

新视野

电子电气  
科技丛书

**WIRELESS TRANSCEIVER DESIGN:  
MASTERING THE DESIGN OF  
MODERN WIRELESS EQUIPMENT AND SYSTEMS  
(SECOND EDITION)**

# 无线收发器设计指南

## 现代无线设备与系统篇

(原书第2版)

[以色列] 阿里埃勒·卢扎托 (Ariel Luzzatto)

[以色列] 莫蒂·赫瑞汀 (Motti Haridim)

闫娜 程加力 陈波 高建军 译

著

清华大学出版社

新视野

电子电气  
科技丛书

**WIRELESS TRANSCEIVER DESIGN:**  
**MASTERING THE DESIGN OF**  
**MODERN WIRELESS EQUIPMENT AND SYSTEMS**  
(SECOND EDITION)

# 无线收发器设计指南

## 现代无线设备与系统篇

(原书第2版)

[以色列] 阿里埃勒·卢扎托 (Ariel Luzzatto)

[以色列] 莫蒂·赫瑞汀 (Motti Haridim)

闫娜 程加力 陈波 高建军 译

著

清华大学出版社

北京

Wireless Transceiver Design: Mastering the Design of Modern Wireless Equipment and Systems, 2nd Edition  
Ariel Luzzatto, Motti Haridim

ISBN: 9781118937402

Copyright © 2017 by John Wiley & Sons, Limited. All rights reserved.

Copyright © 2018 by John Wiley & Sons Limited and Tsinghua University Press. All rights reserved.

All Rights Reserved. Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with Tsinghua University Press Limited and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

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

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2017-4646

版权所有,侵权必究。侵权举报电话: 010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

无线收发器设计指南: 现代无线设备与系统篇(原书第2版)/(以色列)阿里埃勒·卢扎托(Ariel Luzzatto), (以色列)莫蒂·赫瑞汀(Motti Haridim)著; 闫娜等译. —北京: 清华大学出版社, 2019 (2019.5重印)  
(新视野电子电气科技丛书)

书名原文: Wireless Transceiver Design: Mastering the Design of Modern Wireless Equipment and Systems, 2nd Edition

ISBN 978-7-302-51079-6

I. ①无… II. ①阿… ②莫… ③闫… III. ①无线电台—设计—指南 IV. ①TN924-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第195606号

责任编辑: 曾 珊 李 晔

封面设计: 傅瑞学

责任校对: 李建庄

责任印制: 丛怀宇

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦A座

邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175

邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈: 010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者: 三河市铭诚印务有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185mm×260mm 印 张: 20.75

字 数: 502千字

版 次: 2019年2月第1版

印 次: 2019年5月第2次印刷

定 价: 99.00元

产品编号: 073813-01

## 推荐语

本书以接近实际工程应用为目的,对射频相关的基本概念和理论做了详细而全面的介绍,帮助初学者建立对射频知识的全面了解。书中配备大量的练习以及习题解答,有助于读者对于这些概念的深入理解和应用,为学习者提供了必要的指导。

——曾晓洋,国家杰出青年科学基金获得者,长江学者特聘教授,复旦大学教授

本书系统地讲述了射频系统的基本概念、各种收发器架构的优缺点,以及射频系统中所涉及各个关键模块,能够帮助读者由浅入深地学习射频相关的基础知识;同时结合各类习题,进一步融会贯通,为无线收发器系统设计提供理论及实践指导,对高年级本科生及研究生的学习具有较高的参考价值。

——闵昊,上海坤锐电子科技有限公司董事长,复旦大学教授

该书由从事射频领域相关工作多年的业界精英和学术界教授合作而成,理论分析严谨且实用性强,对于研究生和职场工程师来说都是一部不可多得的好书。

——唐万春,南京师范大学教授

与同类图书相比,本书的突出特点是重视实践!作者从事相关工作三十余年,具有丰富的实践经验,在设计各种结构时能够充分考虑各种电路寄生效应,这能给工程师设计实际电路时带来很好的指导。

——王经卓,淮海工学院电子工程学院院长

这本书为有经验的无线电和通信工程师提供全面、独立、易于理解的现代无线调制解调器和收发器设计的理论和实际指导。章节安排非常适合教师教学,同时也有很多实践经验的介绍。

——郭裕顺,杭州电子科技大学教授

原书的两位作者均从事无线收发器设计相关工作多年,基于实际教学和实践完成了这本教程。因此,其非常适合作为通信工程、电子信息工程和微电子等专业本科生及研究生的教材,也适合作为从事射频系统、射频集成电路和无线系统设计工程技术人员的参考用书。

——孙玲,南通大学教授

# 译者序

无线收发系统是现代无线通信系统的关键单元电路,无线通信与移动互联网技术的迅速发展,一方面不断推动无线收发器向高集成度、低功耗和高性价比的方向发展,另一方面又对无线收发器提出了更高的技术要求,无线收发器已经成为无线通信系统中最具有挑战性的单元电路之一。

本书作者 Ariel Luzzatto 博士在无线通信领域拥有 35 年的研发工作经验,目前担任 L&L 科技有限公司 CEO,同时是以色列几所学术机构的讲师。Motti Haridim 先生目前是以色列霍隆理工学院(Holon Institute of Technology)教授,他在通信、电磁波传播、光通信领域发表了 100 多篇学术论文。自从 2007 年本书出版以来,被业界认为是无线通信领域不可多得优秀参考书籍,深受广大读者好评。10 年来,由于无线通信领域的快速发展,涌现出了很多新技术,作者在第 1 版基础上修订和更新了部分内容,完成了第 2 版的内容。为了进一步促进我国无线通信技术的发展,得益于清华大学出版社的大力支持和鼓励,我们决定翻译出版这本著作。

该书从工程实际应用的角度出发,详细分析了各种不同无线收发系统的特性,深入浅出,通俗易懂,不仅可以作为广大工程技术人员的参考书,也可以作为高等院校相关专业的教材。为尊重原著,书中电路图沿用了原版书的原图符号,未改为国标符号;另外,章节编排及坐标图也沿用了原文形式,未做标准化处理。

复旦大学微电子学院专用集成电路与系统国家重点实验室和华东师范大学信息学院部分研究生也对本书的翻译工作做出了贡献,在此表示衷心的感谢!尽管大家在无线通信领域都有一定的工作、研究经验,但翻译过程没有想象的那么顺利,我们都因此收获颇丰。

也许本书作者打算在第一时间与作者分享他的最新成果,因此本书中有些地方还有进一步改进的空间,甚至还有一些疏漏。在翻译过程中,我们已经修改了多处比较明显的欠妥之处。由于译者水平有限,书中可能会有一些有待改进之处,恳请大家在阅读过程中发现问题后不吝指教,向我们反馈,非常感谢!我们的联系方式:yanna@fudan.edu.cn。

最后还要感谢清华大学出版社对本书翻译工作的大力支持,感谢各位编辑在翻译和审校等环节的辛勤付出。

译者

2018 年 10 月

# 前言

随着大规模射频(RF)半导体技术的发展,世界正在真真正正地走向无线。几乎所有我们曾经看到的连接着插头和电线的东西,现在渐渐都变成了无线连接。无论是出于管理的目的,还是出于建立系统的目的,抑或是为了连接大型系统,成为系统的一部分,越来越多的商业产品也都兼容了无线网连接功能。无线技术、协议、物理层、频段和应用的数目正在爆炸式增长。现在,商业价格合理的、低电流消耗的千兆赫兹采样 AD 转换电路越来越多,而且其信号处理速率在不断提高,计算能力也在不断增强,这使得收发机环路中越来越多的硬件 RF 模块被替换为相应的软件算法。然而,无论是怎样的实现方式,从架构的角度来看,RF 模块、环路结构以及射频系统级的设计基本没有发生什么变化。因此,我们见证着一个特殊的信号处理领域的发展,在这个领域中,不仅需要 RF 设计技术有着系统级、子系统级和模块级的深刻理解和娴熟技巧,同时需要在特定的与 RF 紧密相关的信号处理领域拥有着前沿的了解和先进的技术。这种发展引发了对该领域的专家的需求,一般我们称这些专家为“信号处理导向性射频工程师”或“射频导向性信号处理工程师”。当然,现在仍然存在着一些无法用软件实现的 RF 模块,它们会继续以硬件的形式存在着。故本书将同时兼顾基于硬件的设计方法和全数字的设计技术,如直接 RF 采样(Direct RF Sampling, DRFS)技术。此外,对于那些我们认为现成组件可用或适合于信号处理的模块,我们将主要关注其系统级设计,只有对那些我们认为将一直以硬件形式保留的特殊功能模块,才对其进行详细的硬件设计讨论。

## 致老师

本书是 2007 年出版的第 1 版《无线收发器设计》的面向教学的演进,旨在成为教师、三年级和四年级本科工程学生、研究生和研发工程师使用的指导教材。

本书是作者根据其广泛的教学经验编写而成的,其内容很好地适应了教学目标,特别是有效地帮助了老师进行相关课程的备课。

本书包括大量充分的练习和例子,帮助大家在学习的路上建立信心。附录提供了在实际中使用过的、典型的、格式合适的两小时考试试卷,学习过该书的学生应该可以轻松应对。

为了提供一个非常友好的、“不客气”的和自我评价的指南,这本以教学为导向的教科书在每个主要章节的主体中都包含详细的启发式解释以及最终的适用结果和详细的例子。这些启发式解释和示例可以让读者彻底了解和感受所涉及的机制,帮助其建立信心,使学生正确使用适用的结果和公式(仍然不强求他们深入到复杂的数学演算中)并协助教师保持讨论畅通无阻。书中也提供了详细的数学证明和公式以及更加复杂艰深的讨论。但是,为了让理论在实践和教育中得到更好的使用,它们不是本书必须阅读的内容,而是以附录的方式放

到了全书的末尾,以便让感兴趣的读者在需要的时候了解细节。

从教师的角度来看,上述结构有助于从不同层次的深度准备课程,从基本的理解出发,让教师在需要的时候选择性地“放大”与深入课程。

最后两章包括了相关背景主题的基本理论和有用的提示,帮助补充知识的漏洞,为教师和学生减少了了解新学科或补充知识漏洞时巨大的搜索资料任务与时间。

## 关于作者

Ariel Luzzatto 拥有超过 35 年的研发经验,主要设计商业和工业通信与射频产品。Ariel 是摩托罗拉以色列有限公司的首席科学家。截至 2009 年,他担任 L&L 科学有限公司的首席执行官,以及以色列几所主要学术机构的通信电路和系统讲师。他拥有博士学位和应用数学硕士学位,以及电子工程理学学士学位,均来自特拉维夫(Tel Aviv)大学。

Motti Haridim 拥有以色列理工学院(Technion, Israel Institute of Technology, Haifa)博士学位,是以色列霍隆理工学院(Holon Institute of Technology, HIT)电气工程专业的教授。他的研究方向和成就主要集中在通信系统的物理层,包括光通信、射频通信、天线和电磁辐射等。他在天线、辐射、射频通信和光通信的理论和应用方面拥有 100 多篇技术性论文。自 2014 年起,他担任 HIT 学术发展副总裁。

## 致谢

作者想要感谢加迪·希拉齐(Gadi Shirazi)先生作为共同撰稿人的贡献,2007 年是他与 Ariel Luzzatto 博士合作出版了本书第 1 版。

# 目录

<b>第 1 章 简介</b> .....	1
1.1 射频系统 .....	1
1.1.1 射频系统的概念 .....	1
1.1.2 频谱 .....	2
1.1.3 蜂窝的概念 .....	2
1.2 无线系统和技术的详细概述 .....	3
1.2.1 系统类型 .....	3
1.2.2 无线网络架构 .....	4
1.2.3 无线局域网 .....	9
1.2.4 无线广域网 .....	11
1.2.5 访问方式 .....	16
1.2.6 发射接收机制 .....	20
参考文献 .....	21
<b>第 2 章 收发机架构</b> .....	23
2.1 接收机架构 .....	23
2.2 超外差接收机 .....	24
2.2.1 定义及工作原理 .....	24
2.2.2 优缺点 .....	28
2.2.3 中频频率的选择 .....	28
2.3 直接变频接收机 .....	29
2.3.1 定义及工作原理 .....	29
2.3.2 优缺点 .....	30
2.4 直接射频采样接收机 .....	30
2.4.1 定义及工作原理 .....	30
2.4.2 直接射频采样中 I 和 Q 信道的恢复 .....	33
2.5 发射机系统 .....	35
2.6 两次变频发射机 .....	35
2.6.1 定义及工作原理 .....	35
2.6.2 优缺点 .....	37
2.7 直接发射机 .....	38
2.7.1 定义及工作原理 .....	38

2.7.2 优缺点 .....	38
2.8 直接射频采样发射机 .....	39
2.9 收发机架构 .....	42
2.10 全双工/半双工架构 .....	42
2.11 时分架构 .....	43
2.12 习题详解 .....	44
2.13 等式背后的理论 .....	48
2.13.1 直接射频采样发射机 .....	48
2.13.2 采样理论 .....	49
参考文献 .....	50
<b>第3章 接收机系统</b> .....	<b>52</b>
3.1 灵敏度 .....	53
3.1.1 灵敏度是什么 .....	53
3.1.2 中间灵敏度 .....	56
3.1.3 灵敏度的测量 .....	60
3.2 同信道抑制 .....	62
3.2.1 定义及工作原理 .....	62
3.2.2 同信道抑制的测量 .....	62
3.3 选择性 .....	63
3.3.1 定义及工作原理 .....	63
3.3.2 选择性的测量 .....	69
3.4 阻塞 .....	70
3.4.1 定义及工作原理 .....	70
3.4.2 阻塞的测量 .....	72
3.5 互调抑制 .....	72
3.5.1 定义及工作原理 .....	72
3.5.2 互调的测量 .....	76
3.6 镜像抑制 .....	77
3.6.1 定义及工作原理 .....	77
3.6.2 镜像抑制的测量 .....	79
3.7 半中频抑制 .....	80
3.7.1 定义及工作原理 .....	80
3.7.2 半中频抑制的测量 .....	83
3.8 动态范围 .....	83
3.8.1 定义及工作原理 .....	83
3.8.2 动态范围的测量 .....	83
3.9 双工灵敏度劣化 .....	84
3.9.1 定义及工作原理 .....	84
3.9.2 双工灵敏度恶化的测量 .....	86

3.10	其余双工杂散 .....	87
3.11	其他接收机干扰 .....	88
3.12	习题详解 .....	90
3.13	公式背后的理论 .....	102
3.13.1	灵敏度 .....	103
3.13.2	同信道抑制 .....	104
3.13.3	选择性 .....	104
3.13.4	互调 .....	105
3.13.5	镜像抑制 .....	105
3.13.6	半 IF 抑制 .....	106
3.13.7	双工器机制 .....	107
3.13.8	双工灵敏度劣化 .....	109
3.14	直接 RF 采样接收机的延伸 .....	110
3.14.1	ADC 噪声因子 .....	110
3.14.2	DRFS 接收机中的信噪比,选择性和阻塞 .....	112
3.14.3	关于量化噪声的提示 .....	115
	参考文献 .....	116
<b>第 4 章</b>	<b>发射机 .....</b>	<b>118</b>
4.1	峰均比 .....	119
4.1.1	定义及工作原理 .....	119
4.1.2	峰均比的测量 .....	122
4.2	射频功率放大器的非线性 .....	122
4.2.1	什么是射频功率放大器的非线性 .....	122
4.2.2	功率放大器的三阶主导特性 .....	125
4.2.3	功率放大器的四阶主导特性 .....	127
4.2.4	功率放大器输出的带内频谱图 .....	129
4.2.5	功率放大器的模拟方法 .....	131
4.2.6	$N$ 阶互调失真 .....	132
4.2.7	$N$ 阶输入截点 .....	138
4.3	发射机技术规范 .....	140
4.3.1	频谱罩 .....	140
4.3.2	误差矢量幅度 .....	140
4.3.3	相邻信道功率比 .....	142
4.3.4	功率放大器(PA)效率 .....	143
4.3.5	发射机瞬态 .....	143
4.3.6	空间辐射 .....	144
4.3.7	传导辐射 .....	144
4.4	增强技术 .....	146
4.4.1	线性化技术 .....	146

4.4.2	包络跟踪供应	149
4.5	习题详解	150
4.6	方程式相关理论	158
4.6.1	准静态射频信号的峰均比计算	158
4.6.2	功放非线性的分析模型	160
4.6.3	功放非线性对数字调制的影响	163
4.6.4	功放非线性对频谱形状的影响	164
4.6.5	功率放大器的非线性表征	168
	参考文献	171
<b>第5章</b>	<b>综合器</b>	173
5.1	整数 $N$ 分频综合器	173
5.2	分数 $N$ 综合器	182
5.2.1	定义及工作原理	182
5.2.2	示例：双计数分数 $N$ 综合器	184
5.3	直接数字综合器	185
5.4	整数 $N$ /DDS 混合频率综合器	187
5.5	习题详解	188
5.6	公式背后的原理	194
	参考文献	200
<b>第6章</b>	<b>振荡器</b>	201
6.1	低功耗自限幅振荡器	202
6.1.1	定义及工作原理	202
6.1.2	实际电路	205
6.2	基于分布式谐振器的振荡器	213
6.3	习题详解	216
6.4	方程基础理论	227
6.4.1	通用 $\pi$ 型结构滤波器分析	227
6.4.2	Leeson 方程	229
6.4.3	谐振传输线的集总等效电路	236
6.4.4	压控振荡器	238
	参考文献	238
<b>第7章</b>	<b>RF 模块</b>	240
7.1	天线	240
7.1.1	天线的定义	240
7.1.2	天线的工作原理	240
7.1.3	天线的基本参数	241
7.1.4	天线阵列	244
7.1.5	智能天线	244

7.1.6	天线类型	245
7.1.7	习题详解	247
7.2	低噪声放大器	248
7.2.1	定义及工作原理	248
7.2.2	两端口网络的噪声(经典方法)	249
7.2.3	LNA 的拓扑结构	252
7.3	滤波器	255
7.3.1	滤波器设计	257
7.3.2	滤波器系列	258
7.3.3	滤波器类型	259
7.3.4	滤波器技术	260
7.4	功率放大器	261
7.4.1	放大器分类	262
7.4.2	设计	264
7.5	混频器	270
7.5.1	性能测量	271
7.5.2	混频器的种类	271
7.5.3	MOSFET 混频器	272
7.5.4	双极型混频器	273
	参考文献	274
<b>第 8 章</b>	<b>备注</b>	276
8.1	射频信道	276
8.1.1	大尺度衰落和小尺度衰落	276
8.1.2	衰落余量	278
8.1.3	衰落分类	278
8.1.4	多普勒效应	279
8.2	噪声	280
8.2.1	热噪声	280
8.2.2	信噪比	281
8.2.3	噪声因子和噪声系数	281
8.3	传输	282
8.3.1	对数标度	282
8.3.2	Friis 公式	283
8.3.3	双径模型	283
8.4	路径损耗	284
8.5	调制	284
8.5.1	幅度调制	284
8.5.2	频率调制	285
8.5.3	建模载波相位噪声为窄带 FM	287

8.6 多输入和多输出 .....	288
参考文献 .....	290
附录 附加测试 .....	291
测试 1 .....	291
测试 2 .....	292
术语表 .....	295

### 1.1 射频系统

射频(RF)系统是我们日常生活中的重要组成部分。射频系统为多种应用场景提供无线连接,例如短程车/门开启装置和无线耳机,以及中程数字系统,如用于计算机数据连接的路由器和远程驾驶车辆控制,或长距离通信系统(例如移动电话和卫星网络)。然而,无线收发机的所需特性极强地依赖于设备所针对的目标系统的特点。本章中将给出几个重要射频系统的详细概述,目的是为读者提供关于不同架构和运行需求的背景知识,这直接决定了后续章节中讨论的各种收发机的设计方法。

#### 1.1.1 射频系统的概念

射频系统基本上由五个主要部件组成,如图 1.1 所示。

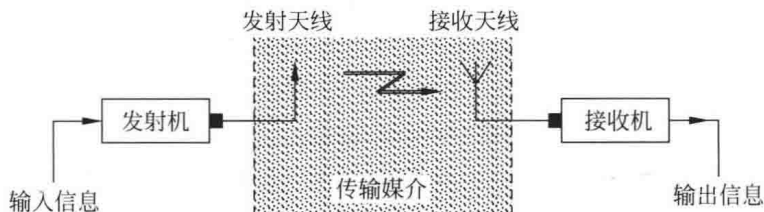


图 1.1 单向射频系统

**发射机:** 接收输入端的信息,用输入信息调制射频信号,将射频信号放大到合适的功率并输出到天线端口。

**发射天线:** 作为发射机和传输信道之间的媒介。目的是确保射频信号功率全部通过天线端口发射出去,进入传输信道,并在特定方向传输。

**传输信道:** 将发射机与接收机分开。射频信号必须通过它才能到达接收端天线。通常传输媒介由空气或真空组成,但也可以是固体或液体。射频信号通过传输媒介传播时,信号

强度会逐渐衰减,并变得越来越弱。

**接收天线:** 作为传输信号和接收机之间的媒介,其功能是尽可能多地捕获通过传输信道入射的(弱)射频信号功率,并将这些信号传送到接收机的输入端。

**接收机:** 接收来自接收天线的射频信号,提取其中携带的信息,并将信息传送到接收机输出端。

如图 1.1 所示的系统是单向的。然而,在相反方向增加相同的射频系统将产生双向射频系统,如图 1.2 所示。发射机、接收机合称为“收发机”。天线可以同时发射和接收,而发射机和接收机彼此独立工作。

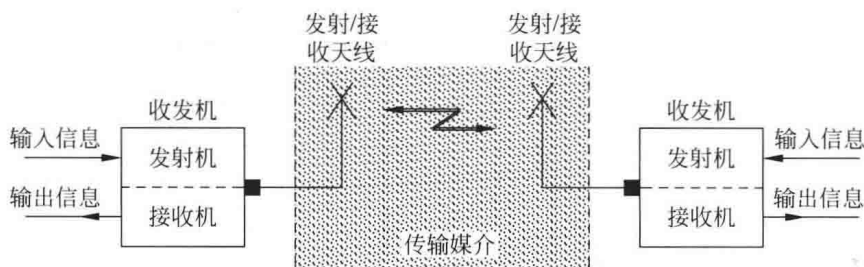


图 1.2 双向射频系统

### 1.1.2 频谱

由于各种原因,并非所有的射频频率都适用于实现不同的射频系统。例如,由于发射和接收天线的最佳物理尺寸与频率直接相关,并且随着频率降低,要求天线尺寸越大,因此在低频下天线尺寸将变得不切实际,例如蜂窝移动系统应用。反之,随着频率变高,天线尺寸将会变小,但通过介质后的功率损耗和多普勒衰落将会增加,这限制了信号传输范围和设备移动速度。因此,射频频率范围的选择取决于其不同的应用,并且有效射频信道的数量是有限的。如今已开发了若干射频系统架构以克服频率资源短缺问题,例如蜂窝架构。

### 1.1.3 蜂窝的概念

蜂窝概念非常重要。许多现代射频系统都建立在蜂窝网络的基础上,因此有必要在这里简要讨论一下蜂窝网络。正如前一节指出的,移动应用系统可用频率的数量有限,如图 1.3 所示,假设发现大量的移动端用户同时出现在区域 A,进一步假设有  $N$  个可供使用的射频信道并且所有的用户通过一个中央基站互联,该基站位于一个合适高点,可提供合适的地理覆盖。因此,系统容量被限制在同一时刻每平方米用户数量为  $C=N/A$ 。显然,这样的架构性能有限,并且不能覆盖大区域的大型通信系统。

现在,参考图 1.4,假设将相同的区域 A 划分成单独的子区域,并称为“小区(cells)”。在每个小区的中心放置一个基站,使其发射的功率足以覆盖自己的小区,但由于发射功率比较低,以至于在相邻小区不能接收到它的信号。基站物理线路相互连接,连接到一台作为交换机的中央计算机上。现在,假设将小区按规则图形排列,称为集群(clusters),每个集群由  $K$  个相邻的小区组成。

由于属于不同集群的小区之间几乎没有干扰,因此可以在每个集群内使用所有的  $N$  个频率。如果整个覆盖区域由  $M$  个集群组成,那么系统容量则提高到  $C=N/(A/M)=MN/A$

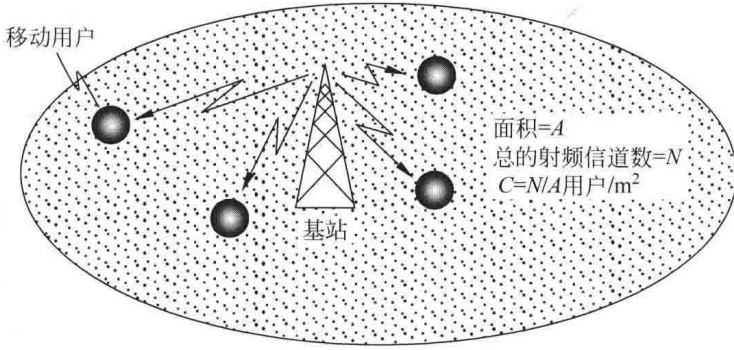


图 1.3 有限容量射频系统

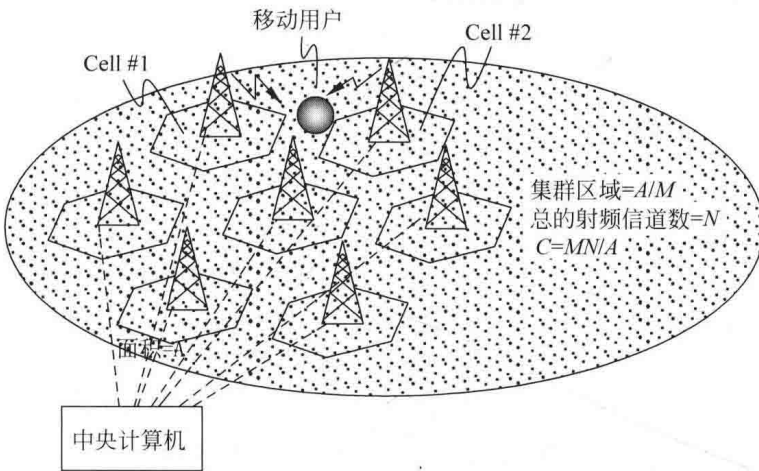


图 1.4 蜂窝原理

$A$ , 相比于之前的系统容量提高到了  $M$  倍。然而, 剩下的问题是如何防止移动用户从一个小小区移动到另一个小小区时失去通信信号。为了解决这个问题, 假设在各个小小区中的基站持续地向中央计算机报告它们接收到的附近移动用户的情况。现在假定移动用户连接到小小区 #1 的基站并且在远离 #1 小小区时正在接近 #2 小小区。用户将在某一点上开始失去与 #1 小小区的通信, 而与 #2 小小区的连接逐渐增强。由于中央计算机发现了这一情况, 于是在某一点将指示移动用户离开 #1 小小区的信道并连接到 #2 小小区的空闲信道, 这个允许移动用户从一个小小区连接到另一个小小区而不失去通信的过程被称为“切换”。微处理器芯片的出现使蜂窝结构成为可能, 它提高了移动设备的智能计算能力, 使其能够自动处理跨小小区切换过程。

## 1.2 无线系统和技术的详细概述

### 1.2.1 系统类型

在 19 世纪末, 特斯拉、波波夫、马可尼等人开始利用电磁波实现无线通信。马可尼发射了人类历史上第一个无线信号(莫尔斯电码)。在他最初的实验中, 马可尼使用的电磁波波长( $\lambda$ )远远超过 1km, 到 1920 年, 他发明了波长  $\lambda \approx 100\text{m}$  的短波通信。

第二次世界大战促进了无线通信系统的进步和发展,特别是在雷达(无线电探测和测距)、无线数据传输和遥感领域。自那时以来,无线通信一直在不断进步,极大地影响着人们生活中的方方面面。20世纪40年代,随着商业电视的出现,人们引进了第一套电视标准,这是通信系统和服务发展中的重要一步,即通信技术标准化。当时,移动通信的发展相当缓慢,直到20世纪70年代,人们才开发出可靠的小型化射频电路和模块。

今天,无线通信系统已经非常普遍了,并且为人们提供了各种各样的高可靠性服务。各种系统和服务的开发,为诸如卫星通信、无线电和电视广播系统、移动电话、无线局域网、无线传感器网络等无线通信系统的实现铺平了道路。

无线通信系统的快速发展意味着对频谱的需求迅速增加,对于现有通信服务的进一步扩展以及新服务的开发,频谱分配已经成为一个关键问题。通信系统设计的挑战是有效利用所分配频谱资源,就是基于给定的功率预算和可用带宽,在一定的误码率(Bit Error Rate, BER)和数据速率(比特/秒, b/s, bps)下提供高质量的通信。在无线通信过程中,由于无线信道特别容易受到环境快速动态变化的影响,使得这种系统设计更具挑战性。

没有一种技术可以为所有的无线应用提供最佳解决方案。无线通信系统/网络基于其覆盖范围通常可以分为三大类:无线个人局域网(WPAN)、无线局域网(WLAN)和无线广域网(WWAN)。每个类别旨在满足特定需求。其覆盖范围决定系统的延迟。

以蓝牙为代表的无线个人局域网可以在几厘米至几米的短距离内实现无线通信。在这些系统中,通信方式主要是点对点通信。单点对多点的通信也是可能的,例如微微网(由两个或两个以上的可使用蓝牙功能的设备生成的网络)。无线个人局域网的数据速率较低,大约为几百 kbps。

无线局域网是一个覆盖距离可达数百米的中等距离无线网络,例如 Wi-Fi 和 DECT(数字增强无绳电信),数据速率可高达 20Mbps。

无线广域网可提供延伸到几千千米远的高速远程连接。例如移动电话、卫星通信和全球微波互联接入(WiMAX)。除覆盖范围外,无线网络 WLAN 和 WWAN 在数据传输方案、数据速率的限制和频谱规范方面都有所区别。

小型网络和大型网络的一个重要区别是网络的所有权。小网络由用户拥有和操作,大网络由服务提供商拥有和运营,而提供商不一定是网络的主要用户。

IEEE 802 系列标准定义了网络(包括有线和无线网络)的物理层(PHY)和数据链路层的特征。在其他 IEEE 802 系列标准中,最广泛应用于有线局域网的标准是 IEEE 802.3(称为以太网)和 IEEE 802.5(令牌环网)。应用广泛的无线网络标准是 IEEE 802.15(无线个人区域网)、IEEE 802.11(无线局域网)和 IEEE 802.16(全球微波互联接入)。

关于这些系统的详细描述将在下面的章节中给出。

## 1.2.2 无线网络架构

### 1.2.2.1 无线个人局域网

无线个人局域网是一种低成本、高效的小型无线网络,它能够为小范围内的一些私有设备之间以及这些设备和外部世界之间提供连接。WPAN 可覆盖周围数十米范围内的个人空间,作为对诸如 WLAN 和蜂窝网络等长距离网络通信能力的补充。WPAN 不再需要固