



经典译丛

WILEY

光学与光电子学

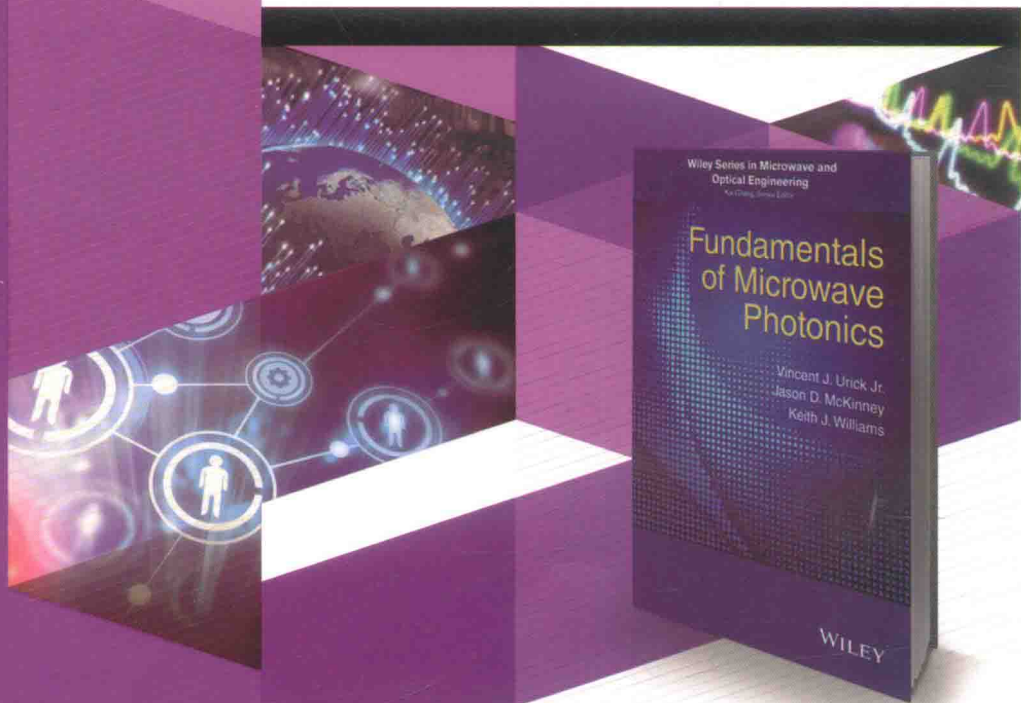
Fundamentals of Microwave Photonics

微波光子学基础

Fundamentals of Microwave Photonics

【美】 Vincent J. Urick Jr. 著
Jason D. McKinney
Keith J. Williams

项鹏 蒲涛 沈芸萍 译



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

经典译丛·光学与光电子学

微波光子学基础

Fundamentals of Microwave Photonics

Vincent J. Urick Jr.

[美] Jason D. McKinney 著

Keith J. Williams

项 鹏 蒲 涛 沈荟萍 译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是一本有关微波光子学原理与应用的专著。在书中作者结合自己在美国海军研究实验室(U. S. Naval Research Laboratory)从事模拟微波光子链路的研究实践,从模拟微波光子链路的原理与应用这一视角介绍了微波光子学的基本原理,并综述和展望了模拟微波光子链路的应用及其未来的发展趋势。全书共分为十章,内容涵盖微波光子学的基本概念;射频系统与光子学系统的性能参数;基于不同调制方式的模拟微波光子链路的理论模型和其中有关信号传输的关键问题,包括链路中的噪声、畸变和非线性效应等;以及模拟微波光子链路的应用。

本书可以作为工科院校电子工程、通信工程等专业高年级本科生和研究生的教材使用,同时对于从事微波光子学及其相关领域研发工作的工程技术人员来说,也是一本难得的参考书。

Fundamentals of Microwave Photonics

ISBN:978-1-118-29320-1

Vincent J. Urick Jr., Jason D. McKinney, Keith J. Williams

Copyright © 2015 by John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved. This translation published under license.

Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Inc.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the back cover are unauthorized and illegal.

本书简体中文字版专有翻译出版权由 John Wiley & Sons, Inc. 授予电子工业出版社。未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封底贴有 John Wiley & Sons, Inc. 防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2015-8570

图书在版编目(CIP)数据

微波光子学基础/(美)文森特·J. 尤里克(Vincent J. Urick), (美)詹森·D. 麦金尼(Jason D. McKinney), (美)基思·J. 威廉斯(Keith J. Williams)著;项鹏,蒲涛,沈荟萍译. —北京:电子工业出版社,2017.3
(经典译丛·光学与光电子学)

书名原文:Fundamentals of Microwave Photonics

ISBN 978-7-121-30370-8

I. ①微… II. ①文… ②詹… ③基… ④项… ⑤蒲… ⑥沈… III. ①微波理论—光电子学 IV. ①TN201

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第276341号

策划编辑:冯小贝

责任编辑:周宏敏

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:21.5 字数:565千字

版 次:2017年3月第1版

印 次:2017年3月第1次印刷

定 价:89.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 zls@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: fengxiaobei@phei.com.cn。

译者序

随着人类社会的发展步入信息时代,多种宽带通信业务的出现和用户数量的激增都推动着通信技术向着容量更大的方向发展。为此,人们不断提高现代通信系统中信息载体——电磁波的频率,以期望获得更大的带宽。尤其是在无线通信领域,通信载波的频率已经从微波频段发展到了毫米波频段,并继续向太赫兹频段发展。此时,传统基于电子学的器件和手段在应对如此高频、大带宽的信号产生、传输和处理等方面已经越来越显得力不从心。在此条件下人们开始另辟蹊径,采用光子学的原理和手段来实现高频毫米波、太赫兹波信号的产生、传输与处理。基于光子学的器件和手段能够有效地克服传统电子学器件的“电子瓶颈”,还具有体积小、重量轻、可调范围大,抗电磁干扰等优势,同时利用光纤所具有的大带宽、低损耗优势,可以很容易地实现毫米波和太赫兹波信号的传输与覆盖范围。于是这种基于光子学原理和手段来实现高频微波、毫米波以及太赫兹信号的产生、传输、处理和测量的交叉学科——微波光子学,便应运而生。近年来,微波光子学得到了学术界和业界的广泛关注,使得其相关技术得到了飞速的发展,并已经从基础性的原理研究走向了实际应用。

《微波光子学基础》从模拟光子链路这一重要应用领域的视角出发,全面阐述了微波光子学的基本概念和基本原理;基于相关的物理模型,推导了模拟光子链路的重要性能参数,并给出了重要数学公式;在考虑不同信号调制方式的条件下深入地分析了链路中噪声、畸变和光纤传输效应等核心问题。最后,还介绍了微波光子学在微波信号处理和测量系统,以及射电天文学、任意波形发生器等领域中的应用。本书内容全面,实用性强。其作者长期在美国海军实验室从事微波光子学领域的研究,近年来发表了大量的学术论文,在业界颇具影响力。而本书的很多内容都来自于作者的研究成果,可为从事微波光子学领域教学和科研工作的广大师生及工程技术人员提供有益参考。然而目前国内有关微波光子学的专著还不多见,也缺少一本专门介绍模拟光子链路这一实用技术的高水平书籍。因此,我们组织翻译了这本书,希望能对国内从事相关领域工作的读者有所裨益。

本书由中国人民解放军理工大学通信工程学院项鹏博士主持翻译。译者长期从事微波光子学领域的教学和研究工作,近年来在该领域主持和参与了多项国家级和省部级自然科学基金的研究工作,具有较强的相关理论基础。同时,多年从事外国留学生的相关专业课程教学,以及多次外文书籍的翻译实践也使得译者具备了所需的英语运用能力和翻译工作经验。在本书的翻译过程中,项鹏完成了第3~7章的翻译,此外,参与本书翻译的还有本校的蒲涛教授,他完成了第1~2章的翻译,以及本校的沈芸萍博士完成了第8~10章的翻译,全书的统稿和审校由项鹏完成。

在此,译者要感谢电子工业出版社的冯小贝编辑给予我们这次书籍翻译的机会,感谢蒲涛教授为本书的出版提供了项目支持。由于受到时间和精力和译者水平的限制,译文中可能会存在一些错误和疏漏之处,恳请广大读者不吝赐教、批评指正。如需来信,可发至电子邮箱:02rita13@sohu.com

译者

2016年6月于南京

前 言

我们认为本书全面阐述了微波光子学领域的内容，该领域有时也被称为射频(RF)或模拟光子学。这本书所面对的读者群涵盖工程或物理专业的高年级本科生直至本领域的专家。本书对微波光子学领域的阐述注重基础，因此可用于高年级本科生或研究生的课程教材来向学生介绍微波光子学。虽然本书没有包括专门的习题集，但是书中给出了许多例子，教师只要发挥一点想象力，就可以设计出课后作业。我们希望本书可以令本领域经验丰富的专家、学者都觉得有很多用处。我们已经尽力在本书有限的篇幅中提供尽可能多的基础物理学知识。有时，对于微波光子的应用来说，这些知识可以忽略。书中针对各种不同应用场景，用大量的曲线描述了微波光子链路的性能边界。每章都包括一个完整的参考文献列表，且包含了最原始的参考文献。本书提供了许多便于使用的公式，可供读者迅速查阅使用。的确，我们真心希望本书可以在实验室、应用现场或是设计会议等场合都为人们提供一个常备的参考资料。

我们希望这本书的内容从第一页到最后一页都连续流畅，而且我们相信本书已达到了这一初衷。我们建议本领域的初学者最好按顺序来阅读本书，因为后继章节的内容是建立在前面章节的基础之上的。而对于在本领域有一定学习和研究经验的读者，则可以很容易地找到每个独立章节的索引导航。第1章简要介绍微波光子学领域的内容，该内容相对独立，并引出了内容更为详尽的后续章节。第2章主要描述量化微波光子系统性能的参数指标，而这些指标是从光学领域中剥离出来的。第3~5章的内容阐述了噪声、失真、信号的传输与光纤非线性等内容，这些内容都与微波光子紧密相关。而这三章内容都并非针对任何一种调制方式，而是旨在对微波光子链路给出更一般性的阐述。具体的调制及相应的解调技术在第6~8章中阐述，这些内容用到了前四章中给出的基础知识。在第6章中，重点介绍了基于马赫-曾德尔外调制器的强度调制和直接检测方案。该技术无疑是当今最为流行的调制解调方式，因此做了最彻底的阐述。第7章介绍了相位调制方案，但比起前面一章，内容没有那么详细。第8章全面却相对简要地介绍了各种其他的调制方式。第9章集中讨论了高功率光电检测器。第10章介绍相关系统与子系统的应用，并描述了当前该领域中的一些发展趋势。

我们自己在撰写本书过程中也对微波光子学领域中的许多问题得到了更完整的认识，并激发了许多新的想法。我们也真心地希望所有阅读本书的人能够从中获得同样的收获。

Vincent Urick

Jason McKinney

Keith Williams

华盛顿特区，2014年4月

致 谢

本书为作者个人所撰写的，因此本书中所表达的观点仅代表本书的作者，不代表美国海军研究实验室(NRL)、美国海军或政府官方的观点。但是，如果没有 NRL 对我们整个职业生涯的支持，我们也是无法完成本书的。NRL 所提供的工作环境，使得我们的研究工作稳步前进，并对微波光子学技术的实验和理论获得透彻的理解。而如果没有 NRL 管理层的支持，这些都是不可能的，特别是主管和部门负责人为我们在这一重要技术领域取得进展提供的仪器、设备的支持。在此要对以下各位表示感谢：Francis Klemm 博士、Thomas Giallorenzi 博士、John Montgomery 博士、Joseph Weller 博士、Ronald Esman 博士、Michael Monsma 先生和 Don Northam 博士。我们还要感谢工作在 NRL 的各位员工，无论是过去还是现在，他们都对微波光子学的发展做出了贡献。

我们很感谢在过去的岁月与我们一起愉快工作的无数同事们。本书中所引用的文献已经指出了那些曾给予我们启发的人的名字，但是其中有些人还应该在此特别提出。首先是 NRL 的 Frank Bucholtz 博士，他在我们分析和理解模拟光子链路的过程中给出了重要见解。虽然我们在书中已经引用了他的工作，但是他对于我们的进步所做出的贡献其实远超过了那些。美国海军学院物理系的 Nicholas Frigo 教授帮助我们完成了书中有关偏振效应的章节。NRL 的 Carl Villarruel 先生(已退休)曾花费了无数时间与我们讨论了微波光子学的技术细节，尤其在关于光纤效应的领域。美国空军研究实验室的 Preetpual Devgan 博士对属于调制格式的重要概念进行了仿真。雷神公司的 Andrew Kowalevicz 博士激发了我们关于不同媒质中光场的有用观点。NRL 的 Marcel Pruessner 博士在微波光子硅基集成的应用领域为我们提供了重要的反馈意见。美国陆军研究实验室的 Olukayode Okysaga 博士在光电振荡器专题方面为我们提供了重要的见解。美国空间与海军武器系统司令部的 Bill Jacobs 先生在微波光子应用和专业职责方面为我们提供了不同观点。我们还要感谢约翰·霍普金斯应用物理实验室的小 Thomas Clark 博士在关于多倍频毫米波光子学和信号处理方面与我们一起讨论。最后，我们还希望对所有我们指导过的十分要求上进的学生，以及所有那些我们曾教导过的人们，是他们给了我们传承自己知识给他人的机会。在指导他们的过程中，我们深刻地意识到：直到我们能够将知识传授给别人时，我们才算是真正获得了对这些知识的理解，而关于这一点我们在撰写本书的过程中曾有千百次的体会。

除了上面提到的对专业领域工作者的感谢，还有那些对我们影响深远的人。如果没有我们的父母和家人的支持，这本书也是不可能完成的。我们的妻子和孩子们在我们完成本书的过程中也给予了大量的支持和让步。我们永远感谢我们的父母：Vincent Urick Sr.、Susanne Urick、Dwight McKinney、Deborah McKinney 和 Gertrude Williams，是他们培育了我们的智慧与好奇心，并给我们灌输着职业道德，这些都是我们能够完成本书所必需的品质。Paul Urick，一位年长的来自宾夕法尼亚州的农民，和一位曾经于 1944 年在奥马哈海滩幸存的好心人 Norman Zlotorzynski，总是在我们最需要的时候给予我们灵感。这两位在本书的写作过程中都去世了，他们一定希望看到我们这本完成的著作。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 光纤光子链路的技术发展与优势	4
1.2 模拟与数字光纤链路	9
1.3 基本光纤光学器件	11
1.4 射频系统中的模拟链路	17
参考文献	18
第 2 章 模拟性能参数	23
2.1 散射矩阵	23
2.2 噪声系数	25
2.3 动态范围	26
2.3.1 压缩动态范围(CDR)	26
2.3.2 无杂散动态范围	29
2.4 级联系统的分析	35
参考文献	37
第 3 章 光纤链路中的噪声源	39
3.1 基本概念	39
3.2 热噪声	42
3.3 散粒噪声	46
3.4 激光器	50
3.5 光放大器	63
3.5.1 掺铒光纤光放大器	63
3.5.2 拉曼和布里渊光纤放大器	73
3.5.3 半导体光放大器	76
3.6 光电检测器	76
参考文献	79
第 4 章 光纤链路中的畸变	86
4.1 简介	86
4.2 电-光转换中的畸变	90
4.3 光放大器中的畸变	93
4.4 光电检测器中的畸变	96
4.4.1 光电检测器的畸变测量系统	98
4.4.2 光电检测器中的非线性机理	100
参考文献	112

第5章 光纤传播效应	117
5.1 简介	117
5.2 双重瑞利散射	118
5.3 光纤链路中的 RF 相位	119
5.4 色度色散	121
5.5 受激布里渊散射	128
5.6 受激拉曼散射	132
5.7 交叉相位调制	134
5.8 四波混频	138
5.9 偏振效应	139
参考文献	142
第6章 外强度调制与直接检测链路	149
6.1 基本概念与链路结构	149
6.2 信号的传输与增益	152
6.3 链路的噪声与性能参数	163
6.3.1 通用方程	164
6.3.2 散粒噪声限制条件下的方程	171
6.3.3 RIN 限制条件下的方程	173
6.3.4 对于折中考虑的分析	175
6.4 与光电二极管相关的问题与解决方法	176
6.5 线性化技术	183
6.6 传播效应	186
参考文献	190
第7章 外相位调制与干涉仪检测链路	193
7.1 简介	193
7.2 链路的信号传输与增益	194
7.3 链路的噪声与性能参数	203
7.4 链路线性化技术	209
7.5 传播效应的影响	213
7.6 用于光相位调制信号的其他技术	216
参考文献	218
第8章 其他模拟光学调制方法	223
8.1 激光器的直接调制	223
8.1.1 直接强度调制	224
8.1.2 直接频率调制	227
8.2 基于 MZM 的载波抑制调制	229
8.3 单边带调制	234
8.4 采样模拟光子链路	235

8.4.1	基于采样模拟光子链路的 RF 下变频	237
8.4.2	用采样链路来缓解受激布里渊散射的影响	239
8.5	偏振调制	242
	参考文献	245
第 9 章	大电流光电探测器	251
9.1	光电探测器的压缩效应	251
9.2	有限的串联电阻带来的影响	253
9.3	热负荷的限制	256
9.4	空间电荷效应	260
9.5	光电检测器的功率转换效率	264
9.6	大功率光电检测器的最新进展	269
	参考文献	270
第 10 章	应用与发展趋势	274
10.1	点对点的链路应用	274
10.2	模拟光纤延迟线	281
10.3	基于光子学的射频信号处理	285
10.3.1	宽带信道化处理	285
10.3.2	瞬时频率测量	287
10.3.3	下变频	288
10.3.4	相控阵波束成形	290
10.4	基于光子学的 RF 信号产生	291
10.5	毫米波光子学	296
10.6	集成微波光子电路	299
	参考文献	304
附录 I	单位与物理常数	321
附录 II	电磁辐射	325
附录 III	正弦信号的功率、电压和电流	327
附录 IV	三角函数	328
附录 V	傅里叶变换公式	330
附录 VI	贝塞尔函数	331

第1章 绪 论

微波光子学是一门涉及光学、微波和电子工程的多学科交叉领域。微波光子学领域所涉及的信号频率范围从小于 1 kHz 的射频 (RF) 波段直至数百太赫兹的光学频段。该领域的起源主要是由于无线领域的工程师们为了解决日益复杂的工程问题而不得不涉足他们本学科之外的光学领域去寻找新的解决方案。一般而言,该领域是受到了当今一些系统应用的需求所推动发展起来的,其本质属性是面向实际应用的。然而,这其中很多的基础研究领域都与底层的器件技术相关。

虽然微波光子学领域直到 20 世纪 80 年代末和 90 年代初才在国际范围内得到认可 (Berceli 和 Herzfeld, 2010), 但它的历史其实已经有几十年了。用射频信号实现电报通信在 19 世纪中叶促进了业界对无线电工程师的需求。直到第二次世界大战 (Page, 1962) 期间雷达的迅速发展, 并基于此电子学手段来搜索飞机, 才使得人们对模拟和无线电工程技术的需求迅速增长。几乎在与雷达成为了目标探测的辅助手段的同时, 雷达对抗技术便得到了发展, 并用以迷惑和阻止雷达操作员有效运用他们的新技术手段。雷达对抗的出现使得雷达的重新设计, 并以此来反雷达对抗就成为了必要。这种雷达对抗与反对抗之间的战争一直持续到了今天, 而且必将持续下去, 因为雷达的设计者会不断追求“发现别人但却不让别人发现”的目标 (Fuller, 1990)。更高频率的使用和对这些高频信号延时处理的需求催生了低损耗延迟线技术。用于实现低损耗、长延迟线的早期微波光子技术, 与上述的雷达和电子对抗之间的战争是密切相关的。

当今社会充分地将电磁频谱用于通信。无线电和电视广播、蜂窝电话、卫星通信、无线对讲机和许多其他的技术都被用来实现两个或多个对象之间的通信。上述系统基本上是在元器件的内部完成 RF 信号的传输与处理。随着微电子电路技术的不断发展, 及其在体积/功耗/速度等方面的性能不断提升, 上述这些系统有很多都从基于严格的模拟信号实现发展为基于混合信号实现。在这些系统中, 模拟信号首先被数字化, 然后经过数字信号处理, 和/或以数字的形式传输, 最终才被转换回连续波形在模拟信号的世界中使用。虽然现代 RF 系统越来越多地使用数字信号处理 (DSP) 技术, 然而模拟光子链路还是能够为无线电工程师在对这些系统进行设计时提供重要和有效的工具。在模拟域实现信号处理可以简化系统的整体设计, 尤其是在带宽系统中, 那里的带宽需求太大, 还无法实现 DSP。然而, 模拟系统工程师应当采用最好的模拟信号处理工具, 使其能充分发挥出 DSP 的优势, 实现最高效和强大的系统。

对于最基本的模拟光子链路而言, 它实际上是一个延迟线, 其中包括一个电光 (E/O) 转换 (用来将 RF 信号变换到光域)、一段光传输媒介和一个光电 (O/E) 转换器。图 1.1 展示了一个多信道光纤链路的功能框图。如图所示, 一路或多路 RF 信号输入被转换到光域, 利用光纤可实现对这些信号的延迟, 然后再经过处理, 将信号馈送到一个或多个 O/E 转换器, 从而光信号又被解调回电子 RF 信号的形式。其中的信号处理可以是多种形式的, 举几个例子来说, 包括交换、路由、滤波、频率转换和放大。在本书的中间各章, 我们将阐述这些不同形式的模拟光子链路的性能。

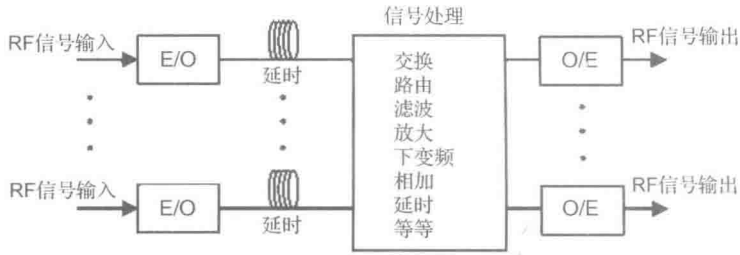


图 1.1 一个光子链路阵列的基本框图

在一系列的应用领域中，光纤链路均已被证明优于与之相对应的电线链路（即同轴电缆）。最早的军事应用之一就是在机载的拖曳诱饵系统中使用光纤链路，如图 1.2 所示的 ALE-55 系统。从飞机上拖曳 RF 信号发射机来吸引 RF 制导导弹，使其偏离既定目标的概念至少在 20 世纪 60 年代就出现了（Norman 和 Meullen, 1964），只是后来才出现了使用光纤来实现对诱饵的拖曳（Toman, 1989）。在早期的设计中，诱饵弹的接收天线首先侦测到威胁信号，然后对其放大，再重新发射出高功率的回波信号。然而，由于受到空气动力学的限制，该诱饵弹的尺寸是受限的，因此诱饵弹上只能完成很少的一部分信号处理功能。通过采用光纤光缆将诱饵弹与飞机相连，使得诱饵弹可以共享机载的复杂信号处理设备，信号在飞机上经过处理后，再传至诱饵弹，在诱饵弹上仅仅对信号进行放大和发射即可。这就使得飞机诱饵弹可以实现多功能的抗导弹威胁，包括压制敌方雷达跟踪飞机的能力，用干扰技术来欺骗敌方雷达，通过提供一个更具吸引力的目标而诱使敌方导弹偏离既定目标。通过光纤的使用，诱饵弹的体积被减小了，也就减小了使用中诱饵拖曳线上的张力，从而使得这种飞机拖曳诱饵的技术可适用于更多类型的飞机。

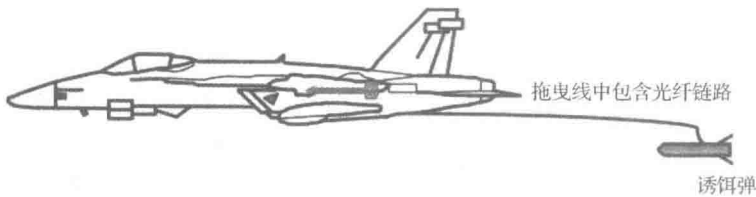


图 1.2 从 F/A 18 飞机上拖曳 RF 诱饵弹的示意图

用于有线电视信号分配的混合光纤同轴（HFC）系统是模拟光纤链路最早的商业应用领域之一（Chiddix 等, 1990）。HFC 方案使得系统操作员可以向家庭用户增加视频信号传输的数量和质量，而且降低了上行宽带数据业务传输的成本，并提高了信号传输的质量。HFC 系统改变了有线电视产业的角色，使其从单纯的视频提供者成为了本地接入市场中的一个有力竞争者，而后者在传统上由电话系统主导。随着因特网的不断扩展，上述 HFC 在当今极具竞争力的宽带信息基础设施的形成过程中也扮演了一定的角色。到 20 世纪 90 年代中期为止，基于不同的光子链路设计，HFC 系统已经能实现 100 路残留边带调幅信号（AM-VSB）的分配，且信号覆盖距离超过了 20 km。而取得这一成功的关键是基于光纤馈送视频信号可以实现较高的信号载噪比（CNR）和较低的二阶调制（CSO）和三阶交调（CTB）失真水平。对于该应用，早期已有大量研究工作致力于提高 HFC 系统中光链路的线性度，包括对线性外调制（Nazarathy 等, 1993）方法的研究和对于由光纤非线性而引起的信号串音的研究（Phillips 和

Ott, 1990)。本书的很大一部分内容都致力于阐述模拟光链路中各种非线性的来源。几乎在 HFC 迅速改变电缆和电话产业的同时, 基于 AM-VSB(残留边带调幅)的视频传输格式已经开始向着压缩数字视频的传输格式(CDV)转变。虽然这种转变的过程比较慢, 因为要替换已有的基础设施其成本是相当昂贵的, 但今天 CDV 已经替换了很多原有基于 AM-VSB 的视频分配系统。而且即便是对于这些遗留的 AM-VSB 信号分配系统, 光纤链路仍然是其传输介质的首选。

在射电天文学中, 需要大尺寸的天线来检测来自外太空的 RF 辐射。随着模拟光子链路在现代射电天文系统中的应用, 微波工程在射电天文学中扮演越来越重要的角色(Webber 和 Psopieszalski, 2002)。坐落在西弗吉尼亚州的绿岸望远镜(GBT, Greenbank Telescope), 工作频率覆盖 0.1 ~ 115 GHz, 是目前世界上最大的波束完全可控的单天线(Lockman, 1998; Prestage 等, 2009)。它拥有 100 m 口径的抛物面天线, 可用于增强人类对许多科学领域的认知, 诸如: 探测引力波(通过精确的脉冲星计时来实现), 了解恒星、星系和星系群的形成, 以及了解行星的组成。GBT 天线还被用于检测原子和分子的辐射谱, 其辐射谱线检测范围包括红移频率的高频端(这些谱线存在于黑洞的附近)直至那些微弱的、空间扩展的谱线, 对于这些谱线的检测可用于探测宇宙中新的有机分子。在 GBT 中, 模拟光纤链路被用来将信号远程化并连接至专门的信号处理实验室(White, 2000)。为了获得更高的空间分辨率, 可以将更小的碟形天线组成相控阵列, 从而可以利用长基线来测量微小的相位变化。这样一个天线阵于 2013 年在智利山脉中落成(Testi 和 Walsh, 2013), 图 1.3 给出了其中一部分的图片。光纤链路对于毫米波信号的远程化处理, 显示了其在大规模射电天文天线阵列中的潜在应用(Payne 和 Shillue, 2002)。因为所探测的这些射频信号是来自天文学的(极远)距离, 所以它们的功率极低, 因此我们需要组装具有极低噪声系数的超大天线系统, 并将其配置为相位阵列来实现对信号的检测。

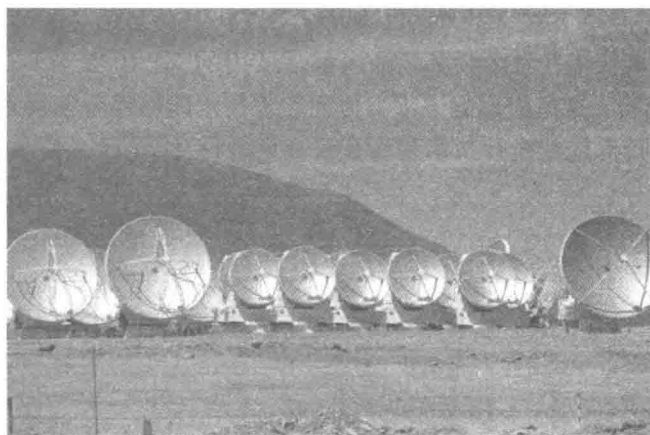


图 1.3 位于智利阿塔卡玛的大型毫米波/亚毫米波阵列(ALMA)干涉天线(ALAM(ESO-NAOJ-NRAO, J. Guarda))

此类系统充分利用了大有效孔径的阵列增益以及长基线对于信号相位的敏感性。在某些这样的系统中, 人们使用了 64 个 12 m 碟形天线, 所形成的基线长达 16 km, 此 RF 信号在中心站实现相干叠加。因为在天文学中人们所感兴趣的信号频率高达数百吉赫兹, 因此在该阵列中不同路径之间的长度差必须精确计算。这即使对于光纤光学来说也是极具挑战性的(Thacker 和 Shillue, 2001), 因为光纤链路中温度的变化、偏振态的漂移和色散都会导致长度误差, 需要使

用主动补偿。更多关于 GBT 和 ALMA 天线中光纤链路的细节介绍见第 10 章。

光纤链路的应用已在许多射频、微波或毫米波系统中被证明是有效的，以上列举的应用只是其中的一小部分。微波光子学的应用领域包括军事、工业和学术研究等诸多方面，其他应用领域还包括无线通信领域中的光载无线电 (RoF) 系统，在天线与天线馈线之间的信号功率传输以及天线阵列的校准，还有信号的路由和阵列真时延波束形成，光学信号处理，滤波，波形合成，可产生精确射频信号的光电振荡器，精确定时的光时钟，以及射频信号的上、下变频，等等。对模拟光子链路的支撑技术和器件的阐述正是本书的主题，包括第 10 章中对这些技术具体应用细节的介绍。

1.1 光纤光子链路的技术发展与优势

微波光子学所关注的信号频率范围在很大程度上依赖于我们的自然界。图 1.4 (Leibe, 1983) 给出了海平面不同气候条件下不同频率的射频辐射在大气中的衰减分布。如图所示，在 23 GHz、60 GHz、119 GHz 和 182 GHz 频率附近存在很强的辐射吸收。而处于这些频率之间的部分是大气损耗相对较少的传输“窗口”。使用 20 GHz 以下频率的系统在地面和海上的应用中都得到了发展，还有少量系统工作在中心频率分别为 35 GHz 和 94 GHz 的第 2 和第 3 窗口。根据图 1.4 所示，这些系统在海平面上的大气损耗低于 0.3 dB/km。而在海拔 9.2 km 以上，频率在 300 GHz 以内的信号在这些传输窗口的损耗降低至 0.05 dB/km 以下 (Wiltse, 1997)。如果认为 0.3 dB/km 是海面上系统可以接收的损耗，那么考虑在海拔较高的地方，比如一些空对空的应用，使用 300 GHz 的信号就显得很可靠。就分数带宽而言，300 GHz 仅为 1550 nm (即 193 THz) 光载波带宽的 0.16%。这样的分数带宽使得许多应用都可以基于光子学来实现，包括 RF 信号复用。此外，很多光子器件技术在 100 ~ 300 GHz 范围内都被证明是可用的，这就使得该技术在频率范围内都是适用的 (见 10.5 节)。微波光子学领域的演进在很大程度上依赖于这些应用的需求。然而在该技术能够繁荣发展之前，还需要一些关键性的技术突破，包括低损耗光纤技术和高有效带宽的收发器 (即 E/O 和 O/E)。

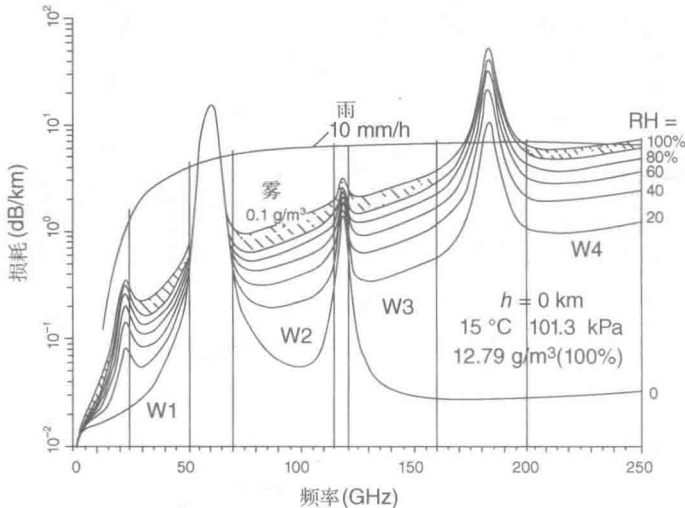


图 1.4 在包括雨、雾等不同湿度条件下海平面上不同频率信号的大气损耗分布，其中传输窗口表示为 W1 ~ W4 (Leibe, 1983)

图 1.5 给出了典型阶跃折射率光纤的横截面和折射率剖面图。折射率为 n_1 、直径为 d_1 的高折射率玻璃纤芯被折射率略低的玻璃包层所围绕，包层的折射率为 n_2 、直径是 d_2 。包层具有足够的厚度，从而可使得传播模式的渐逝电场在该区域内呈指数衰减。玻璃包层外通常涂覆了一层折射率更低的聚合物将其与外界环境隔离开来。光纤和包层的典型纤芯直径分别为 $8 \sim 50 \mu\text{m}$ 和 $60 \sim 125 \mu\text{m}$ 。纤芯-包层的折射率差和纤芯的直径决定了光纤波导中能够传播特定波长的模式数目。

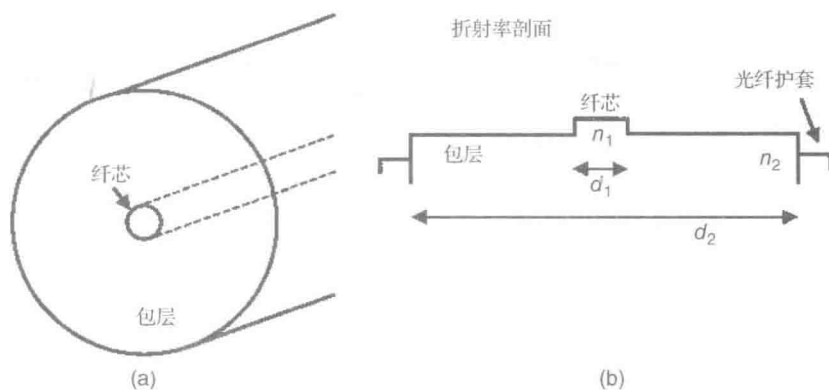


图 1.5 阶跃单模光纤的 (a) 纤芯和包层区横截面示意图, (b) 折射率剖面图

光波在光纤介质波导中的传播由麦克斯韦方程组描述。通过求解这个波动方程，可以定义光纤的归一化频率或 V 值如下：

$$V = \frac{\pi d_1}{\lambda} \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \quad (1.1)$$

其中， λ 是波长。对典型的光纤，其归一化的折射率差值为 $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$ ，且该值通常 $\ll 1$ ，式(1.1)可以简化为：

$$V = \frac{\pi d_1}{\lambda} n_1 \sqrt{2\Delta} = \frac{\pi d_1}{\lambda} \text{NA} \quad (1.2)$$

其中，NA 是光纤的数值孔径。在几何光学中， $\text{NA} = n_0 \sin(\theta)$ ，其中 θ 是光线可在光纤中传输的半角， n_0 是光纤前端的材料折射率（对于空气 $n_0 = 1$ ）。NA 是衡量光纤收集光线能力的参量，因为碰到光纤的光束如果相对于传输轴方向的入射角大于 θ 将无法在光纤中形成传导模式。对于所有不大于贝塞尔函数 J_0 的第一个零点的 V 值，即 $J_0(V) = 0$ （见附录 VI），波导只能够支持最低阶的混合模式，即 HE₁₁ 模（Ramo 等，1994）。因此在 $V < 2.405$ 的条件下，光纤波导为单模波导。而当 V 超过 2.405 时，波导支持高阶模式，当 V 很大时，光纤所能支持的传播模式数可由 $V^2/2$ 来估计。一根工作在 1550 nm 波长的典型单模光纤的线芯直径是 10 μm ，当其折射率差值为 0.006 或更小时，可以保持单模传输。而如此小的折射率差值可以通过在纯的熔融硅玻璃（ SiO_2 ）材料中掺杂 GeO_2 、 P_2O_5 或 B_2O_3 来实现。

相对于单模光纤而言，具有大纤芯尺寸的多模光纤实现得较早，而且往往具有更低的损耗，因为该光纤对于波导尺寸的非理想性具有较高的容忍度。然而，工作在高信号频段的射频光子链路无一例外地采用了单模光纤，从而可以避免由于多模光纤中的模式色散而导致的功率衰落。图 1.6 列举了历年来单模光纤和多模光纤在降低传播损耗方面所取得的进展。从根本上说，光纤的损耗受限于光纤中的瑞利散射，该效应所导致的损耗在 1550 nm 波长处达

到了 0.175 dB/km。如图 1.6 所示, 到 1974 年为止, 光纤的损耗已经下降至 1 dB/km, 而到了 1981 年, 光纤的损耗已降到瑞利散射极限的 10% 以内。在本书的后续章节中将会看到, 对于许多不同的链路调制格式而言, 微波光子链路中 RF 信号的损耗(以 dB 为单位)都是上述光信号损耗的两倍。因此, 直到 1981 年, 射频延迟线的信号传输损耗 1550 nm 才达到了 0.4 dB/km。由于损耗对于波长的依赖在几个纳米的带宽(在 1550 nm 波长处, 这对应几百吉赫兹(GHz)的带宽)都很小, 因此可以认为光子链路中 RF 信号的传输损耗与频率无关。

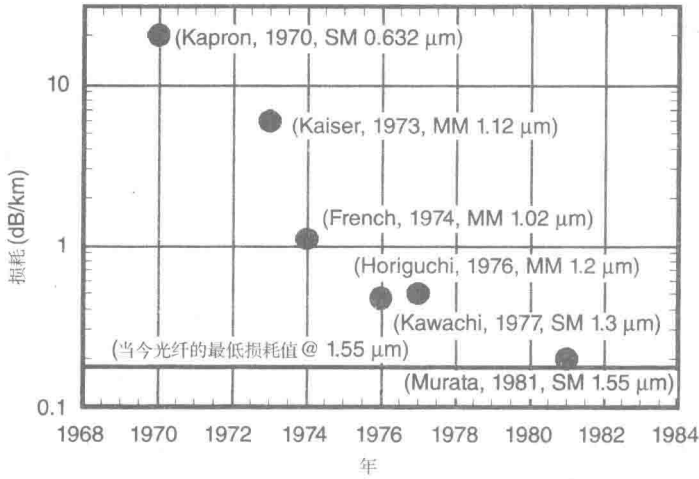


图 1.6 在不同的波长处, 历年来单模(SM)和多模(MM)光纤损耗的报道结果(French 等, 1974; Horiguchi, 1976; Kaiser, 1973; Kapron, 1970; Kawachi, 1977; Murata 和 Inagaki, 1981)

如果在人们所感兴趣的频段处相应的 E/O 和 O/E 转换器件能得到足够的发展, 则低损耗光纤将在 RF 延迟线中体现出性能优势。最初, 人们所感兴趣的频率范围主要是低于第一个大气吸收频率范围以下的信号频率, 包括 20 GHz 及其以下的频率(见图 1.4), 在该频段中, 已有大量的射频系统投入应用。在 E/O 转换一侧, 人们很早就开始使用了半导体激光器, 因为采用 GaAs(可实现 860 nm 波长激光输出)和 InGaAsP(可实现 1600 nm 波长激光输出)材料的半导体材料具有亚纳秒的光子寿命。直接调制这些激光器的泵浦电流可以直接实现 E/O 转换。到 20 世纪 80 年代中期, 10 GHz 的直接调制带宽已经很普遍了(Su 和 Lanzisera, 1986)。第一个超过 20 GHz 之间调制带宽的半导体激光器工作在 1.3 μm 处, 它通过在块状材料中掩埋异质结构而实现(Olshansky 等, 1987)。随后, 该领域的研究继续向着改善激光器微分效率(导致更高的光/电转换效率)和提高带宽的方向发展。人们广泛认为多量子阱激光器设计可以改善激光器的微分效率, 因为多量子阱激光器具有载流子束缚特性, 其中粒子数翻转的实现需要的载流子密度较低(Okamoto, 1987 年)。然而直到人们研究和理解了高速载流子进入和输出量子阱的机理之后(Nagarajan 等, 1992), 量子阱激光器的带宽才超过了非量子束缚激光器。随后不久, 就出现了分布反馈(DFB)激光器, 它使得激光器能够以单纵模的形式运转。当 20 GHz 带宽的激光器还能满足大量 RF 系统应用的时候, 处于调制带宽峰值极限的半导体激光器强度噪声导致其信噪比(SNR)的劣化。这种强度噪声(或称相对强度噪声, RIN)的峰值可以通过增大调制带宽来减少。已有研究结果报道了 DFB 激光器在 1550 nm 波长处实现了 25 GHz 调制带宽的, (Morton 等,

1992), 甚至调制带宽超过 40 GHz 的 DFB 激光器也已见诸于报道(Weisser 等, 1996)。

在射频光纤链路的后端, 还需要 O/E 转换器将调制于光载波上的 RF 调制转换回射频信号。这里最重要的器件就是 p-n 结光电二极管, 其中还包含了一个耗尽的本征区域来降低电容, 因而被称为 p-i-n 光电二极管。早期关于高速光电二极管的研究工作产生了比高速激光器更高的带宽(Bowers 等, 1985), 因此对于第一条光子链路而言, 光电二极管并不是其中造成带宽限制的器件。当这些光电二极管被设计成块状表面光入射结构时, 需要考虑设计中的折中因素(Bowers 和 Burrus, 1987): 增加其耗尽区的厚度可以减小电容(从而提升了带宽)并提高了光吸收效率, 但这样同时会增加载流子的渡跃时间(从而减小了带宽)。通过使用波导或分布式行波设计可以避免这种折中考虑的僵局, 从而便可以同时提高器件的带宽和效率, 但这样做的代价是增加了器件及其封装的复杂度。

除了较低的传输损耗以外, 光纤中可用的信息传输带宽和与频率无关的损耗对于 RF 光纤链路也是同样重要的。这一点与同轴电缆形成了鲜明对比, 在 RF 同轴电缆中, RF 信号的传输损耗与信号频率的平方根相关。图 1.7(a) 举例说明了这一点, 图中画出了两种同轴电缆(RG-401 和 RG-405)中的信号传输损耗随频率的变化曲线, 并与光纤的损耗做了对比。一般而言, 直径更粗的同轴电缆, 如 RG-401, 具有更低的信号传输损耗, 但是它能保证波导工作在单模条件下的截止频率也更低。从图中可以看到: 若频率每增加 100 倍, 同轴电缆的损耗便增加 10 倍, 这是因为同轴电缆具有损耗随信号频率平方根增加而增加的特性。从图中还可以看到: 同轴电缆的传输损耗比光纤高 2~3 个数量级, 这就是推动微波光子学技术一直发展到了今天的根本原因。

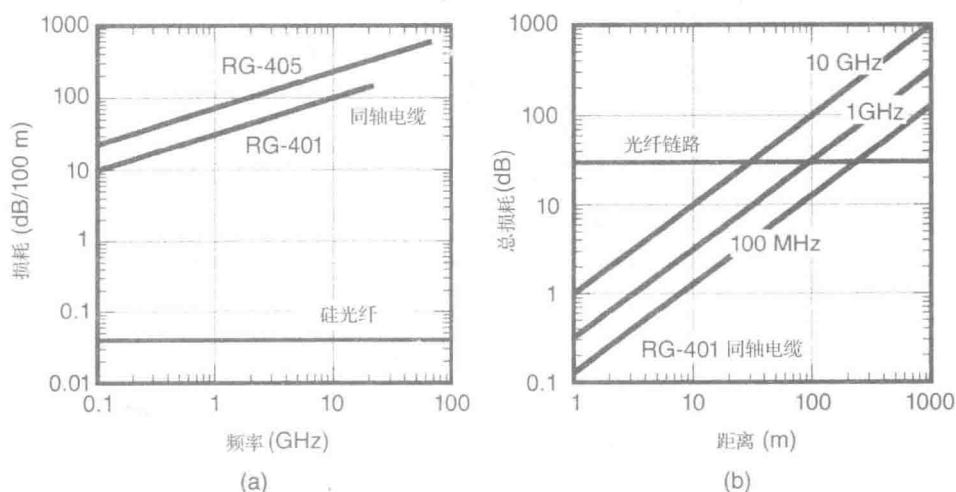


图 1.7 (a) 同轴电缆 RG-401、RG-405 和硅光纤的传输损耗随频率的变化曲线;
(b) 对于 3 种不同的频率, 信号在 RG-401 同轴电缆中的传输距离。在图(b)中, 光纤的损耗包括了电/光和光/电转换所造成的 30 dB 固定损耗

如果把电/光和光/电转换损耗包含在同轴电缆和光纤传输损耗比较之中, 则两者之间的差异就并非如图 1.7(a) 所示的那样明显了。图 1.7(b) 给出了在 3 个不同信号频率处, 光纤链路的总损耗和 RG-401 传输损耗随传输距离的变化曲线。其中光纤链路的损耗包含了由于电/光和光/电转换而引入的 30 dB 损耗。由于光纤具有极低的传输损耗, 所以就传输损耗而

言, 总会存在一个传输距离的值使得光纤的性能超越同轴电缆。当考虑的信号频率较低时, 这个发生转折的传输距离较长; 而当信号频率较高时, 这个发生转折的传输距离减少。这个距离的典型值通常为几十至几百米。如果损耗是唯一考虑因素, 则在长距离链路中人们总是会选择光纤; 然而, 除了损耗之外的因素也会影响这里的判决矩阵。比如成本、噪声性能、相位稳定度、尺寸、抗电磁干扰(EMI)等因素都会起作用。如果考虑了这些额外因素, 则对于较短的链路也会发生局势的扭转, 即光纤在很短的链路中也更受青睐。例如, 图 1.8 比较了信号经过光纤与同轴电缆传输后的相对相位改变, 相位改变量使用了百万分之一(ppm)的归一化单位。同轴电缆由许多不同的材料组成, 包括实心的拉伸成线状的金属、不同的金属类型和各种介质材料, 它们都具有各自的热膨胀系数。这就导致了同轴电缆中信号的群速度是温度的复杂函数。而与同轴电缆不同, 光纤主要是由熔融的二氧化硅制成的。其中信号传播延时随温度的变化主要是由物理波导长度和折射率对温度的依赖而造成的(见 5.3 节)。对于无涂覆层的光纤, 只要它不是机械地附着于另一种具有大膨胀系数的材料上, 其单位长度中信号的延时(即相位变化)随温度的变化量仅有 8 ppm(Hartog 等, 1979)。其中同时包括材料和波导尺寸随温度的变化。只要光纤涂覆或光纤成缆技术能使得光纤随温度的变化达到最小, 就能保证光纤的长度在很大的温度范围内都缓慢地随温度变化, 且这种变化是很容易预测的。而光纤的这一特性对于那些对链路中信号的相位稳定性或相位变化的可预测性有要求的应用场合来说是非常有优势的。

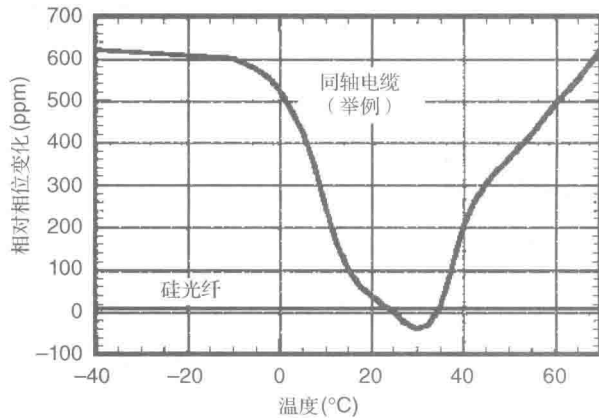


图 1.8 信号在同轴电缆和光纤中传输时, 其相对相位变化与温度的关系曲线

其他人们经常提及的光纤链路的优点还包括: ① 宽超过 10 000 GHz 的可用带; ② 线缆尺寸小, 光纤的直径仅为亚毫米量级, 而同轴电缆的直径为 3 ~ 10 mm 或者更大; ③ 如果能够减少光纤成缆时的保护材料, 其重量相对于电缆而言更轻; ④ 光纤是不导电的、也不含金属, 这对于那些发送机和接收机之间需要电气隔离的场合非常有用; ⑤ 光纤能适用于各种环境, 可以浸入流体、液氮等不同环境; ⑥ 光纤的抗腐蚀能力也更强。除了上述明显优势以外, 模拟光纤链路还具有一些优势也许并不是那么显而易见, 但这些优势都是电子链路难以或者无法具备的。这些优点包括光纤链路可以对 RF 信号实现可变真时延或实现 RF 信号的复用。对于其中最后一个优点, 我们可以将多根尺寸很小的光纤捆扎在一根光缆中, 这样便可使光纤链路之间距离很近, 从而减小了不同光纤链路之间的温度相关性(Roman 等, 1998)。这使得我们可以更好地在多条光纤链路之间实现信号的相位跟踪, 这一优势可用于