

半导体科学与技术丛书

# 超高频激光器与 线性光纤系统

〔美〕刘锦贤 著

谢世钟 祝宁华 郑婉华 吴晓光 译

陈良惠 校



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

半导体科学与技术丛书

# 超高频激光器与线性光纤系统

(美) 刘锦贤 著

谢世钟 祝宁华 郑婉华 吴晓光 译

陈良惠 校

科学出版社

北京

图字: 01-2010-2336 号

## 内 容 简 介

本书从激光二极管的动力学速率方程出发,对直接调制激光二极管的高频特性做出了科学归纳和剖析,重点阐述了高频直接调制下激光二极管的动态纵模特性和光纤链路中信号感应的噪声。在此基础上,本书讨论了宽带毫米波在光纤传输链路中的传输特性及其影响因素,特别介绍了掺铒光纤放大器对系统信噪比的影响,并针对实际的传输验证实验,阐述了减小光纤链路中各种影响因素的补偿技术。

全书体现了从理论基础到关键器件、部件再到整个传输系统的实际认知过程,特别适合从事光纤通信和光电子器件研究的科技工作者、工程技术人员和高级研究生使用。

Translation from the English language edition:  
*Ultra-high Frequency Linear Fiber Optic Systems* by Kam Y. Lau  
Copyright © 2009, 2010 Springer-Verlag Berlin Heidelberg  
Springer is a part of Springer Science+Business Media  
All Rights Reserved

### 图书在版编目(CIP)数据

超高频激光器与线性光纤系统/[美]刘锦贤著;谢世钟等译.—北京:科学出版社,2011

(半导体科学与技术丛书/夏建白主编)

ISBN 978-7-03-030871-9

I. ①超… II. ①刘… ②谢… III. ①超高频-激光器 ②光导纤维通信系统  
IV. ①TN248 ②TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 072951 号

责任编辑:张静 钱俊/责任校对:张怡君

责任印制:钱玉芬/封面设计:陈敬

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

\*

2011年5月第一版 开本:B5(720×1000)

2011年5月第一次印刷 印张:15 1/4

印数:1—2 500

字数:267 000

定价:38.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 《半导体科学与技术丛书》出版说明

半导体科学与技术在 20 世纪科学技术的突破性发展中起着关键的作用，它带动了新材料、新器件、新技术和新的交叉学科的发展创新，并在许多技术领域引起了革命性变革和进步，从而产生了现代的计算机产业、通信产业和 IT 技术。而目前发展迅速的半导体微/纳电子器件、光电子器件和量子信息又将推动本世纪的技术发展和产业革命。半导体科学技术已成为与国家经济发展、社会进步以及国防安全密切相关的重要的科学技术。

新中国成立以后，在国际上对中国禁运封锁的条件下，我国的科技工作者在老一辈科学家的带领下，自力更生，艰苦奋斗，从无到有，在我国半导体的发展历史上取得了许多“第一个”的成果，为我国半导体科学技术事业的发展，为国防建设和国民经济的发展做出过有重要历史影响的贡献。目前，在改革开放的大好形势下，我国新一代的半导体科技工作者继承老一辈科学家的优良传统，正在为发展我国的半导体事业、加快提高我国科技自主创新能力、推动我国国家在微电子和光电子产业中自主知识产权的发展而顽强拼搏。出版这套《半导体科学与技术丛书》的目的是总结我们自己的工作成果，发展我国的半导体事业，使我国成为世界上半导体科学技术的强国。

出版《半导体科学与技术丛书》是想请从事探索性和应用性研究的半导体工作者总结和介绍国际和中国科学家在半导体前沿领域，包括半导体物理、材料、器件、电路等方面的进展和所开展的工作，总结自己的研究经验，吸引更多的年轻人投入和献身到半导体研究的事业中来，为他们提供一套有用的参考书或教材，使他们尽快地进入这一领域中进行创新性的学习和研究，为我国半导体事业做出自己的贡献。

《半导体科学与技术丛书》将致力于反映半导体学科各个领域的基本内容和最新进展，力求覆盖较广阔的前沿领域，展望该专题的发展前景。丛书中的每一册将尽可能讲清一个专题，而不求面面俱到。在写作风格上，希望作者们能做到以大学高年级学生的水平为出发点，深入浅出，图文并茂，文献丰富，突出物理内容，避免冗长公式推导。我们欢迎广大从事半导体科学技术研究的工作者加入到丛书的编写中来。

愿这套丛书的出版既能为国内半导体领域的学者提供一个机会，将他们的累累硕果奉献给广大读者，又能对半导体科学和技术的教学和研究起到促进和推动作用。

夏建白

2005 年 3 月 16 日

## 中文版序言

本书为《超高频激光器与线性光纤系统》英文第二版（Springer 出版社，2011 年出版，ISBN：978-3-642-16457-6）的中文译本。本书书名并非是针对原英文版书名的逐字直译，本书作者和翻译团队认为本书书名更能够强调半导体激光器的高速调制动态特性及现今主流光纤通信系统方面的综合概述。

作者衷心地感谢清华大学和中国科学院半导体研究所的翻译团队。在陈良惠院士、谢世钟教授、祝宁华教授的共同努力下，我的作品能够以我的母语出版，与祖国的科研工作者和工程师共同分享。能为我的祖国科研工作作出小小的贡献，我感到非常的荣幸。

在我还是加州理工学院博士研究生的时候，就结识了来加州理工学院 Amnon Yariv 教授实验室访问的陈良惠院士。博士毕业之后，我加入了 Ortel 公司，作为该公司的创办首席科学家，开展了关于高速半导体激光器和线性光纤系统等相关产品的研发工作。在此期间，我与陈良惠院士建立了更深入的合作关系，开展了相关的学术交流。1986 年，应陈良惠院士的邀请，我访问了中国科学院半导体研究所并做了一系列的讲座和学术报告。同时也有机会参观了只在香港中学课本上学习过的祖国的名胜古迹。

1988 年，我离开了 Ortel 公司并获得了哥伦比亚大学的教授职位。离开 Ortel 公司后，我与陈良惠院士失去了联系。2000 年/2001 年由于我接受了脑部手术发生意外而不得不依赖轮椅生活。直到 2008 年通过香港科技大学的刘纪美教授，我与陈良惠院士重新建立了邮件联系。陈良惠院士得知我脑部手术意外之事后，非常积极地帮我咨询并联系了享有盛誉的神经外科医生菱峰大夫。他安排我在 2008 年 9 月去北京接受治疗，王茂斌大夫和物理治疗医师孙丽大夫也给予了我极大的帮助。就是在这次北京之行期间，我们萌生了翻译并出版《超高频激光器与线性光纤系统》中文版的想法。

2009 年，陈良惠院士联系了科学出版社，在与 Springer 出版社达成出版协议后，陈良惠院士、谢世钟教授和祝宁华教授共同组织了清华大学和中国科学院半导体研究所等相关领域的教授和博士研究生组成了翻译团队。Springer 的《超高频激光器与线性光纤系统》第二版将于 2011 年出版，科学出版社直接出版本书英文第二版的中文版，也就是现在呈现在读者面前的这本书。

刘锦贤

于伯克利，加利福尼亚州

2010 年 11 月

## 译者序

光纤通信凭借其高带宽低损耗的传输优势,已发展成为当今社会的主要通信手段. 宽带毫米波的光纤传输在无线接入网、卫星及雷达通信方面有着诱人的应用前景,备受学术界和工业界关注.

本书作者刘锦贤博士为美国加州大学伯克利分校的教授,自从1981年加州理工学院博士毕业后,一直从事高速半导体激光器及其高频调制应用方面的研究工作,先后组建 Ortel 及 LGC Wireless 公司,作为首席科学家,在高线性光纤传输器件及其无线接入网应用方面经验颇丰. 我们将作者在此领域的专著 *Ultra-high Frequency Linear Fiber Optic Systems (Second Edition)* 译成《超高频激光器与线性光纤系统》一书. 本书的特色之处在于根据动力学速率方程对直接调制激光器的高频特性做出了科学归纳和剖析,讨论了宽带毫米波在光纤传输链路中的传输特性及其影响因素,特别介绍了掺铒光纤放大器对系统性噪比的影响;并针对实际的传输验证实验,阐述了减小光纤链路中各种影响因素的补偿技术,全书体现了从理论基础到关键光纤器件再到整个传输系统的实际认知过程,特别适合于从事光纤通信和光电子器件研究的科技工作者、工程技术人员和高年级研究生阅读.

本书的翻译工作由清华大学和中国科学院半导体研究所共同完成. 全书共分18章及7个附录,其中第1章由吴晓光研究员翻译,第2章和第4章由祝宁华研究员翻译,第3章由刘宇博士翻译,第5章由陈硕夫翻译,第6章由王欣翻译,第7章由韩威博士、陈伟博士翻译,第8~11章由郑婉华研究员翻译,第12章及前言、序言由谢世钟教授翻译,第13~14章及附录A由陈明华教授翻译,第15~16章及附录E由陈宏伟副教授翻译,第17章、附录F和G由满江伟翻译,第18章由熊尚翻译,附录B~D由孙可翻译. 陈良惠院士总校全书,张红广和满江伟参加了校对工作.

该书的翻译出版得到了国家自然科学基金(编号:60736002,61021003,60820106004)的支持,译者在此对国家自然科学基金委员会表示衷心的感谢,同时感谢科学出版社对翻译工作的大力支持.

## 第二版序言

20 世纪 70 和 80 年代对半导体激光器的早期研究开发工作主要是在一些工业界实验室, 如美国的贝尔实验室、RCA 及海外的 NTT 和 NEC 等公司的实验室中进行的; 同时也在一些研究型大学, 如加州理工学院、加州大学圣芭芭拉分校等学术界的实验室中开展。由于关系到公司的商业目标, 工业界实验室的大多数应用都指向了电信领域。起初, 以数字信号直接调制半导体激光器电流的方式被普遍采用。随着更高的系统特性的需求, 激光器设计的重点很快就聚集到高可靠性、低阈值、大功率和连续波单频输出等方面, 采用外调制器对激光器的载波输出进行高数据率、无失真的数字调制的方式被采纳应用。

另一方面, 在从国防部各机构得到大量资助的学术界实验室中, 被这些资助来源支持的研究项目必须被证明其对军事应用是有用的, 这常常涉及在微波频率下直接调制模拟信号的激光器。对于宽带模拟研究的经历很快被证实是幸运的, 因为仅到 20 世纪 80 年代, 一种模拟直接调制的重要商业应用就诞生了。新的应用通过将同轴电缆与光纤结合使用, 把电缆电视信号广泛传送到许多家庭, 这被称之为混合光纤电缆, 或简称为 HFC。较早时期纯粹采用电缆的电缆电视系统传送与通过大气传送一样的频谱。因此, 同一个电视机可采用天线输入亦可采用电缆输入。电视广播的频谱基于模拟的副载波频谱, 其中各个射频副载波信道相邻间隔为 6MHz, 并分别由各自的视频信号所调制。在早期系统中, 最低信道的频率为 50MHz, 信道总数约为 10 个。副载波的数目也是很少的, 约为 100 个, 它们被局限使用在电缆头端附近方圆 10km 的小型社区里。HFC 系统被引入以扩展一个头端能够服务的距离和副载波的数量。这样, 在一个很宽的扩展频带中具有射频调制功能的线性激光器就成为起码的需求, 扩展频带一般需要包括数百个相邻间隔为 6MHz 信道。

加州理工学院的阿蒙亚利夫实验室是研究适用于 HFC 系统的线性激光器的领军团队。1981 年, 一个基于亚利夫实验室的小组成立了一个生产 HFC 激光器的始创公司——Ortel。刘锦贤在博士毕业后即作为创办首席科学家加入该公司。他一直致力于模拟激光器的研究直至 2005 年他成为加州大学伯克利分校电机工程和计算机科学系的荣誉退休教授。研究工作中的主要挑战是: 1. 实现光输出功率与调制电流之间严格的线性响应, 以达成射频广播谱在光域副载波谱的真实再现; 2. 实现对应于数百电视信道的数千兆赫兹的调制带宽。

Ortel 公司的成功可以用它 1994 年首次公开招股集资的业绩和 2000 年朗讯公司为收购买它而付出约 30 亿美元巨额资金的事实来衡量。刘锦贤和他的同事们在

那段时间中开发的理论和设计大多在本书的第一版和第二版中做了综述。第二版中加入的新内容组成了第 17、18 章及附录 F 和 G。

当光输出与调制驱动电流之间的线性响应有所偏离时会有混频生成物出现，它们中一部分会与特定的工作信道频率相同。在将线性度优化之后，还可运用一些算法对实际使用信道的选择进行优化，以避免产生大干扰条件的形成，这种算法将在第 17 章中进行讨论。

用于波分复用通信系统的掺铒光纤放大器 (EDFA) 技术的进步也使 HFC 系统受益。EDFA 可用于扩展 HFC 网络的距离。在 HFC 应用时的系统考虑将在第 18 章中讨论。结论表明，EDFA 不会引入明显的非线性。

高速模拟调制的半导体激光器在国防上应用的例子可见于附录 G，包括实现战斗机与其拖引的假目标之间射频通信的机载光纤链路等。此外，宽带模拟调制的激光器还被用于传输 20 世纪 80 年代在内华达试验场进行地下核试验时的单脉冲数据。由于测试数据以光速从地平面上传播，而爆炸产生的摧毁力量大致是以声速传播的，这使得数据的成功获取成为可能。

需要掌握线性模拟半导体激光器和系统基本知识的设计者或学生们将会发现，本书是他们理想的资源。

Ivan P. Kaminow

贝尔实验室 (已退休)

加州大学伯克利分校电机工程和计算机科学系兼职教授

加利福尼亚, 旧金山, 2010 年 6 月



# 第一版序言

在线性光纤系统这个令人感兴趣且具有重要实际应用的研究领域中，一本对关键核心器件既有深入理论分析又有详细实践描述的涵盖全面的专著已成为人们的迫切需求。线性或模拟光纤系统是形成全球光纤网络的光传输系统的重要组成部分。不仅如此，线性光纤系统还在某些特定领域如传感和分布式天线阵列等军事领域中具有极其重要的应用。深入理解和实际评价支撑这些系统的激光器和光探测器等核心技术，对掌握其创新之处和系统的设计是十分基本和必需的。刘锦贤教授的书正是一本对线性光纤系统及其关键核心器件两方面都给予深入介绍的专著。

半导体激光器是模拟光纤系统的核心。作为每个光纤系统的“发动机”，半导体激光器能够提供加载高速编码信号高频载波的单频光源。与已铺设的采用“0”、“1”码数字强度调制的海底和陆上的长途干线、城域网以及近期“光纤到家”网络的多数光纤系统不同，将视频信号延伸到 CATV 网络中的光纤干线是模拟系统。在这种模拟系统中，视频信号以很高的保真度直接加载到光载波上。因此在这类模拟系统中，能够使视频信号不失真（线性）地再现输出的高速调制激光器是非常重要的。除模拟应用之外，在数量上占绝对优势的大多数数字系统，尤其是在中等速率的或短距离链路中（例如，局间链路、数据中心链路、存储域网和光纤到家系统等），信息编码是通过激光器直接强度键控调制来实现的。对于上述两大类应用领域，显然半导体激光器的高速调制特性都是十分重要的。

刘锦贤教授的书主要介绍了高速电流调制下半导体激光器高频响应的基本理解和器件的实际实现，以及它们在高温线性光纤系统中的应用。高速激光器的调制特性同样适用于直接调制的数字光纤传输系统。本书内容充分反映了作者 20 世纪 80 年代在加州理工学院和 Ortel 公司与同事们的工作和作者 90 年代在加州大学伯克利分校作为电机工程和计算机科学教授时所领导研究组的研究成果，包括若干有原始创新的发现。作者先期曾在混合光纤电缆（HFC）线性光纤系统市场上具有领军地位的 Ortel 公司担任创业的首席科学家（该公司在 2000 年被朗讯收购），并是在建筑物内无线覆盖解决方案市场上领军的 LGC Wireless 公司的创办者之一（该公司在 2007 年被 ADC Telecom 公司收购）。作者这些在工业界工作的经历明显有助于在系统和器件两个级别上都形成从实际出发的观点，这些观点对于读者也无疑是十分有用的。

本书的第一和第二部分集中于高速激光器的物理内容。作者从最基本原理出发

验证了高速调制特性,包括频率响应的推导以及对模拟系统应用非常重要的畸变效应等.高速调制特性对于直接调制的数字光纤系统也同样重要.

有关模拟传输系统的内容位于书中第三部分,其中有对包括激光器特性的影响在内的传输损伤问题的综述和针对几个很有发展前景的高频外调制实验系统的研究结果总结.书中给出了一个用于无线信号馈送的模拟链路的典型案例,这种应用在一个室内无线覆盖技术领域中日益重要.

书后的附录是本书主体部分的必要补充,内容涉及了对线性系统和诸如波导型外调制器等多种线性编码手段的背景材料.

本书可作为面向从事有线电视和远端天线系统研究者和所有对高频激光器调制特性的基础理论感兴趣的高年级研究生的一本优秀教材,同时对于学术界和工业界的研究人员和工程师们也极有参考价值.

Rod C. Alferness

于新泽西州霍姆德尔,阿尔卡特-朗讯公司

贝尔实验室

2008年7月

## 第二版前言

本书的第一版已对基于直接调制半导体激光器的线性光纤系统的基础知识做了较全面阐述。这类链路无疑在线性光纤系统中占据主导地位，它们构成了当前有线电视服务及家庭通过电缆调制解调器进行因特网接入的混合光纤电缆 (HFC) 基础架构。本书第二版中有关线性光纤系统的重要新内容展现在第三部分，包括在第 17 章中讨论的——在保持必需的载波-噪声/干扰比所须采用的调制系数前提下，为达到最小信道间干扰而进行的副载波频率优化配置这样的高级系统架构问题。这些导出副载波信道最佳频率配置的算法可被用于任何多信道传输系统，而不管其所用的专门硬件是什么。并且对光纤传输系统，无论是直接调制还是外调制的激光器发射机，应用的效果都是同样好。实际上，其中某些频率配置算法就来源于卫星传输技术，在那里星载的大功率行波管放大器具有可观的非线性。

本书第二版论述的另一个系统问题是线性光纤系统中掺铒光纤放大器 (EDFA) 的使用。在目前传输数字数据的光纤通信系统中，掺铒光纤放大器的使用是确定和广泛实施了。由于现在它已经彻底商品化，把它应用到线性光纤系统中就成为很自然的选择，尽管线性光纤系统还有很多更严格的超出了对一般数字光纤系统的要求。第 18 章中对掺铒光纤放大器中产生畸变的基本原理进行了深入探讨。

附录 G 中举例说明了线性光纤系统在军事方面的一些重要应用，包括：1. 军用飞机中的机载光纤拖引假目标 (第 G.1 节)，近期由总部在英国的一个从事防卫和保安领域工作的空天技术公司 BAE System 研发成功；2. 核试验场中传感器收集的高速单脉冲数据的传输 (第 G.2 节)，一个由加州 Ortel 公司在 20 世纪 80 年代早中期提供的高速宽带光纤系统的早期应用 (该公司已于 2000 年被朗讯公司收购，现在是 Emocore 公司的一个部门)。

刘锦贤

## 第一版前言

光纤已牢固地确立了在陆上通信基础设施中主流传输媒质的地位。目前已有许多优秀的参考资料和教科书深入讨论了与此相关的课题。这些书中的大多数是关于数字光纤传输中的器件和系统的。因此,本书不再进行数字光纤系统的论述。在当前通信基础设施中,有相当部分的接入流量是由混合光纤同轴电缆(HFC)基础设施承载的<sup>[1]</sup>,它们采用副载波<sup>①</sup>传输(基本上是模拟方式<sup>②</sup>)来实现CATV<sup>③</sup>广播和基于电缆调制/解调器的互联网接入。类似情况还存在于某些军用雷达/通信系统,这些系统中的人员和信号处理设备与受自动寻找的武器威胁的物理天线拉开一定距离。这些系统的传输方式也是模拟性质的。目前已有各种术语名词用于称呼这些系统,其中最知名的有射频光子学、线性/模拟光波传输等,前者的知名度源于其在国防上的建树,而后的知名度源于它在HFC基础设施方面的商业运营。

线性光纤系统的最出名的商业应用是20世纪90年代对HFC基础设施的开发建设,但最早的现场射频光纤系统安装在位于洛杉矶北面南加州Mojave沙漠中Goldstone的“深空网络”(DSN)中,它于20世纪70年代末、80年代初进行运营。DSN<sup>④</sup>是一个由数十个大型碟形天线组成的集群,其中最大的天线直径有70m(见图P.1)。DSN由加州理工学院的喷气推进实验室(JPL)运行,在过去20多年中被美国国家宇航局(NASA)用于探索太阳系的无人空间探测器的跟踪和通信,其距离达到并超过了太阳系的最远边缘。特别是两个“旅行者”号空间探测器(旅行

---

① 副载波传输本质上是调制在光载波上的信号在射频领域中频分复用。

② 大多数副载波传输对射频载波采用QPSK或更高序列的调制,因此是具备数字内涵的。但用来测量信号质量判据仍以射频概念为基础。这造成了在语意学或观念上的问题,即副载波调制是模拟的还是数字的。基于用以评估特性的基本判据是模拟本质的考虑,作者倾向于诠释副载波调制和传输是模拟的。

③ CATV意为共用天线电视,系统中一个能良好接收卫星信号(典型的是模拟FDM方式)的大天线位于远端。卫星天线常与视频处理和互联网设备安置在同一地点。所有这些设施被称之为“头端”(head end)。线性(模拟)光纤链路被用来把信号送到分区的集线器,接着信号通过同轴电缆网络分配送到每个用户,因此这种系统被命名为混合光纤同轴电缆系统。为补偿在头端与分区之间长距离传输的同轴电缆的高损耗需要串连安装一系列高线性射频放大器(在线放大器),但线性光纤元件和系统的采用消除了这样做的必要性。仅一个射频放大器失效就会导致整个分区服务的中断。

④ DSN天线网络由与位于Goldstone的大天线完全一样的三个集群组成。另外两个中的一个位于西班牙马德里市附近,一个在澳大利亚的堪培拉市附近。这三个DSN地点沿地球表面相距大致相同的经度,以达成对星际空间探测器时钟覆盖的最大接续性。加州理工学院的喷气推进实验室于20世纪40年代创建,创建者包括中国的火箭之父钱学森,此时他为加州理工学院航空系的博士研究生。

者 I 和旅行者 II), 其目的地设计为走出太阳系后的星际空间<sup>①</sup>. 在距离地球大于  $8 \times 10^9 \text{mi}$  ( $1 \text{mi} = 1.609 \text{km}$ , 译者注) 的地方, 这些星际空间飞船接收和发出的信号功率太微弱了, 以至于 DSN 中单个直径 70m 的巨大天线也无法单独完成通信与跟踪任务. 20 世纪 70 年代末、80 年代初在 Goldstone 的 DSN 中安装了一个光纤网络, 其目的仅仅是为网络中所有天线单元传递  $1.420405752 \text{GHz}$  (氢原子的 21cm 谱线, 由位于环境受控设施中的氢受激辐射微波放大器 (MASER) 产生, 精确到  $10^{15}$  以内) 的超稳定微波参考信号. 网络中所有的天线单元都由这一稳定参考频率同步, 应用相控阵的概念, 它们像一个巨大的天线一样工作, 从而能够与飞向星际空间的空间飞船保持通信.

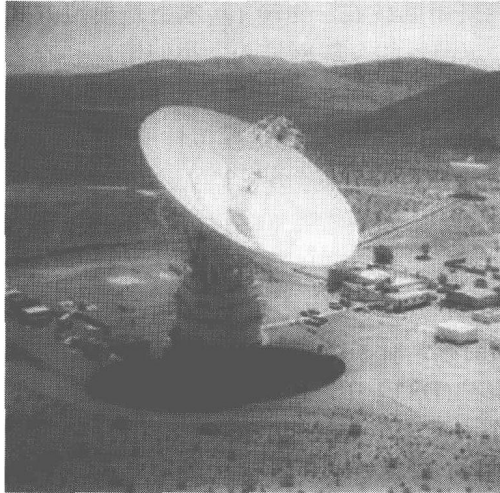


图 P.1 位于南加州 Mojave 沙漠中 Goldstone 的深空网络 (DSN) 鸟瞰图处在前面的是直径 70 m 的碟状天线, 十余个较小的天线矗立在它周围, 它们之间的相互距离可达 10km 以上

微波光纤链路要求极端稳定, 必须采用各种反馈稳定技术来补偿任何可能对在光缆中的光波传输有影响的各种物理因素, 包括温度、湿度和机械影响等. 实现此目标的方案在一份专利中有所披露, 其首页如图 P.2 所示. 对稳定方案细节感兴趣的读者可翻阅整个专利文本, 它可从美国专利与商标局的官方网站下载: <http://www.uspto.gov/> and search for patent #4,287,606.

在众多用于描述这种类型的模拟光纤传输系统的术语中, 线性光波传输比其他术语受到更大的关注, 尽管线性光波传输与更传统的、更具技术内涵的描述模拟/射频光波传输之间并没有本质上的区别, 其原因在于:

<sup>①</sup> 旅行者 I 号和旅行者 II 号分别于 2005 年 5 月 31 日和 2007 年 8 月 30 日越过日光层, 即距离太阳  $8.7 \times 10^9 \text{mi}$  的临界边界, 标志着从太阳系到星际空间的穿越. 欲知更多详情, 请访问网站 <http://voyager.jpl.nasa.gov/>.

(1) 金融集团通常能给国防不相关的生意提供更高的回报，原因大概是与国防相关的生意严重依赖于不可预测的国际政治气候；

(2) 从硬件制造商向金融集团进行市场营销的角度看，“线性”光波系统胜过“模拟”光波系统的原因在于后者给人不受欢迎的陈旧印象。

9/1/81           XR       4,287,606

**United States Patent** [19]

[11]       **4,287,606**

Lutes, Jr. et al.

[45]       **Sep. 1, 1981**

- [54] **FIBER OPTIC TRANSMISSION LINE STABILIZATION APPARATUS AND METHOD**
- [76] **Inventors:** Robert A. Froese, Administrator of the National Aeronautics and Space Administration, with respect to an invention of George F. Lutes, Jr., Glendale; Kam Y. Lau, Pasadena, both of Calif.
- [21] **Appl. No.:** 188,160
- [22] **Filed:** Sep. 17, 1980
- [51] **Int. Cl.:** H04B 9/00
- [52] **U.S. Cl.:** 455/617; 455/610; 455/615; 455/612
- [58] **Field of Search:** 455/610, 612, 615, 617

[56]           **References Cited**

**U.S. PATENT DOCUMENTS**

3,571,597	3/1971	Wood	455/607
3,887,876	6/1975	Zeidler	455/610
3,953,727	4/1976	d'Auria	455/610
4,102,572	7/1978	O'Meara	455/606
4,234,971	11/1980	Lutes	455/619

*Primary Examiner*—Howard Britton  
*Attorney, Agent, or Firm*—Monte F. Mott; John R. Manning; Paul F. McCaul

**[57]           ABSTRACT**

A fiber optic transmission line stabilizer for providing a phase-stabilized signal at a receiving end of a fiber optic transmission line (26) with respect to a reference signal

at a transmitting end of the fiber optic transmission line (26) so that the phase-stabilized signal will have a predetermined phase relationship with respect to the reference signal regardless of changes in the length or dispersion characteristics of the line (26). More particularly, a reference signal of RF frequency modulates a 0.85 micrometer wavelength optical transmitter (20). The output of the optical transmitter (20) passes through a first optical filter (24) and a voltage-controlled phase shifter (22), the output of the phase shifter (22) being provided to the fiber optic transmission line (26). At the receiving end of the fiber optic transmission line (26), the signal is demodulated, the demodulated signal being utilized to modulate a 1.06 micrometer optical transmitter (34). The output signal from the 1.06 micrometer optical transmitter (34) is provided to the same fiber optic transmission line (26) and passes through the voltage-controlled phase shifter (22) to a phase error detector (36). The phase of the modulation of the 1.06 micrometer wavelength signal is compared to the phase of the reference signal by the phase error detector (36), the detector (36) providing a phase control signal related to the phase difference. This control signal is provided to the voltage controlled phase shifter (22) which alters the phase of both optical signals passing therethrough until a predetermined phase relationship between modulation on the 1.06 micrometer signal and the reference signal is obtained.

**21 Claims, 8 Drawing Figures**

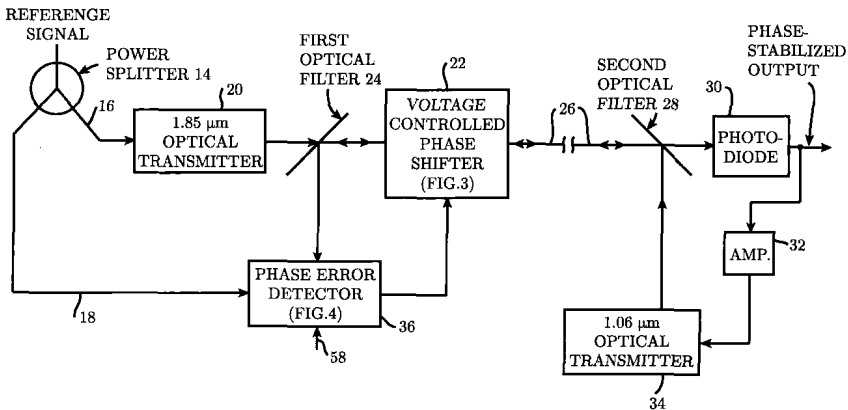


图 P.2 在 NASA 深空网络中用于天线同步的超稳定频率基准光纤传输装置及方法细节的专利公告首页

有线电视的馈送和与之相关的电缆调制/解调器互联网接入实际属于接入领域而不属于电信领域。尽管如此，它们仍然是当今通信基础设施中重要并不可或缺的组成部分。

同时，用于接入和企业专用通信基础设施的另一技术——空间点对点毫米波 (mm-wave) 链路<sup>①</sup>也在崭露头角，由于它使用毫米波频段的高载波频率，因而能够提供很高的数据率 (数兆比每秒)。同时它还能提供灵活的构建方式——只需要确定发射和接收天线的位置，就可获得对一连串站点的接入。这种毫米波链路的物理对准的容差显然比类似的自由空间光通信链路更大，而且与后者相比，在非理想气候条件下，遭受的自由空间传输损伤也更小。

除了能减少铺设的费用和时间，这类系统胜过有线基础设施的另一个值得考虑的因素是能够避免触及路权相关的繁复法律交涉过程。下面例子说明，一个社区在有州际高速公路穿过而没有私人企业路权的情况下，要在社区的各建筑物之间构建自有的高速数据专用网时，上述因素成立的理由是十分显然的 (见图 P.3)。

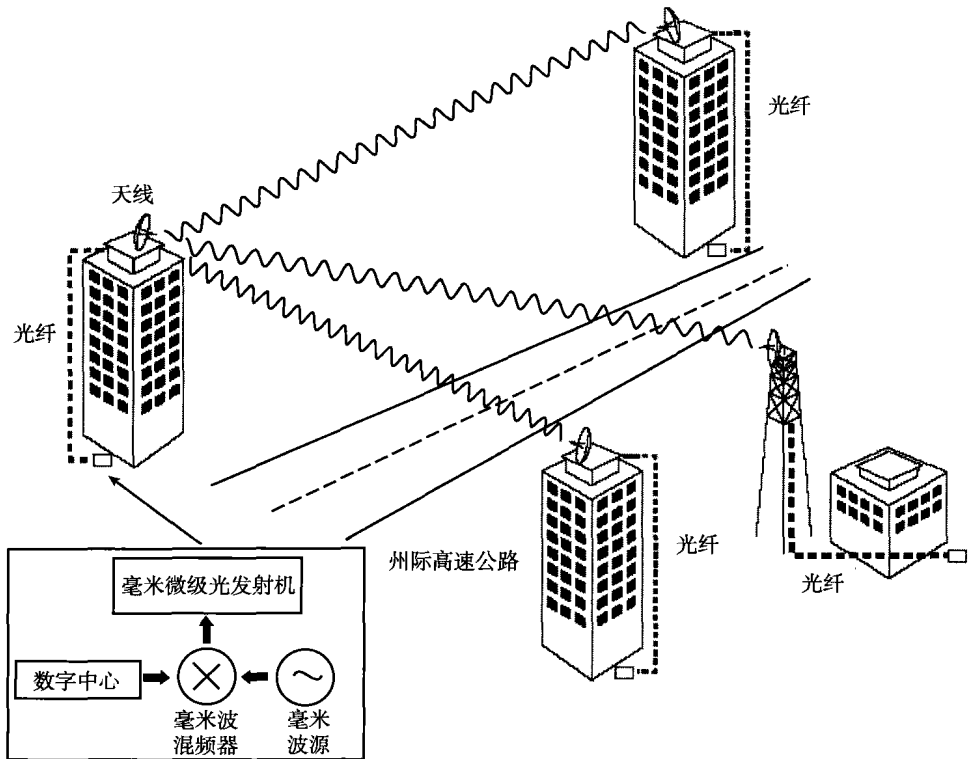


图 P.3 园区级空间毫米波通信网络示意图

<sup>①</sup> 市场提供的这类产品的例子可访问网站: <http://www.loecom.com/>, 刷新:2008/07/25, 4:25PM 和 <http://www.bridgewave.com/>, 刷新: 2008/07/25, 4:26PM.

同样值得考虑的因素是, 这种类型的商用系统可以使毫米波转发设备安装在远离天线的地点, 即使这些天线并不处于自动寻的摧毁性武器的威胁之下. 这样做有以下两个方面原因:

(1) FCC 规定取得毫米波段执照的使用人必须严格控制自己的发射频率, 因此在不受控制的室外环境下, 使用经济型自由运行的毫米波振荡器是不可行的, 这些振荡器必须由在远处的位于可控环境下的稳定参考源锁定, 或者在远处先把要传输的信号预混频到毫米波载波上, 然后通过管线送到远端天线再进行自由空间传输.

(2) 可以大大减少对于远端天线维护的工作量 (天线所在地点通常难于到达并易受恶劣气候影响).

基于上述理由, 这个问题转化为如何找到将毫米波副载波信号传输中等距离 (大于数十千米) 的创新性方法. 由于色散和损耗的关系, 加上体积大、笨重和昂贵等因素, 采用毫米波波导或同轴电缆是根本不可行的. 采用光纤应该是一个理想的解决方案. 本书将讨论在光载波上调制、传输毫米波副载波的问题以及基于光纤传输时的多种相关效应.

在传统的电信长途干线基础设施中采用外调制激光器做发射源可以最大限度的减小光载波的频率啁啾和光纤色散引起的信号退化. 在电信长途干线中的外调制器实际上是电吸收调制器与连续波激光器单片集成的芯片, 即集成调制器的激光器 (IML). 在城域网范围内, 光纤基础设施以采用直接调制分布反馈激光器 (DFB) 的  $1.3\ \mu\text{m}$  链路为主. 从使用的光转发器的大致数量看,  $1.3\ \mu\text{m}$  直接调制激光器将大大超过 IML 的数量. 在 HFC 网络中情况是类似的, 用  $1.3\ \mu\text{m}$  线性光转发器将射频信号在区域中传送一段较长的距离的情况远多于把源端信号传到各个区域的长途传输的情况. 因而, 从经济学的角度看, 直接调制的线性激光器占有较大的权重. 这一结论同样适用于上文提及的用于毫米波空间互联的光纤配送网络设施的情况. 出于经济方面的考虑, 用于将毫米波信号传到屋顶或塔/电杆顶端的短距离传输倾向于采用  $1.3\ \mu\text{m}$  单模光纤 (SMF) 和采用便宜的直接调制光转发器, 这种器件与用于电信的器件只有很小的不同, 但可以充分利用后者大批量生产所带来的经济上的好处. 服务于更广泛区域的长距离链路则采用  $1.55\ \mu\text{m}$  单模光纤 (不必是色散位移类型的), 这些长距离链路中的转发器采用连续波激光器及高频外调制器, 这种情况下基于速度匹配技术的马赫-曾德尔型调制器是符合逻辑的选择. 与 HFC 网络的情况类似, 直接调制的  $1.3\ \mu\text{m}$  短距离链路的大概数量远超过需要用外调制发射机的  $1.55\ \mu\text{m}$  长距离链路的数量. 根据这一实际情况, 最大挑战就在于创新性地制作出能工作于毫米波频率短距离链路的低成本电信型直接调制的激光器. 本书相当多的内容 (第 8~11 章) 正是致力于讨论这一课题.



在采用马赫-曾德尔型光电外调制器的  $1.55\mu\text{m}$  长距离链路中,毫米波信号传输距离能够达到  $50\sim 100\text{km}$ . 本书第 12 章和 13 章分别描述这种调制器在色散位移光纤和非色散位移光纤下的应用. 附录 C 中介绍了高频率速度匹配型调制器的基本原理.

本书的核心素材(第二和第三部分)反映了作者 20 世纪 90 年代在加州大学伯克利分校电机工程和计算机科学系所领导的研究组成员在这一课题上做出的研究成果. 本书第一部分通过讨论对某些内容进行了强化,包括通常的半导体激光器基带调制和有关的光纤传输效应. 这是理解城域与局域光纤网和目前 HFC 副载波光链路中广泛使用的直接调制光发射机基础.

传统的基带直接调制方法并不能延伸到毫米波频率应用范围. 因此,正如本书第二、三部分中所描述的,迫切需求更多创新的方法和手段来实现调制在光载波上的毫米波副载波在光纤中传送. 在本书第一部分中综述了直接调制半导体激光器(第 1 章~第 6 章)和激光器-光纤相互作用引起的相关噪声与损伤(第 7 章)的最新观点之后,第二部分介绍了一种称为谐振调制的新方法,它本质上是经典锁模技术在毫米波频率范围小信号情况下的另一种体现,它可以使单片集成的标准电信激光器结构应用于超过基带上限(进入毫米波频率范围)的副载波信号的传输.

书的第三部分一般性地讨论了毫米波副载波信号在光纤中传输的效应(第 12 章和第 13 章),展望了专用于光纤-无线覆盖的高级系统(第 14 章). 第 15 章讨论了相干噪声效应(如多模光纤(MMF)链路中的模式噪声或单模光纤(SMF)链路中多重后向散射造成的激光器相位-强度转换噪声)和通过在激光器调制电流上叠加高频调制以抑制相干噪声的机理. 第三部分还对另一个十分有效地传送毫米波副载波信号的创新方法——前馈调制(第 16 章)进行了总结,这种方法回避了谐振调制方法的最大缺点,即需要根据给定的毫米波副载波频率对激光器进行逐一有针对性地制作,成品此后也不能用电子调节方式来改变. 而电子调节正是前馈调制所擅长的,尽管它要在复杂度和元器件数量上付出一定的代价.

附录 A 中给出了射频信号质量通用评测规范概要. 应用于副载波信号接收的高速光电二极管和窄带光电接收机的基本原理在附录 B 中讨论. 外调制器的基本原理及其最新进展在附录 C 中做了简要介绍.

附录 D 中理论分析了“超辐射激光器”的直接调制响应——这种激光器具有非常低的端面反射率,工作于非常高的内部光增益条件. 把使用全非线性、空间非均匀行波速率方程得到的计算结果与使用简单速率方程的普通激光器的结果比较,确定了空间均匀速率方程的有效性.

刘锦贤

于伯克利,加利福尼亚

2008 年 6 月