的成熟,预计无线激光通信系统很快将会进入商业应用阶段。

目前,卫星间只能以微波进行通信。微波的物理特性决定了它不可能达到与光纤通信一样的带宽。这样就造成地面与卫星联通时出现了瓶颈。拓宽星间链路的一种解决方法是多发射卫星,然而地球的外空间资源有限,发射卫星要受到一定的限制。卫星间必须是无线通信,卫星间大容量通信的矛盾只能是通过发展卫星光通信来解决。根据光学基本原理,卫星间使用激光通信既具有微波通信的可靠性,又具有高码率、通信容量大的优点。同时,由于激光的波束发散角小、光学天线增益高、器件调制速率高、方式灵活、所需射频功率小,因此可以提高空间卫星通信系统的通信质量,扩展通信范围,连接更多的地面站、空间观测卫星等,还可以减少不同区域用户通信的种种限制,减小星上载荷的体积和重量,增强通信的保密性、抗干扰能力,提高稳定性,改进各种观测数据、信息的集中处理能力和快速反应能力等。空间微波通信和光通信所用的频段如表 1.1 所示。在地面大气激光通信领域,目前已经有多家公司的设备投入实际运行,标志着无线激光通信实用技术已经开始。

表 1.1 空间通信的微波和激光频段

波段	S 波段	C 波段	Ku 波段	Ka 波段	LD 激光	DPL 激光
波长	1.5~7.5cm	7.5~5cm	2.5~2.16cm	0.75~1.17cm	0.8~0.9 $\mu\text{m}$	1~1.55 $\mu\text{m}$
频率(GHz)	2~4	4~6	12~14	27~40	$(3.34\sim 3.75)\times 10^5$	$(1.94\sim 3)\times 10^5$

### 1.1.4 微波通信与无线激光通信的特点

从无线电频谱来看,微波通信和激光通信的主要特点表现在以下几个方面:

#### 1. 可利用的频带宽度的差别

从表 1.1 可见,激光的频带宽度超过 105 GHz,大约是 3 个微波波段带宽总和的 1 万多倍。目前在卫星中已利用的微波带宽大约为 2 GHz(Ku 波段和 C 波段)。激光空间通信试验的设备,如美国航天局(NASA)的哥达德宇航中心空间激光通信实验样机容量为 1.2 Gbit/s,大约相当于 2.4 GHz 通频带,和现今卫星通信所用微波频带相当,但是从另一个角度来看,已开发利用的微波频带已接近其可利用的极限,很难再进一步扩展。而激光则不然,将人们在微波频段成熟的技术拓展到激光通信后,可立即扩大利用频带。目前激光已成功地用于光纤通信中,其中 10 Gbit/s 左右的光纤系统已实用化,140~560 Mbit/s 系统已商业化,美、日等国已研制成码率大于 100 Gbit/s 的光纤系统。将光纤通信的成熟技术用于空间或大气激光通信领域,可立即扩大通频带几个数量级。

#### 2. 相关器件、设备尺寸的差别

根据电磁理论中的波长同比定理,理论上讲,用于电磁波发射、传输和接收的器件和设备尺寸与波长成正比。这就使光通信设备的尺寸、重量大大减小。例如 NASA 准备在自由号空间站上搭载的 1.2 Gbit/s 激光通信设备不到 200 磅(约合 91 kg,不含太阳能电池),而同等通信容量的微波设备,重量为 1 吨左右(含太阳能电池、天线)。

#### 3. 波束质量的差别

电磁波的远场发散角受衍射极限角  $\theta$  限制,  $\theta = 1.22\lambda/D$ ,其中  $\lambda$  为电磁波波长,  $D$  为发射天线(望远镜)的口径。例如 NASA 的空间激光通信系统,采用直径为 25 cm 的卡塞格伦望远镜,衍射极限角为 4  $\mu\text{rad}$ ,其实际远场发射角为 19  $\mu\text{rad}$ 。如要使  $\lambda = 2\text{cm}$  的 Ka 波段微波束质量达到同等水平,则其天线口径至少要 1000 m 以上,这显然是不可能实现的。实际卫星上的抛物面天线口径 1 m 左右,对 Ka 波段,远场发散角大于 10 mrad。波束发散角的差别,使电磁波能量的利用率不同,结果要求不同的发射功率。NASA 的激光通信系统总的激光平均发射功率为 200 mW,峰值功率 800 mW,通信距离大于 21 000 km (GEO-GEO)。如采用微波进行通信,则要用几台转发器,发射微波功率至少上百瓦。另一方面,波束发射角的差别,使激光通信中光束控制更为困难,而微波则无此困难。

#### 4. 抗干扰特性的差别

微波和激光通信系统都受背景辐射的影响,主要是太阳辐射被地球表面和大气层散射影响。太阳辐射在近红外波段(即空间通信激光波段)远比微波波段强。但是由于微波通信系统接收望远镜(天线)的视场比激光系统中大很多,加之微波还要受大气闪烁和地

球上其他人工电磁波的干扰,结果使微波噪声特性反而差很多。例如在存在背景干扰情况下,空间激光通信系统每比特接收 39~65 个光子,误码率能降到  $10^{-6}$  以下。假如按 60 个光子计算,换算成能量  $E_b = 1.46 \times 10^{-17} \text{ J/B}$ 。而国际电话电报咨询委员会(CCIR)标准规定,微波接收在  $10^{-4}$  误码率情况下,则要求接收饱和功率密度在  $-75.0 \text{ dBw}$ ,如以卫星天线面积  $1 \text{ m}^2$  和带宽  $70 \text{ MHz}(35 \text{ Mbit/s})$  计算,相当于  $E_b = 0.9 \times 10^{-15} \text{ J/B}$ ,约比激光情况高两个数量级,误码率还高两个数量级。

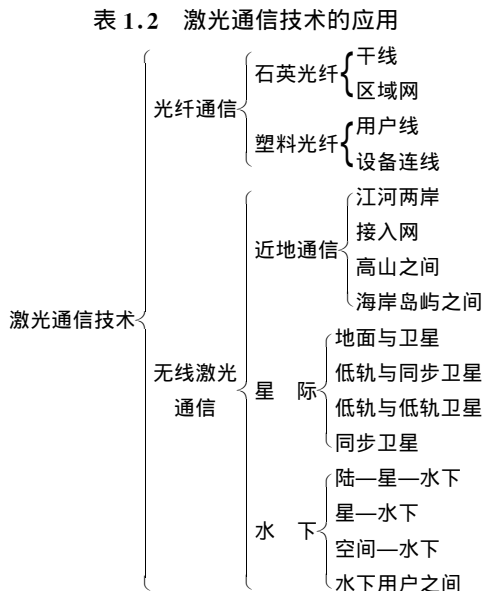
### 5. 大气传输特性的差别

地球大气气象条件对微波和激光的传输都有影响,但对激光传输的影响要严重得多,对微波传输影响最大的是雨、云、雾,而且频率越高影响越大。例如降水量为  $100 \text{ mm/h}$  (暴雨),对  $6 \text{ GHz}$  的微波的损耗约  $0.5 \text{ dB/km}$ ,一般气象条件下可忽略其影响。而光波则不然,对  $0.83 \mu\text{m}$  的激光,在中等能见度的晴天,大气引起的衰减达  $0.7 \text{ dB/km}$ ,而一般阴霾天气,为  $3\sim 5 \text{ dB/km}$ ,在浓雾浓云中  $0.83 \mu\text{m}$  的激光的衰减可达  $100 \text{ dB/km}$  以上。

激光和微波各有其优点,一般认为,激光通信在空间站之间最为合适,在地球站之间或地球站与空间站之间,因为通信线路穿过大气,采用微波更为合适。在某些特殊条件下,采用激光通信作为无线电通信的补充。但随着大功率集成激光器件的出现,激光在大气中的传输衰减问题必将为人们所克服,而激光通信将会成为人类今后的主要通信手段。

## 1.2 无线激光通信的基本框架

激光通信按其应用范围可以划分为光纤通信和无线激光通信,其用途各不相同(在本书中,如不特别标明,激光通信表示无线激光通信)。无线激光通信既具有微波通信灵活机动的特点,又具有光纤通信码率高的优点,其误码率相对于微波通信要低。激光通信既可以作为空间通信的手段,又可以作为地面通信,也可以用于水下通信。激光通信主要包括收发信端机、跟瞄系统和调制/解调器。激光通信的总体构架如表 1.2 所示。



### 1.2.1 无线激光通信的应用场合

无线激光通信的应用主要包括三个方面:(1) 构成星际之间的通信链路,用于卫星之间、卫星与地面之间的连接;(2) 在地面岛屿与海岸之间、城市楼房之间、江河两

岸之间等场合的通信,也可作为接入网使用,解决“最后一公里问题”;(3) 用于水下通信,包括卫星与水下、岸边与水下以及水下潜艇之间的通信、水下摄影等。

表 1.3 列出了微波、毫米波和光波的有关参数比较。

表 1.3 微波、毫米波和光波的有关参数比较

波段	频率或波长	天线尺寸(m)	天线增益(dB)	3dB 带宽(度)
S-波段	2 GHz	2	30	5.25
Ka-波段	26 GHz	2	52	0.4
毫米波段	60 GHz	1	50	0.35
光波	$0.83 \mu\text{m}$	0.07	108	$6.7 \times 10^{-4}$

### 1.2.2 无线激光通信的基本原理

最简单的无线电通信系统都包括发射和接收两部分(如图 1.1 所示),发射机由高频发射器和振荡器组成。高频发生器用来产生高频的振荡,调制器使高频振荡的某一参数随信号的变化而改变,然后通过天线将已调电磁波发射出去。当已调电磁波通过空间传送到接收天线时,首先在接收天线上感生出同样变化规律的电流。检波器将高频电流恢复为原来的信号。



图 1.1 无线电通信系统概念图

最初的无线激光通信系统与无线电系统的结构大致相同,其原理如图 1.2 所示。待传送的信号经过编码器编码后,加载到调制器的激励器上,调制器的激励电流就随着信号的变化规律变化,激光器的输出信号经过调制器调制之后,相关的参数(强度、相位、振幅和偏振)就会按照相应的规律变化。最后经过光学天线变换为发散角很小的已调光束向空间发射出去。接收端接收到已调光束之后,首先经过光检测器转换成射频电流,然后馈

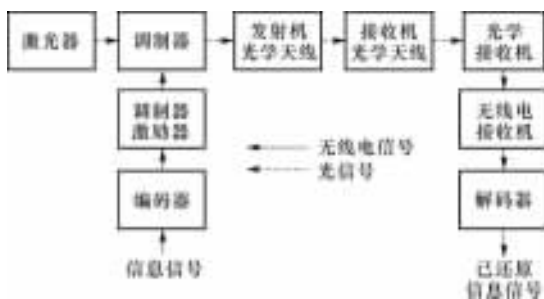


图 1.2 无线激光通信概念图

入射频检波器,最后由解码器解调出原来的信号。其中激光器相当于无线电通信中的射频发生器。发射机和接收机的光学天线相当于无线电天线。所不同的是激光通信采用光

频电磁波作为通信的载波。光学天线其实就是望远镜,相当于无线电通信中的天线,但明显的是尺寸的缩小。

空间光通信系统主要包括信号传输、空间信号的捕获、对准和跟踪(ATP)两部分。光信号远距离传输会产生极大的能量损失,接收到的信号往往非常微弱;同时,背景光(太阳、月亮、星体等)也会产生很强的干扰,这就大大增强了光信号的接收难度。在远距离、强干扰情况下,ATP是一个光、机、电结合的精密综合技术。由于光信号的发散角非常小,因此,信号的捕获、对准和跟踪是一个非常困难的过程。ATP系统的主要目的是保持光发送/接收终端精确定向。一般来说,定向误差是微弧度量级。因此,ATP系统是光通信成功的关键。无线激光通信的基本原理如图 1.2 所示,在发射端和接收端各有一个光收发信机,将需要传输的信息调制到激光信号上,通过大气信道传输到接收端。由于大气对光信号具有衰减效应,大气湍流还会引起光斑的漂移,因此在收发端机用自动跟瞄系统来修正大气湍流产生的光斑漂移。由于大气中存在着多种随机现象,接收机检测到的光信号会有强度的起伏和光斑中心的随机抖动。

图 1.3 所示就是空间光通信概念图。对于短距离的通信,例如楼房之间,可以采用望远镜直接瞄准,而对于通信距离较大的场合,比如数千米或者卫星之间的通信,就需要采用自动瞄准系统(ATP),以保证当空间信道介质变化引起光斑漂移时,自动调整光学天线,保证双方始终处于对准的状态。光天线接收到光信号后,经过光学分束,信标光的一部分至粗对准探测器,输出信号由粗对准控制、驱动粗对准机构完成粗对准;信标光的另一部分经精对准机构、分光片、分束片至精探测器,由精对准控制器控制精对准机构,完成双方的精确对准与跟踪。信号由信号光探测器检测。

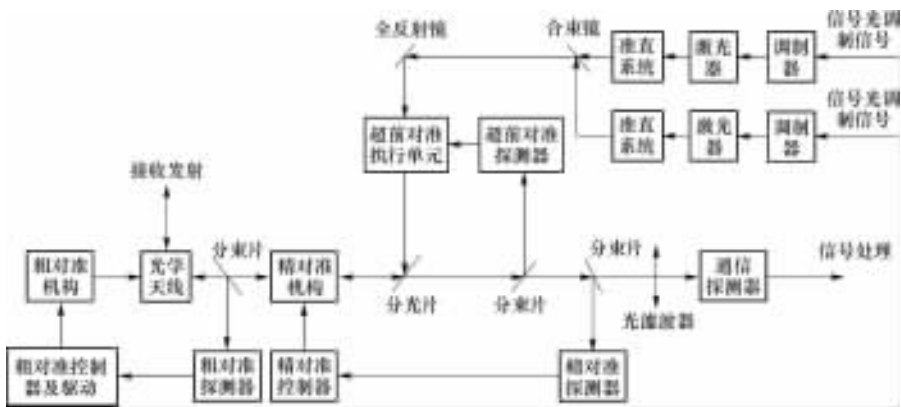


图 1.3 空间光通信系统总体概略图

光发射机主要包括激光器、调制/解调器等,核心是激光器。激光器需要两只,一只只是信标激光器,一只只是信号激光器。信标激光器用做 ATP 系统,信号激光器具有较好的光束质量和频率响应。激光器的波长应该选择比较成熟的技术,具有较好的可靠性。

光接收机主要包括光探测、低噪声前置放大和信号处理电路。光探测器主要功能是:(1)探测对方发来的信标光,确定信标光的位置,计算位置误差信号,驱动 ATP 单元,校正

接收天线方向,完成天线粗对准。(2)在粗对准完成后,利用信号光在四象限探测器上的位置,由ATP系统实现双方天线的精对准与跟踪。(3)探测对方发来的光信号,解调出有用的信息。

信号源的信号可以是图像、数据或声音,经过编码后,调制为双方约定的格式,由天线发射出去。编码可以采用开关键控(OOK)、相位调制编码(PPM)等。

### 1.2.3 通信信道

大气中的各种自然现象(雨、雪、雾、云、霾、湍流)对光信号的传输都有影响,但它们对不同波长的光信号的衰减是不同的,因此,可以通过选择合适的波长来保证光信号传输足够远的距离。在水下激光通信之中应当选用蓝绿激光器,因为蓝绿激光在水中的衰减比较小,可以传送比较远的距离。在介质中适合某一频段激光传送的波段我们常常称之为“窗口”。图1.4就是光波在大气中的传输衰减,实际工程中人们总是选择衰减比较小的激光波长,用相应的激光器发送信号。

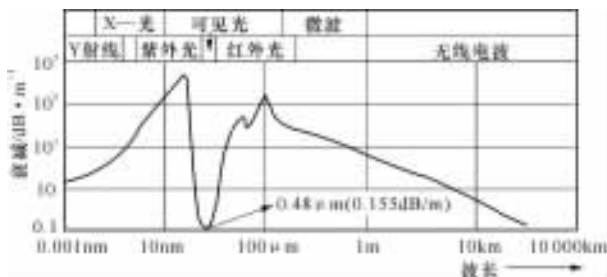


图 1.4 光波在大气中的衰减

## 1.3 空间激光通信进展

由于无线电频谱资源日益紧缺以及军事领域的需求,西方发达国家都在开发新的通信频段。图1.5所示是激光通信的应用示意图,激光可以完成卫星对地面、卫星与卫星、飞机与飞机以及飞机与卫星之间的通信。

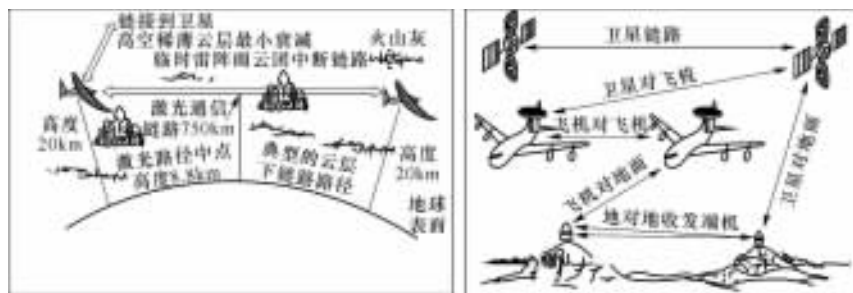


图 1.5 空间—地面激光通信示意图<sup>[3]</sup>