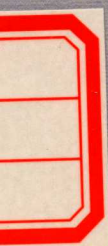


基于LTE的MIMO-OFDMA

技术研究

李敏君 徐晓雨 张雾琳◎著



清华大学出版社

基于 LTE 的 MIMO-OFDMA 技术研究

李敏君 徐晓雨 张雾琳 著

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本著作全面讲述了基于 LTE 的 MIMO-OFDMA 系统。全书共分为 10 章, 包括 LTE 标准的发展及关键技术、MIMO-OFDMA 系统的基本原理、基于 LTE 的物理层研究、MIMO 空间复用检测算法研究、算法性能仿真与分析、AAS 技术与 MIMO 技术的对比研究、波束成形算法研究、无线信道模型研究、无线通信系统中的电路特性研究、无线通信系统反馈控制研究等内容。

本著作内容丰富、结构合理、思路清晰、语言简练流畅、示例翔实。本著作可作为信息与通信工程专业无线通信研究领域的专业参考资料, 也可供信息与通信系统、信号与信息系统专业研究生科研研究使用。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签, 无标签者不得销售。

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

基于 LTE 的 MIMO-OFDMA 技术研究 / 李敏君, 徐晓雨, 张雾琳 著. —北京: 清华大学出版社, 2017

ISBN 978-7-302-46386-3

I. ①基… II. ①李… ②徐… ③张… III. ①移动通信—通信系统—研究 IV. ①TN929.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 021746 号

责任编辑: 胡辰浩 袁建华

装帧设计: 孔祥峰

责任校对: 曹 阳

责任印制: 沈 露

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

质 量 反 馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62794504

印 装 者: 北京密云胶印厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 185mm×260mm

印 张: 13.75

字 数: 251 千字

版 次: 2017 年 2 月第 1 版

印 次: 2017 年 2 月第 1 次印刷

印 数: 1~800

定 价: 45.00 元

产品编号: 073233-01

前 言

无线通信系统尤其是移动宽带无线接入系统正面临着许多问题。其中突出的问题包括：巨大的通信需求量与十分有限的频谱资源之间的矛盾、多径衰落、远近效应、共道干扰、越区切换、移动台由于电池容量原因带来的功率受限等。这就迫切需要一种能够提高系统容量和通信质量的新技术，这就是 MIMO 技术得以提出和发展的客观环境。从信息论的角度已经证明，MIMO 技术可以大大增加无线通信系统的容量，并改善无线系统的性能，非常适合 4G 移动通信系统中高速率业务的要求。鉴于 MIMO 技术的特点和优势，很有必要对应用于 OFDMA 系统中的 MIMO 进行深入研究，这不仅具有潜在的理论价值，而且还具有重要的现实意义。本著作将主要研究基于 LTE 标准的 MIMO 关键技术，在完成多天线仿真系统的设计与构建的基础上，重点研究上行链路中 MIMO 解空间复用的算法问题及空间信道模型的特性。

本著作从 LTE 标准的发展及关键技术出发，由浅入深地详细论述了 MIMO-OFDMA 系统的基本原理、基于 LTE 的物理层研究 MIMO 空间复用检测算法研究、算法性能仿真与分析、AAS 技术与 MIMO 技术的对比研究、波束成形算法研究、无线信道模型研究、无线通信系统中的电路特性研究、无线通信系统反馈控制研究等内容。在论述 MIMO-OFDMA 的关键技术时运用了丰富的实例。

本著作内容丰富、结构合理、思路清晰、语言简练流畅、示例翔实。在每一章的正文中，结合所讲述的关键技术，穿插了大量极富实用价值的示例图和电路图，从而增强读者对基本理论的理解，提高其实际应用能力。本著作主要面向信息与通信工程专业无线通信研究领域，可作为专业的参考资料，也可供信息与通信系统、信号与信息系统专业研究生科研使用。

本著作的第 3 章、第 4 章、第 9 章、第 10 章由牡丹江师范学院物理与电子工程学院李敏君编写；第 6 章、第 7 章、第 8 章由牡丹江师范学院物理与电子工程学院徐晓雨编写；第 1 章、第 2 章、第 5 章由牡丹江师范学院物理与电子工程学院张雾琳编写。由于作者水平有限，本书难免有不足之处，欢迎广大读者批评指正。

作 者

2016 年 10 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 LTE 标准的发展及关键技术	1
1.2 无线通信发展概述	3
1.2.1 无线电通信发展历史	3
1.2.2 电子技术发展的三个里程碑	6
1.2.3 无线电信号的传输原理	6
1.2.4 数字通信系统	13
1.2.5 现代通信系统和软件无线电	15
1.3 国内外研究现状	17
1.4 本书研究的意义	19
第 2 章 MIMO-OFDMA 基本原理研究	21
2.1 基本的 MIMO 系统	21
2.1.1 香农信道容量公式	22
2.1.2 MIMO 信道容量的推导	24
2.2 OFDM 原理及其多址技术	27
2.2.1 OFDM 模型	28
2.2.2 OFDMA 技术	30
2.2.3 OFDM 技术的优缺点	31
2.3 MIMO-OFDMA 系统和信号模型	32
第 3 章 基于 LTE 的物理层研究	35
3.1 OFDMA 信号发射流程	35
3.1.1 数据分块	35
3.1.2 加扰	35
3.1.3 卷积编码和删余	36
3.1.4 交织	36
3.1.5 数据映射	37
3.1.6 插入导频和子载波分配	38
3.1.7 调制数据加扰	39

3.1.8	IFFT 和加入循环前缀	39
3.2	OFDMA 物理层帧结构	39
3.3	上行链路中的 MIMO 技术	41
第 4 章	MIMO 空间复用检测算法研究	43
4.1	空间复用原理概述	43
4.2	MIMO 系统的数学模型	44
4.3	MIMO 系统空时分层结构	45
4.3.1	垂直分层结构模型	46
4.3.2	V-BLAST 模型空间检测算法	47
4.4	不同准则下的空间复用检测算法	48
4.4.1	迫零算法	49
4.4.2	最小均方误差算法	49
4.4.3	最大似然解码算法	50
第 5 章	算法性能仿真与分析	51
5.1	SCME 信道模型	51
5.1.1	SCME 信道模型的发展	51
5.1.2	SCME 信道城市微环境	52
5.2	空间复用检测算法性能仿真	53
5.2.1	仿真系统模块流程	53
5.2.2	仿真参数	54
5.2.3	两根接收天线	54
5.2.4	4 根接收天线	57
5.2.5	2 天线和 4 天线性能对比	59
5.3	仿真结果分析	62
第 6 章	AAS 技术与 MIMO 技术的对比研究	65
6.1	MIMO 和 AAS 的比较	65
6.2	LTE 协议对 AAS 的规定	65
6.2.1	下行帧结构	66
6.2.2	上行帧结构	68
6.3	AAS Diversity-Scan Map 网络接入步骤	69
6.4	AAS Preamble	71

6.4.1	下行前导字	71
6.4.2	上行前导字	71
6.5	DOA 估计仿真结果	72
6.5.1	天线阵列模型	72
6.5.2	波达方向(DOA)对波束成形的意义	72
6.5.3	算法依据	73
6.5.4	仿真结论	74
6.6	AAS 信道校正	74
6.6.1	原理依据	74
6.6.2	信道校正的分类	74
6.6.3	校正指标	75
6.6.4	线阵信道校正算法	75
6.7	AAS 下行波束成形中权值列表和 Midamble 信道估计	76
6.8	AAS 用 Midamble 做信道估计	76
6.8.1	基本原理	76
6.8.2	Midamble 序列的生成	77
6.8.3	用 Midamble 序列做信道估计	77
6.9	下行控制信道全向覆盖研究	78
6.9.1	下行控制信道	78
6.9.2	仿真方法及结果	79
6.10	DLFP 实现全向覆盖的方法	80
6.10.1	目前方法	80
6.10.2	全向覆盖的新方法	81
6.11	AAS 下行平台中的生成 DLFP 及解 DLFP 的设计说明	83
6.11.1	原理依据	83
6.11.2	生成 DLFP 的过程	83
6.11.3	解 DLFP 的过程	83
6.11.4	仿真结论	84
6.12	AAS 仿真系统下行 Preamble 搜索模块仿真	84
第 7 章	波束成形算法研究	85
7.1	概述	85
7.2	智能天线系统原理	86

7.2.1	智能天线基本概念	86
7.2.2	智能天线的分类	89
7.3	阵列天线的数学模型和自相关矩阵	89
7.3.1	阵列天线的数学表达	89
7.3.2	阵列接收信号向量	90
7.4	阵列天线波束成形准则和自适应算法	92
7.4.1	最小均方误差(MMSE)准则	93
7.4.2	最大信噪比(Max SNR)准则	94
7.4.3	最大似然(ML)准则	95
7.4.4	自适应算法	97
7.5	DOA 估计算法	100
7.5.1	DOA 估计算法的原理依据	100
7.5.2	DOA 估计的传统算法	103
第 8 章	无线信道模型研究	111
8.1	无线信道研究现状	111
8.2	空间信道模型基础理论	113
8.2.1	链路级评估	113
8.2.2	系统级空间信道模型	120
8.2.3	市区宏小区和微小区环境的可选模型	128
8.2.4	信道参数间的相关性	131
8.3	MMSE 接收机介绍	139
8.4	极化信道模型	141
8.4.1	信道模型介绍	141
8.4.2	复信道冲激响应的计算	143
8.5	SCM 与 SCME 信道建模	144
8.5.1	SCM 信道模型建模	144
8.5.2	SCME 信道模型与建模过程	146
第 9 章	无线通信系统中的电路特性研究	149
9.1	非线性电路的基本概念与非线性元件	149
9.1.1	非线性电路的基本概念	149
9.1.2	非线性元器件的特性	150
9.2	非线性电路的分析方法	154

9.2.1 幂级数分析法	154
9.2.2 折线分析法	156
9.2.3 线性时变参数电路分析法	157
9.3 非线性电路的应用	159
9.4 模拟相乘器及其频率变换作用	160
9.4.1 相乘器的基本特性及实现方法	161
9.4.2 四象限双差分对模拟相乘器原理	164
9.5 二极管平衡相乘器	169
第 10 章 无线通信系统反馈控制研究	173
10.1 反馈控制系统的概念	173
10.1.1 反馈控制系统的组成、工作过程和特点	173
10.1.2 反馈控制系统的工作过程	174
10.1.3 反馈控制系统的特点	175
10.2 反馈控制系统的基本分析	175
10.2.1 反馈控制系统的传递函数及数学模型分析	175
10.2.2 反馈控制系统的基本特性的分析	178
10.3 自动增益控制(AGC)电路	181
10.3.1 AGC 电路的组成、工作原理及性能分析	182
10.3.2 放大器的增益控制——可控增益电路	184
10.4 自动频率控制(AFC)电路	189
10.4.1 概述	189
10.4.2 AFC 电路基本特性的分析	191
10.4.3 AFC 电路的应用举例	193
10.5 自动相位控制(APC)电路(锁相环路 PLL)	196
10.5.1 锁相环电路的基本工作原理	196
10.5.2 锁相环路的跟踪性能: 锁相环路的线性分析	204
参考文献	207

第1章 绪 论

随着无线通信的发展及用户需求的变化,固定宽带接入服务和移动宽带接入服务在技术和业务上呈现融合的趋势,宽带移动化和移动宽带化逐渐成为这两个领域技术发展的趋势。而宽带无线接入技术通常是指在城域网覆盖范围内的接入技术。因此,近几年来出现的支持固定和一定移动性的城域宽带无线接入技术是目前业界最为关注的,其中,LTE(Long Term Evolution)技术标准就是典型的代表。LTE 制定了物理层和媒体接入层的规范,是针对微波波段提出的空中接口标准。

目前业界最为关心的是 LTE 标准,即支持固定和移动两种模式的无线宽带接入。可以在移动的环境下提供高速的数据、语音和视频等业务,具有广阔的应用前景。它以 OFDMA(正交频分多址接入)技术作为支持移动性的技术基础,并且通过物理层和 MAC 层相应的规定,提供了多种可选的增强型技术以获得更好的系统性能。其中一项重要技术即为本文要着重研究的 MIMO 技术,MIMO 技术是近几年无线通信领域出现的革命性的新技术,理论上可以在不消耗额外空口资源(时间、频率)的基础上成倍地提高系统容量和频谱效率。因此其在无线通信中具有越来越广泛的应用。在这一背景下,研究 LTE 系统的实现以及 MIMO 技术在其中的应用就具有非常重要的理论意义和现实价值。

1.1 LTE 标准的发展及关键技术

移动通信技术已经经历了几次更新换代。由最初的第一代模拟通信系统,到第二代数字通信系统,发展到目前正在商用化的第三代宽带数字移动通信系统。更大系统容量、更高服务质量和支持更多数据业务成为移动通信技术的发展方向。目前,有关未来移动通信系统的研究工作也已经在全世界范围内展开。为了和 Wimax、WiFi 等新兴的无线宽带技术竞争,提高 3G 的市场竞争力,3GPP 开始了 UMTS 技术的长期演进(Long Term Evolution, LTE)技术的研究,它的目标是更高的数据速率、更低的时延、改进的系统容量和覆盖范围,以及较低的成本。

移动通信顾名思义就是能够随意地移动并且能够实现在任何时间、任何地点和任何人进行可靠通信。1897 年,一个名叫马可尼的意大利人在一条拖船上第一次实现了基站和接收端长达 18 英里的无线电通信,这标志着移动通信时代的到来。

移动通信经过 100 多年的发展经历了巨大的变化,由最初的模拟信号到现在的数字信号,由最初的频分多址(FDMA)到时分多址(TDMA)再到码分多址(CDMA),移动通信系统变得越来越成熟。20 世纪 70 年代末 80 年代初,模拟移动电话开始投入市场商用,第一代移动通信系统随之诞生。第一代移动通信系统由于传输带宽和长途漫游功能等的影响,实质上是一种区域性的模拟系统。第一代移动通信系统主要采用频分多址(FDMA)技术,这一时期比较成熟的通信系统有北美的高级移动电话服务系统(AMPS)、欧洲的全入网通信系统(TACS)、日本的超大容量移动通信系统(HCMTS)以及北欧移动电话(NMT)等。我国在 20 世纪 80 年代引入了欧洲的 TACS 系统,开启了中国的通信时代。20 世纪 90 年代开始,第二代移动通信系统日渐成熟。与第一代移动通信系统相比,第二代移动通信系统克服了其不足之处,主要包括容量受限、不能提供数据业务、不兼容多种通信制式、保密性差、通信质量低、不能提供全球无缝覆盖和全球漫游等。第二代移动通信系统采用了多种多址方式,包括时分多址(TDMA)、频分多址(FDMA)和码分多址(CDMA),此外还采用了数字信号处理技术、单天线收发技术(SISO)、抗干扰纠错编码技术、自适应均衡和 Rake 接收技术、信道交织编码技术等,基于这些先进技术的应用使得第二代移动通信系统实现了全球无缝覆盖和漫游,以及多种通信制式的融合。随着信息技术的发展,第二代移动通信系统的弊端也渐渐暴露出来,单纯的语音通信已经无法满足移动用户对更大容量和更高服务质量的高速通信的需求,这就推动了第三代移动通信系统的出现和发展。和第二代移动通信系统相比,第三代移动通信系统能够在第二代移动通信系统的基础上更好地处理多种多媒体业务,如音乐、图像、视频流等;还能够提供多种信息服务,如网页浏览、电子商务、电话会议等。在第三代移动通信系统中,最为典型的是欧洲的宽带码分多址(WCDMA)系统,美国的 CDMA2000 以及中国的时分同步码分多址(TD-SCDMA)系统。

纵观移动通信技术的发展,未来移动通信系统的发展趋势是宽带化、智能化、基于 IPV6 核心网的互联互通、用户主导业务、数据业务占主导地位,显然现有的 3G 技术远远不能满足这些要求,因此人们把目光投向第四代移动通信系统。目前,世界发达国家及各大通信行业公司都在积极进行未来无线移动通信技术标准的研究制定,以期在全球第四代(4G)标准制定中享有发言权。4G 的各项运行标准将由国际电信联盟(ITU)电信标

准局决定。

2004 年秋, 3GPP 长期演进(LTE)工作会议召开, 会议决定将于 2004 年 12 月正式创建 LTE 研究项目, 这标志着 LTE 项目的正式启动。该项目旨在保持 3GPP 在移动通信领域的技术和标准优势, 缩小 3G 和 4G 移动通信系统中的技术差距, 希望使用 3G 系统的频谱继续保持频谱资源优势, 以及解决 3G 系统中专利集中的问题。项目前 6 个月定义了设计目标, 这 6 个月是项目的初级阶段, 该阶段内的决议在 2005 年 6 月获得了通过并被写入 3GPP 技术报告中。LTE 的具体需求包括: 提高频谱效率、提高用户数据传输速率、减少时延、频谱使用更加灵活多变、简化网络结构、降低移动终端功耗等。

在未来 10 年甚至更长时间内, LTE 作为能够支撑世界电信工业的移动通信系统对传输时延、传输速率、频谱灵活分配等方面的要求也更为严格。为了满足这些要求, LTE 采用了多载波技术、多天线技术、分组交换技术等更先进的移动无线技术, 这些技术成为 LTE 系统无线接入设计的基础。2005 年 12 月确定了 LTE 的多址接入方案: 下行基于正交频分复用多址(OFDMA)技术, 上行基于单载波频分多址(SC-FDMA)技术。这两种多址技术实现了系统在频域上的灵活分配。

正交频分复用(OFDM)是一种多载波调制技术, 作为 LTE 系统中的一个核心技术, OFDM 技术具有有效对抗频率选择性衰落和载波间干扰; 提高频谱利用率和系统容量; 降低接收机内均衡器的复杂度; 动态实现上下行链路中不同的传输速率; 易于和其他技术结合以及提高信息传输可靠性等优点。MIMO 技术是 LTE 系统中另外一种核心技术, 它利用多天线技术使得空间资源被充分挖掘, 在不增加频谱资源和天线功率的前提下可以成倍地提高系统容量, 还可以提高无线传输的可靠性降低误码率, 人们认为 MIMO 技术是移动通信领域的一个重大突破。

1.2 无线通信发展概述

1.2.1 无线电通信发展历史

随着生产力的提高, 物资资源不断丰富, 人与人之间交流变得愈加频繁, 信息的传递更显得至关重要。信息的力量改变着人们的生活, 我们已经进入了信息时代。对信息的迫切需求从古至今都未曾间断。中国古代用于战争的烽火和旗语, 以及可以用来远距

离传输的信鸽,这些原始手段可以说是通信的最初模式。烽火、旗语、信鸽虽然能传递简单的信息,但安全性较差,更不适合远距离传输。于是科学家们通过不断的探索和努力,把原始通信手段发展为有线通信。

有线通信时代的来临,归功于美国画家莫尔斯。1791年4月27日,萨缪尔·莫尔斯诞生于美国马萨诸塞州查理镇,父亲是知名的地理学家。他毕业于耶鲁大学美术系时只有19岁。1832年秋天,已任美国国立图画院院长的莫尔斯从欧洲考察和旅游回国时,在一艘从法国勒阿弗尔港驶往美国纽约的“萨利”号邮客轮上,认识了一位美国医师、化学家,电学博士的查理·托马斯·杰克逊。当时杰克逊参加了在巴黎召开的电学讨论会后回国,谈到了新发现的电磁感应,引起了莫尔斯的极大兴趣。杰克逊把绕在蹄形铁芯上的铜线圈通上电,只见桌上的铁片、铁钉都被那铁芯吸上了。不一会,断了电,那些铁钉、铁片很快就掉了下来。我们知道导体在磁场中作相对运动会产生电流,同样通电的线圈会产生磁力,这种现象就叫电磁感应。莫尔斯回到自己的房间,久久不能平静,感到电磁感应把他引入了一个广阔的天地。他利用在船上休闲的时间兴致勃勃地阅读了杰克逊借给他的有关论文和电学书本,画家的丰富想象力使他萌发了一个遐想:铜线通电后产生磁力;断电后,失去磁力。要是利用电流的断续,作出不同的动作,录成不同的符号,通过电流传到远方,不是可以创造出一种天方夜谭式的通信工具了吗?他越想想越入迷,觉得这个极妙的理想正是人类梦寐以求的愿望,一定要实现它。他毅然下决心去完成“用电通信”的发明。他苦干了4年,制造出了首台电报样机。1837年9月4日,莫尔斯发明的电报机信号只能传送500米。但他毫不气馁,继续研究。最后终于创造出了一种起接力作用的继电器,解决了远距离信号减弱的问题。莫尔斯请来朋友维耳当助手,费尽心血,创作出用点(·)和划(-)符号的不同排列来表示英文字母、数字和标点,成为电信史上最早的编码,后被称为“莫尔斯符号”。他与维耳还研制出电报音响器,可以在收电报的同时,通过电码声音直接译出电文,大大缩短了收报译文的时间。1872年4月2日莫尔斯逝世后,纽约市人民特地在中央公园为他建造了一座雕像,永远纪念他为人类作出的巨大贡献。

虽然莫尔斯电报开辟了通信的新纪元,但不能传输模拟及数字信号,传输速度较慢,传输信息量较小。对于大量信息传输的迫切需求,英国科学家贝尔发明了电话。他1847年生于英国,年轻时跟父亲从事聋哑人的教学工作,曾想制造一种让聋哑人用眼睛看到声音的机器。1873年,成为美国波士顿大学教授的贝尔,开始研究在同一线路上传送许多电报的装置——多工电报,并萌发了利用电流把人的说话声传向远方的念头,使远隔

千山万水的人能实现如同面对面的交谈。于是，贝尔开始了电话的研究。1875年，贝尔和他的助手华生分别在两个房间里试验多工电报机，一个偶然发生的事故启发了贝尔。华生房间里的电报机上有一个弹簧粘到磁铁上了，华生拉开弹簧时，弹簧发生了振动。与此同时，贝尔惊奇地发现自己房间里电报机上的弹簧颤动起来，还发出了声音，是电流把振动从一个房间传到另一个房间。贝尔的思路顿时大开，他由此想到：如果人对着一块铁片说话，声音将引起铁片振动；若在铁片后面放上一块电磁铁的话，铁片的振动势必在电磁铁线圈中产生时大时小的电流。这个波动电流沿电线传向远处，远处的类似装置上不就会发生同样的振动，发出同样的声音吗？这样声音就沿电线传到远方去了。这就是梦寐以求的电话。贝尔和华生按新的设想制成了电话机。在一次实验中，一滴硫酸溅到贝尔的腿上，疼得他直叫喊：“华生先生，我需要你，请到我这里来！”这句话由电话机经电线传到华生的耳朵里，电话成功了！1876年3月7日，贝尔成为电话发明的专利人。

电话虽然能传递语音信号，但是传输媒介是导线，受到导线的限制不能做到随时随地的通信。能不能不用导线，在空间中传递信号呢？一个个伟大的科学家前赴后继给予了肯定的回答。1864年英国物理学家麦克斯韦发表了“电磁场的动力理论”这一著名论文，在理论上证明了电磁波的存在，为后来的无线电发明和发展奠定了坚实的理论基础。1887年德国物理学家赫兹以卓越的实验技巧证实了电磁波是客观存在。依照麦克斯韦理论，电扰动能辐射电磁波。赫兹根据电容器经由电火花隙会产生振荡原理，设计了一套电磁波发生器，赫兹将一感应线圈的两端接于产生器二铜棒上。当感应线圈的电流突然中断时，其感应高电压使电火花隙之间产生火花。瞬间后，电荷便经由电火花隙在锌板间振荡，频率高达数百万周。由麦克斯韦理论，此火花应产生电磁波，于是赫兹设计了一简单的检波器来探测此电磁波。他将一小段导线弯成圆形，线的两端点间留有小电火花隙。因电磁波应在此小线圈上产生感应电压，而使电火花隙产生火花。所以他坐在一暗室内，检波器距振荡器10米远，结果他发现检波器的电火花隙间确有小火花产生。赫兹在暗室远端的墙壁上覆有可反射电波的锌板，入射波与反射波重叠应产生驻波，他也以检波器在距振荡器不同距离处侦测加以证实。赫兹先求出振荡器的频率，又以检波器量得驻波的波长，二者乘积即电磁波的传播速度。正如麦克斯韦预测的一样。电磁波传播的速度等于光速。赫兹的实验成功了，而麦克斯韦理论也因此获得了无上的光彩。赫兹在实验时曾指出，电磁波可以被反射、折射和如同可见光、热波一样被偏振。由他的振荡器所发出的电磁波是平面偏振波，其电场平行于振荡器的导线，而磁场垂直于电场，

且两者均垂直传播方向。1889 年在一次著名的演说中,赫兹明确地指出,光是一种电磁现象。第一次以电磁波传递信息是 1896 年意大利的马可尼开始的。1901 年,马可尼又成功地将信号送到大西洋彼岸的美国。从此无线通信进入了实用阶段。

1.2.2 电子技术发展的三个里程碑

此时的无线通信设备是:发送设备用火花发射机、电弧发生器等;接收设备用粉末(金属屑)检波器。直到 1904 年弗莱明发明电子二极管之后,开始进入了无线电子学时代。1909 年弗雷斯特发明了电子三极管是电子技术发展史上的第一个重要里程碑;1949 年肖克莱发明了晶体三极管成为电子技术发展史上的第二个里程碑;20 世纪 60 年代开始出现将“管”、“路”结合起来的集成电路,中、大规模乃至超大规模集成电路的出现,对人类进入信息社会起了不可估量的作用。这就是电子技术发展史上的第三个重要里程碑。

不管是原始通信手段还是有线通信以及无线通信,传递信息才是首要的任务。通信基本电路所要研究的就是信息的传输和处理的基本电路、基本原理和基本分析方法。

1.2.3 无线电信号的传输原理

1. 传输信号的基本方法

信息传输对人类生活的重要性是不言而喻的。最基本的信息传输手段当然是语言与文字。语言与文字的产生和发展,对人类社会的发展起了很大的作用。没有语言,人类就无法进行思维。文字不但能够传输信息,而且能够储存信息。随着人类社会生产力的发展,迫切地要求在远距离迅速而准确地传送信息。我国古代利用烽火传送边疆警报,这可以说是最古老的光通信。以后又出现了“旗语”,就是用编码的方法来传输信息。此外,诸如信鸽、驿站快马接力等,也都是人们曾采用过的传输信息的方法。

进入 19 世纪以后,人们发现电能够以光速沿导线传播。这为远距离快速通信提供了物质条件。前面提到,莫尔斯发明电报时,创造了莫尔斯电码。在这种代码系统中,用点、划、空的适当组合来代表字母和数字。这可以说是“数字通信”的雏形。有线电报是人类利用电能传送信号的最初形式,曾经是极重要的通信手段,虽然原理与构造方面已大为改进,但近年来由于其他通信手段的飞速进步,电报的作用已日趋式微,面临被淘汰的命运。出现了有线电报之后,人们自然会想到,能否利用电能来传送声音信号

呢？要做到这一点，首先就要使声能转变为电能的形式，然后才便于传送出去。将声能转变为电能的换能器叫作“传声器”或“话筒”，通常也叫“麦克风”。有线电报与有线电话发明之后不久，又发明了无线电。在赫兹以前，人们认为电能只能够沿导线传输。经过前述麦克斯韦的理论推导和赫兹的实验证明，才知道电能也可以在空间以电磁波的形式传输。

于是人们自然想到如何实现不用导线来传输信号的问题，从而促成无线电的发明。一个导体如果载有高频电流，就有电磁能向空间辐射。电磁能是以波的形式向外传播的，称为电磁波。高频率的电流称为载波电流，简称载波。这种频率称为载波频率或射频。载有载波电流，使电磁能以电磁波形式向空间发射的导体，称为发射天线。如果我们设法用电报或电话信号控制载波电流，则电磁能中就含有所要发送的电报或电话信息，这就是无线电信号的发送过程。在接收端，首先由接收天线将收到的电磁波还原为与发送端相似的高频电流。然后经过检波，取出原来的电报或电话信号。这就完成了无线电通信。

2. 通信系统简介

信息的获取、传输、变换、存贮、识别、处理、显示，都要依赖于电子学与信息系统来实现。传输信息的系统，统称为通信系统。一个完整的通信系统应由输入变换器、发送设备、传输信道、接收设备和输出变换器五个基本部分组成。

图 1-1 所示是通信系统的组成方框图。其中，输入变换器的功能是将输入信息变换为电信号。当输入信息为非电信号(例如，声音、文字、图像等)时，输入变换器是必要的。当输入信息本身就是电信号(例如，计算机输出的二进制信号、传感器输出的电流或电压信号等)时，在能满足发送设备要求的条件下，可不用输入变换器，而直接将电信号送给发送设备。输入变换器输出的电信号应反映原输入的全部信息，通常称此信号为基带信号。传输信道是信号传输的通道，它可以是平行线、同轴电缆或光缆，也可以是传输无线电波的自由空间或传送声波的水等。输出变换器的功能是将接收设备输出的电信号变换成原来的信息，如声音、文字、图像等。

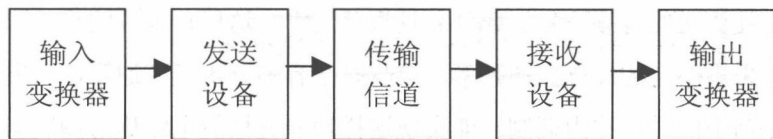


图 1-1 通信系统组成方框图

输入变换器通常也叫信号源,信号源是指需要传送的原始信息,如语言、音乐、图像、文字等,一般是非电物理量。原始信息经输入变换器转换成电信号后,送入发送设备。在实际的通信电子线路中传输的是各种电信号,为此,就需要将各种形式的信息转变成电信号。常见的信号源有:话筒、摄像机、各种传感器件。发送设备的作用:将基带信号变换成适合信道传输特性的信号。对基带信号进行变换的原因:由于要传输的信息种类多样,其对应的基带信号特性各异,这些基带信号往往并不适合信道的直接传输。接收设备的作用:接收传送过来的信号,并进行处理,以恢复发送端的基带信号。接收设备的要求:由于信号在传输和恢复的过程中存在着干扰和失真,接收设备要尽量减少这种失真。输出变换器收信装置是指把接收设备输出的电信号变换成原来形式的信号的装置。例如:还原声音的喇叭、恢复图像的显像管。

3. 无线信号的产生与发射

无线电发送是以自由空间为传输信道,把需要传送的信息(声音、文字或图像)变换成无线电波传送到远方的接收点。为什么要用无线电波发送方式把信息(例如声音)传出去呢?信息传输通常应满足两个基本要求,一是希望传送距离远,二是要能实现多路传输,且各路信号传输时,应互不干扰。依靠声音在空气中直接进行远距离传送,显然是不行的。其原因是声波在空气中传播的速度很慢(约 340m/s),而且衰减很快,不能实现远距离传送。此外,人耳能听到的声音的频率约在 20Hz 到 20kHz 的范围内,若将声音直接传送,多路声音就会混在一起,接收时就难于分辨,不能实现选择功能。为了把声音传送到远方,常用的方法是将声音变成电信号,再通过发送设备送出去。电信号是与声音同频率的交变电磁振荡信号,可以利用天线向空中辐射出去。电磁波在空气中的传播速度很快($3\times 10^8\text{m/s}$)。在天线高度足够的条件下是能够实现远距离传送的。但是,无线电波通过天线辐射,天线的长度必须和电磁振荡的波长相近,才能有效地把电磁振荡波辐射出去。对于频率为 20Hz 到 20kHz 的声频来说,其波长是 $15\times 10^6\sim 15\times 10^3\text{m}$ 。那么,这样大尺寸的天线,制造是很困难的。即便可以做出来,由于各个电台所发出的信号频率范围相同,接收者也无法选择所需的接收信号。解决的办法是,将发射的电磁波的频率提高,使传送的音频信号加载到高频振荡之中。这样,天线的尺寸可以减小。不同的电台可以采用不同的高频振荡频率,接收时很容易分辨开。通常,只需传送的信息加载到高频振荡中的过程称为调制。能实现这样功能变换的电路称为调制器。调制可以分为三类,即调幅、调频和调相。图 1-2 所示是调幅广播发射机的方框图,它由三部分