



国际信息工程先进技术译丛



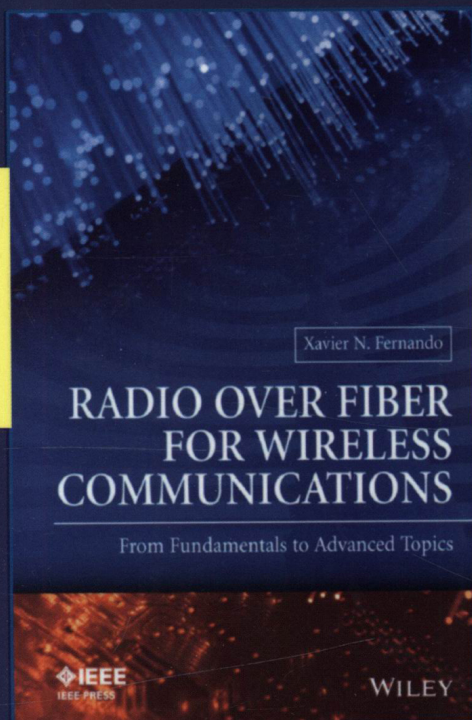
# ROF光载无线通信： 从理论到前沿

RADIO OVER FIBER FOR WIRELESS  
COMMUNICATIONS

From Fundamentals to Advanced Topics

[加] 泽维尔 N.费尔南多 (Xavier N.Fernando) 著

武 冀 译



◎ 光纤无线通信领域先驱权威之作  
◎ 结合光通信的高带宽与无线网络的灵活性和移动性，全面解读 Fi-Wi系统



WILEY

机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

## 关于本书

本书将对ROF通信系统做详细的研究，主要面对研究生和现场工程师。本书涵盖了光学和无线通信两个学科的内容，并在其间架设了一座桥梁。实际上，与ROF这一领域飞速发展的现状相对的是相关文献的稀少。这与所需知识跨越两个领域有关。在日益进步的通信行业中，要求工程师拥有光学和无线通信方面的知识，并可以设计组合或混合系统，这些知识和能力可以从本书中有所收获。



国际信息工程先进技术译丛

# ROF 光载无线通信： 从理论到前沿

[加] 泽维尔 N. 费尔南多 (Xavier N. Fernando) 著  
武 冀 译



机械工业出版社

本书对光载无线通信系统进行了详细的研究，在光学和无线通信领域间架设了一座桥梁。主要内容包括链路元件的基本特性、功率分配基本计算、ROF链路的噪声情况分析、多载波ROF系统分析和Fi-Wi信道的数字信号处理技术等，并对无线通信的历史和未来系统的发展方向做了回顾和展望。本书适合通信专业的研究生、现场工程师以及无线系统设计师、学生和研究者阅读。

## 作者简介

Xavier Fernando, 加拿大瑞尔森大学教授、瑞尔森通信实验室主任, 曾就读于卡里加里大学的非盈利性通信研究机构 TRILabs, 并于 2001 年获得博士学位, 作为光载无线通信系统相关研究的先驱, 在就读博士期间, 率先从事了适应性数字信号处理技术在光纤-无线 (Fi-Wi) 系统的应用方面的研究, 并因此获得了加拿大最佳论文奖和美国专利。

Xavier Fernando 在 ROF 非线性信号处理、微波光子学滤波器设计等 Fi-Wi 系统研究领域前沿发表过多篇文献, 在该领域的研究获得了多个重要基金支持, 作为著者和参著者发表 100 余篇文献, 并拥有两个专利。他也是《WEBOK (无线工程知识体系指南)》的参著者。

Xavier Fernando 曾是 IEEE COMSOC 教育委员会工作小组无线通信领域的组员, 曾荣获多项殊荣, 包括 2010 年度 IEEE 微波理论和技术协会奖、2009 年度 Sarnoff 研讨会奖、2003 年度加拿大光电最佳海报奖和 2001 年度 CCECE 最佳论文奖。他受邀在世界上进行过多场演讲和讲座, 也是 ABET 认证的评估员和 IEEE 加拿大电子和计算机工程学会 (CCSCE2014) 的主席, 并曾在 2010~2011 年度担任瑞尔森委员会成员以及 2012~2013 年度的 IEEE 多伦多分会主席职务。

# 原 书 序

试想无线和移动通信技术对我们现代的生活有多么大的影响：从同步日历到发送邮件，从简单的浏览互联网到用手机上传高清视频和照片到社交网络，从地图导航到收看高清电视和视频，这些正是智能手机的移动网络和 Wi-Fi 让我们享受到的多彩生活。随着移动数据消费的增长以及越来越多的工具和设备通过高带宽的 Wi-Fi 信道通信，在同一个通信平台下工作，对网络互联的需求已发生改变。人们希望在享受高带宽的同时，也希望网络支持更多用户并覆盖更广阔的区域。带宽增长和设备数量的日益增长对设计、架构和操作未来宽带无线接入网络带来了巨大的挑战。减少单一移动网络的覆盖范围，用构建小型蜂窝小区，提高无线通信载波频率的方式来提高带宽以支持更多用户接入，以及提供基站广播空载传输等方法，都是解决这种挑战的尝试。光载无线通信 (ROF) 技术集中了短距离宽带无线链路互联和光纤传输网络高带宽的优势，为解决上述挑战提供了富有前景的一条道路。

《ROF 光载无线通信：从理论到前沿》这本书与时俱进地介绍了这个重要领域的发展。本书良好的知识架构也体现了作者的别具匠心。本书从 ROF 基本思想到简单易懂的前沿专题讲解——从传输基础到现代调制技术，从光链路到无线信道，从线性到非线性失真和补偿策略——循序渐进地进行介绍。Xavier N. Fernando 教授在 ROF 技术发展之初就站在了发展潮头，引领了 ROF 技术的进步。Fernando 教授以他渊博的教学经验和深刻的见解，在这本堪称经典的书中，给我们带来了 ROF 技术的全面认知。本书全面又崭新的知识，不仅对信息领域工程师和从业者，也对相关领域研究人员大有益处。我衷心希望 Fernando 教授能够看到这本经典著作对 ROF 这个重要技术乃至整个无线通信领域做出的贡献以及它所带来的多方关注。

Thas Ampalavanapillai Nirmalathas

墨尔本工学研究机构 (MERIT)

澳大利亚墨尔本大学工学院

# 原书前言

首先，感谢您购买此书，这一个明智的决定，您不会失望。如本书的名字所言，这本书首先为第一次接触光载无线通信领域的读者做一个基础介绍，随后本书会对该领域的前沿技术的不同主题分别进行深入讲解。本书主要针对对光子学知识不太了解的通信系统工程师所写，本书也包括一些站在工程师视角的设计理念，同时也包括 Fi - Wi 网络各前沿领域的正在进行的最新发展，这些内容对研究者和研究生们均有所帮助。

本书总结了多年来作者在这一领域的工作。作者在读研究生的时候，第一次被无线通信中使用光子学的技术所倾倒。作者曾经梦想构建兼具两者优势的系统，最初的想法是直接利用光纤中射出的光，但很快意识到光在空气中传播的瓶颈，于是转而研究光载 RF 通信——一个有更多实践方法但始终存在众多障碍的领域。

现在，在这个领域多年发展之后，已经有足够多的内容满足本书的架构。本书的独到之处在于其内容虽然和光载无线电以及光载无线系统有关，但它并不在微波光子学领域过多着墨，本书面向对光子学并没有很深的知识的通信系统工作者，同时，光子学专业人士也可从本书中系统级通信相关内容的理解中有所收获。

## 本书涉及的内容

让我们首先用最简短的语言概括本书涉及的内容。本书将对光载无线（Radio Over Fiber, ROF）通信系统做详细的研究。光载无线通信也称为光纤无线电（Fiber - Wireless, Fi - Wi）系统。这是一个热门技术，它直接结合了光通信的高带宽与无线网络灵活性和可移动性的优点提供宽带互联。

Fi - Wi 受到如此高度的关注有以下几个原因：

- Fi - Wi 技术可以快速、低成本地开发出微/极微蜂窝无线网络架构。这种架构可以在不使用额外频带的前提下，提高无线网络容量，从而可以解决日益紧张的频带不足问题。

- Fi - Wi 系统缩短了无线信道，从而支持真正的宽带互联。这一特性对实现空中接口比特率高达 10Gbit/s 的 5G 和更先进的无线网络特别具有吸引力。

- 基于 ROF 的 Fi - Wi 架构实现集中式处理和自适应比资源管理。这一特性对动态环境特别有利。

- ROF 是一种毫米波无线传输的强有力备选方案。空中接口的损耗在毫米波段变得异常严重。除了光纤之外，没有任何线缆可以在满足极低损耗和失真要求下，搭载毫米波信号传输给用户。

- Fi - Wi 网络可以在宽带宽下同时支持多个 RF 子载波。这是一个额外的

优势。

- 当今微波光子技术的成熟已让 ROF 链路元件的价格变得更低，而性能得到更多提升。Fi-Wi 系统因而获得更大的实用价值和吸引力。

- 当今大城市以及高速路和铁路上，有大量使用中或闲置的光纤。利用这些光纤构建 Fi-Wi 系统将节省更多开发费用。

不过，在大规模开发 Fi-Wi 网络之前，这项技术依然存在很多问题有待解决，比如功率分配能力的限制、大部分光发射器的低动态范围以及光纤本身限制无线小区大小等。而子载波复用的 ROF 系统需要高动态范围以耐受 RF 信号强度的变化，因光纤和无线信道在 Fi-Wi 中以串联形式存在，噪声和损耗会逐级积累。不仅如此，ROF 链路的非线性失真与无线信道的多径散射将会叠加。因此，信道估计和均衡将会是一个繁重的任务。级联信道需要先进的信号处理算法以进行估计和补偿。对多用户环境来说，这一任务将变得更具挑战性。先进的信号处理算法是克服这些限制的关键。

### 关于本书

本书可以归在 Fi-Wi 系统引论类图书中，主要面对研究生和现场工程师。由于内容的性质，读者如果对光纤光学和无线通信有基本了解，将会更容易理解本书。在本书中，我们不算过多讲解这些内容，不过，有关 Fi-Wi 系统和信号处理技术的基础将会在本书中进行清楚的阐述。

本书涵盖了两个学科的内容，在光学和无线通信领域间架设一座桥梁。实际上，与 ROF 领域飞速发展的现状相对的是相关文献的稀少，这与所需知识跨越两个领域有关。在日益进步的通信行业中，要求工程师拥有光学和无线通信方面的知识，并可以设计组合或混合系统，这些知识和能力可以从本书中有所收获。

拥有光学和无线通信专业知识的人士可以理解本书的构想。一般来说，一些 Fi-Wi 课题对从事 RF 领域工作的无线通信专业人员来说更易理解；其他一些 Fi-Wi 课题对从事光学领域工作的光子学的工程师来说更易理解。另一些课题对从事基带无线通信系统建模和开发相应算法的信号处理专业人士来说更易理解。本书的内容希望对这三方面的专业人士都有所裨益。

本书前面的一些章节力求让无线系统设计师、学生和研究者可以快速但扎实准确地理解 ROF 系统以及它的优势和局限。内容包括链路元件的基本特性、功率分配基本计算、ROF 链路的噪声情况分析以及得到考虑光电两方面信噪比的最优表达式。随后将展示因非线性噪声介质和时变散射介质造成的多载波 ROF 系统分析的复杂性。

在本书接下来的部分，将会讲解针对 Fi-Wi 信道的数字信号处理技术，它可以保证 Fi-Wi 信道的高质量通信。这一部分章节中将会针对多径失真和噪声，进行信道估计和均衡算法方面的研究。针对这一内容，我们将会讲解多用户 CDMA 环境以及 OFDM 环境。

---

本书的末尾将对无线通信的历史和未来系统的发展方向做一番回顾和展望。读者可以认识到光纤到馈必将会在未来无线通信网络中发挥重要作用。新兴的数字化 ROF 技术将克服模拟 ROF 系统非线性和累积噪声的问题，从而吸引更多关注。相干光纤 RF 链路系统也随着微波光子学和激光技术的进步逐步实现，从而为 ROF 链路性能带来更多提升。

## 原书致谢

很多人对本书的编写都进行了直接和非直接的帮助。首先，诚挚感谢 Abu Sesay 教授，他是我的博士课题导师。我在本书中所写的基础知识，都来源于 Abu Sesay 教授对我在 TRILabs 和 卡里加里大学期间的指导。我也感谢 TRILabs 对研究设备的慷慨支持和前沿课题研究的鼓励。

我同时感谢我毕业和在读的研究生们。这些学生慷慨地允许我使用他们研究期间的成果：Stephen Printer、Roland Yuen、Bharath Umasankar 和 Hatice Kosek。我也感谢 Sajjadul Latif 和 Sagar Chandra Kar，他们帮助了我进行部分文字和图表的编辑。

我感谢我的同事 Xijia Gu 博士，他在瑞尔森大学和我一起工作。

我也感谢如下机构对我研究的支持：加拿大自然科学与工学研究委员会；加拿大光子学与生产研究所。

特别感谢卡里加里大学的 Dave Irvine Halliday 博士，他是我的第一位光纤光学教授。我从他的教导中学到光纤光学的基础，并深深被它吸引。

我还要感谢瑞尔森大学的支持，同时也感谢 IEEE 对本书出版中使用我发表过的论文做了版权方面的工作。

最后，我要感谢我的家庭——我深爱的妻子 Ruby 以及我的爱子 Christma、Jonna 和 Kanisha ——他们在我编写本书的过程中给予了我莫大的支持和鼓励。

# 目 录

作者简介

原书序

原书前言

原书致谢

<b>1 引言</b>	1
1.1 背景介绍	1
1.1.1 ROF 系统	2
1.1.2 毫米波段 ROF	4
1.1.3 配置于特殊区域	5
1.1.4 对现有光纤的增值利用	6
1.1.5 微波光子学的进步	6
1.1.6 动态系统升级	7
1.2 基本 Fi - Wi 系统架构	8
1.2.1 两种调制类型	9
1.3 主要课题	10
1.4 其他光纤到馈方案	11
1.4.1 数字化 ROF	11
1.4.2 光纤中频通信	12
1.5 本书结构	12
<b>2 Fi - Wi 核心链路元件</b>	14
2.1 RF—光调制	14
2.1.1 直接强度调制和激光器二极管	14
2.1.2 外强度调制	21
2.2 光纤信道	23
2.2.1 衰减	23
2.2.2 多模光纤 ROF	25
2.2.3 单模光纤 ROF	26
2.2.4 干涉噪声	28
2.3 光接收器	29
2.3.1 光探测器	30
2.3.2 量子效率与带宽	32

2.4 基带—RF 调制技术简述 .....	33
2.4.1 相移键控 .....	33
2.4.2 幅移键控 .....	34
2.4.3 正交幅度调制 .....	34
2.5 无线信道 .....	35
2.5.1 室内传播 .....	35
2.5.2 室外传播 .....	35
2.5.3 路径损耗模型 .....	35
2.5.4 多径传播和衰落 .....	37
<b>3 功率链路分配与累积性 SNR .....</b>	<b>40</b>
3.1 引言 .....	40
3.2 系统描述 .....	40
3.3 光学 SNR .....	42
3.3.1 各种噪声对 OSNR 的影响 .....	45
3.4 累积性 SNR .....	46
3.4.1 无线和光链路噪声功率相近 .....	47
3.5 RAP 设计思想 .....	48
3.5.1 光接收器放大增益 .....	49
3.5.2 小区覆盖面积 .....	51
3.6 总结 .....	51
<b>4 对相关性强度噪声表达式的改进 .....</b>	<b>53</b>
4.1 基础 .....	53
4.2 ROF 链路中的基本噪声处理 .....	54
4.2.1 散粒噪声 .....	55
4.2.2 相关性强度噪声 .....	56
4.3 信噪比 .....	58
4.4 数值评估和讨论 .....	59
4.4.1 SCM ROF 系统的噪声等级增加 .....	59
4.5 总结 .....	61
<b>5 子载波复用 ROF 下行链路 .....</b>	<b>62</b>
5.1 引言 .....	62
5.1.1 背景介绍 .....	63
5.2 ROF 下行链路信道 .....	63
5.2.1 高阶项 .....	65
5.3 无线下行链路信道 .....	73
5.4 定量评估与讨论 .....	74
<b>6 子载波复用 ROF 上行链路 .....</b>	<b>78</b>
6.1 无线上行链路信道 .....	79

---

6.2	ROF 上行链路信道 .....	80
6.2.1	非线性失真 .....	81
6.2.2	高阶项 .....	82
6.3	信号失真、串扰和噪声比 .....	89
6.4	定量评估和讨论 .....	91
6.5	总结 .....	97
<b>7</b>	<b>外调制 ROF 链路 .....</b>	<b>98</b>
7.1	Mach - Zehnder 调制器 .....	98
7.1.1	MZI 原理 .....	100
7.2	电吸收调制 .....	101
7.3	反射型半导体光放大器 .....	103
7.4	MZI 偏置电压的优化 .....	104
7.4.1	RF 增益最大化 .....	105
7.4.2	噪声因数最小化 .....	107
7.4.3	无杂散动态范围最大化 .....	108
7.4.4	合并品质因数 .....	110
7.5	MZI 子载波复用 .....	111
<b>8</b>	<b>ROF 链路非线性的 DSP 建模 .....</b>	<b>115</b>
8.1	引论 .....	115
8.1.1	线性动态范围的要求 .....	115
8.1.2	相位非线性 .....	116
8.2	减小 NLD 的若干种尝试 .....	116
8.2.1	动态增益控制器和衰减器 .....	116
8.2.2	静态的光-电方案 .....	116
8.2.3	一些最新技术 .....	117
8.3	DSP 方法 .....	118
8.3.1	对光波段失真的基带补偿 .....	118
8.4	非线性系统的 DSP 基础 .....	119
8.4.1	Volterra 级数模型 .....	120
8.4.2	离散时域问题 .....	121
8.5	通频带复非线性系统的基带表示 .....	121
8.6	Fi - Wi 链路的非线性建模 .....	122
<b>9</b>	<b>ROF 链路非线性的自适应补偿 .....</b>	<b>123</b>
9.1	ROF 链路的自适应模型 .....	123
9.1.1	Volterra 核优化 .....	123
9.1.2	滤波器阶数和记忆 .....	124
9.1.3	实例研究 .....	127
9.2	非对称补偿 .....	129

9.2.1	预补偿与后验补偿 .....	130
9.2.2	非对称补偿的共性 .....	132
9.2.3	自适应 DSP 补偿的实例研究 .....	134
9.2.4	查询表与自适应滤波补偿 .....	137
9.3	总结 .....	137
<b>10</b>	<b>Fi – Wi 信道的联合估计 .....</b>	<b>139</b>
10.1	Fi – Wi 链路的 Wiener 和 Hammerstein 系统模型 .....	139
10.2	Fi – Wi 信道估计 .....	140
10.2.1	输入/输出相关法 .....	141
10.2.2	线性部分估计 .....	142
10.2.3	非线性部分估计 .....	145
10.3	实例研究 .....	146
10.3.1	线性系统识别 .....	147
10.3.2	非线性系统识别 .....	148
10.4	总结 .....	149
<b>11</b>	<b>Fi – Wi 信道的联合均衡 .....</b>	<b>150</b>
11.1	无线信道的均衡 .....	150
11.1.1	非线性增强型判决反馈均衡器 .....	151
11.1.2	Hammerstein 型 DFE .....	151
11.1.3	振幅和时域处理 .....	152
11.2	多项式滤波器参数优化 .....	153
11.2.1	直接生成逆多项式 .....	153
11.3	线性滤波器参数优化 .....	155
11.3.1	模型描述 .....	155
11.3.2	参数优化 .....	158
11.4	总结 .....	159
<b>12</b>	<b>Hammerstein 型 DFE 的性能评估 .....</b>	<b>160</b>
12.1	多项式滤波器评估 .....	160
12.1.1	时间色散的非线性变换 .....	160
12.1.2	逆多项式变换 .....	162
12.1.3	多项式滤波器误差的期望 .....	163
12.2	线性滤波器评估 .....	165
12.2.1	无限长结果 .....	165
12.2.2	有限长结果 .....	166
12.3	实例研究 .....	166
12.3.1	多项式滤波器的方均误差 .....	166
12.3.2	线性滤波器的方均误差 .....	172
12.3.3	HDFE 的 BER 性能 .....	172

---

12.4 总结 .....	173
<b>13 多用户 CDMA Fi - Wi 系统 .....</b>	<b>174</b>
13.1 多用户 Fi - Wi 上行链路模型 .....	174
13.2 相关性关系 .....	176
13.2.1 广义输入 - 输出相关性 .....	176
13.2.2 多用户下的输入 - 核相关性 .....	178
13.3 ROF 信道估计 .....	180
13.4 实例研究 .....	181
13.4.1 仿真参数 .....	181
13.4.2 无线信道识别 .....	182
13.4.3 光纤链路识别 .....	183
13.5 Fi - Wi 上行链路均衡 .....	184
13.5.1 无线信道均衡 .....	184
13.5.2 序列回归线性化 .....	184
13.6 均衡: 仿真结果和讨论 .....	185
13.7 总结 .....	187
<b>14 4G、5G 以及无线 OFDM 网络的 Fi - Wi .....</b>	<b>188</b>
14.1 蜂窝通信系统简史 .....	189
14.1.1 全球范围互通性微波接入 .....	189
14.1.2 长期演进 .....	190
14.2 无线接入方案 .....	191
14.2.1 正交频分复用接入 .....	191
14.3 减小峰值 - 平均功率比的技术 .....	194
14.4 OFDM ROF 系统进化 .....	195
14.4.1 自适应调制技术 .....	196
14.4.2 实例研究 .....	198
14.5 OFDMA 和 CDMA 的融合 .....	198
14.6 总结 .....	199
<b>参考文献 .....</b>	<b>200</b>
<b>附录: 缩略语表 .....</b>	<b>207</b>

# 1 引 言

## 1.1 背景介绍

人们对无线通信服务的需求多年来一直持续增长，据世界技术、媒体和通信（GTMT）组织统计，世界手机用户数量将在 2020 年接近 76 亿，比 2011 年的 54 亿用户数量增长 41%。换句话说，在 2020 年的时候，无线设备使用者数占全球总人口的比重将从 2011 年的 87% 上升至 99%。

这种需求的增长有两个原因。首先，是消费者数量的持续增长。除此以外，这些消费者对带宽的需求呈现出更快的增长，其增长率甚至超过了消费者数量增长本身。智能手机和平板电脑的大量出现使多媒体业务呈现了如上的增长情况。例如，仅在 2012 年，智能手机的平均使用率增长了 81%。图片传输和视频流媒体以及新兴的云数据服务也呈现了相同的增长率。机对机（M2M）通信以及物联网的快速崛起更加深了对带宽的需求。世界移动数据通信量在 2012 年增长了 70%，这一数字大约是 2000 年全球互联网通信量的 12 倍<sup>[1]</sup>。未来，数据通信量将会以前所未有的速度增长。很多最新预测表明 2010 ~ 2015 年间，移动数据通信量将增长超过 24 倍，而在未来以更快速率增长<sup>[2]</sup>。网络运营上为了满足这种需求和保持竞争力，需要快速增加它们的网络带宽。这对无线系统设计者提出了巨大的挑战。研究者们一直以来都在为实现空中接口 Gbit/s 级速率而努力<sup>[3]</sup>。

一般来说，当前宏小区（macro cell）及其相对较长的无线信道无法支持超高比特率。也就是说，在给定传输功率的情况下，无线发射端和接收端之间的距离成为了信道比特率的瓶颈。长无线信道会由于自由空间损耗、阴影效应、折射、散射、反射，和失真造成的高路径损耗限制比特率。更多研究表明，在极高比特率（非常低的单位比特功率）通信时，空中接口会大幅度缩短，以维持可用的功率链路分配<sup>[4]</sup>。无线信道路径噪声指数在 1.5 ~ 4 之间（自由空间为 2，相对恶劣的环境为 4）。在某些环境中，如建筑物、运动场馆和其他室内环境中，路径损耗指数将会达到 4 ~ 6。除此之外，长空中接口会造成更大的多径延迟，从而造成高码间串扰增或高频率选择性衰落。

因此，未来的 4G 和 5G 网络在缩短空中接口和增加带宽方面提出了诸多方案<sup>[2]</sup>。显然，提高无线接入点密度会缩短无线信道。此方案已经在很多地方开始实施。其面临的挑战是如何馈通这些无线接入点。传统上，点对点微波链路是互联远程无线接入点的最好方案。它可快速布置且成本低廉。但是，随着远程接入点的

增加，相应的宽带无线接入网络规模增长大大降低了点对点微波链路的优势。系统设计者需要一种新技术，通常从光学方案入手。自由空间光链路在一些场合用于替代点对点微波链路。不过，其技术有诸多问题——如敏感度会受到耦合和天气情况的影响——限制了自由空间光链路的实用性。

### 1.1.1 ROF 系统

在本书中我们研究的 ROF (Radio Over Fiber, 光载无线通信又称光纤无线电) 技术是一种高效的宽带无线接入点馈通方案。ROF 的定义为射频信号在光纤上传输以提供无线通信服务。注意 ROF 实质上是一种模拟通信方案，虽然无线链路传输的是数字信号，这可能带来一定的误解。因此，用更科学准确的说法定义模拟光链路：激光器始终发光，或光学调制度足够小到各种链路设备可以进行小信号分析的链路。与此不同的是数字光链路，它的光学调制度可以达到 100%，激光器根据调制数据序列进行开关。

该系统也被称为光纤 - 无线 (Fiber - Wireless, Fi - Wi, 也译作光纤无线电) 系统。在 Fi - Wi 系统中，光纤富裕的带宽可有效提供宽带无线接入，缩短无线信道并使无线信号更靠近用户。

ROF Fi - Wi 系统将无线网络的 RF 信号调制到光载波中。尽管光载 RF 信号已经在其他领域如有线电视网络和卫星基站实现，但术语 ROF 在文献中专指 Fi - Wi 通信系统。我们将延续这一惯例。一个简单的 ROF Fi - Wi 架构如图 1.1 所示，来自中心基站 (CBS) 的 RF 信号首先通过光纤传输到远程天线，然后通过无线信道到达用户。上行链路和这个过程顺序相反。这一低成本方案可构建微/极微小区无

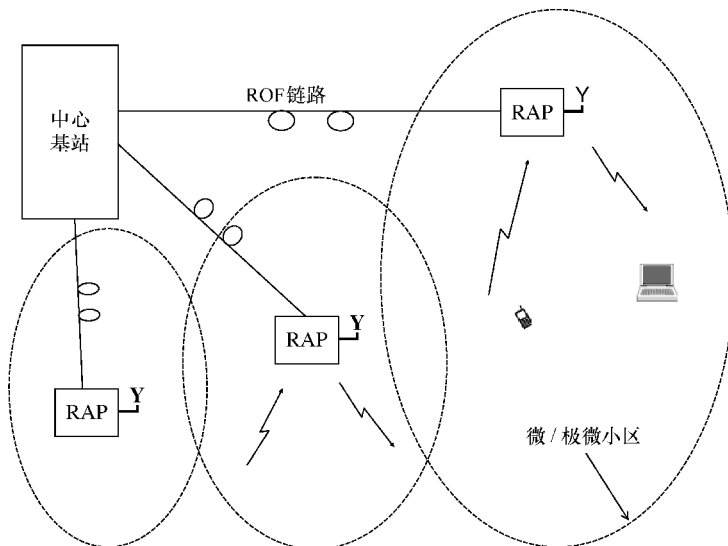


图 1.1 简单的点对点光纤链路 Fi - Wi 接入方案