



国际信息工程先进技术译丛



WILEY
www.wiley.com

应用电磁学 与电磁兼容

**Applied
Electromagnetics
and Electromagnetic
Compatibility**

(美) Dipak L. Sengupta
Valdis V. Liepa
沈远茂 刘素玲
石丹 阮方鸣

著
译



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS



国际信息工程先进技术译丛

应用电磁学与电磁兼容

(美) Dipak L. Sengupta 著
Valdis V. Liepa 译
沈远茂 刘素玲
石 丹 阮方鸣



机械工业出版社

本书紧紧围绕电磁兼容的核心问题,对相关的电磁理论和专题进行了全面系统的介绍和讨论,具有很强的参考价值。全书共分13章,主要包括电磁环境、电磁场和电磁波基础、信号的波形与频谱分析、传输线、天线与辐射、电路元件的特性、辐射发射和敏感度、电磁屏蔽、元件之间的耦合、静电放电、EMC标准和电磁发射的测量。另外,书中附录还就矢量和矢量分析、典型频段的分配和媒质的本构关系进行了介绍。

本书可以作为高等院校电气、电子、电工和通信类专业本科生和研究生的电磁兼容课程的教材,也可供相关企业和研究机构的EMC设计测试人员、相关检测和管理部门的EMC技术人员参考。

Applied Electromagnetics and Electromagnetic Compatibility/by Dipak L. Sengupta, Valdis V. Liepa. ISBN: 978-0-471-16549-1

All Rights Reserved. This translation published under license.

本书原版由Wiley公司出版,并经授权翻译出版,版权所有,侵权必究。本书中文简体翻译出版授权机械工业出版社独家出版,并限定在中国大陆地区销售,未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。本书封面贴有Wiley公司的防伪标签,无标签者不得销售。本书版权登记号:图字01-2007-2277

图书在版编目(CIP)数据

应用电磁学与电磁兼容/(美)迪派克(Dipak, L. S.), 维迪斯(Valdis, V. L.)著;沈远茂等译. —北京:机械工业出版社,2009.6

(国际信息工程先进技术译丛)

ISBN 978-7-111-26757-7

I. 应… II. ①迪…②维…③沈… III. ①电磁学②电磁兼容性
IV. 0441 TN03

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第049877号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:张俊红 责任编辑:朱林 版式设计:霍永明

责任校对:张晓蓉 封面设计:马精明 责任印制:李妍

北京振兴源印务有限公司印刷厂印刷

2009年7月第1版第1次印刷

169mm×239mm·23印张·445千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-26757-7

定价:70.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379764

封面无防伪标均为盗版

译者序

随着国内外电磁兼容 (EMC) 规范的日益普及和电气电子工业的不断发展, 各种电磁兼容问题层出不穷, 小到集成电路大到航天器无不体现出电磁兼容设计的重要性。就在相关部门对 EMC 设计和测试投入极大关注的同时, 它们对具有坚实基础的专业 EMC 技术人才的需求也越来越大。在这种大背景下, 各种各样的 EMC 技术培训班、EMC 工程师认证考试等应运而生, 各高等院校中也涌现出了很多 EMC 的相关课程。但作为一门相对综合的应用技术, EMC 的发展相对较晚, 涉及的学科种类也较多, 因此它对初学者提出了较高的要求, 即必须了解电磁场与电磁波、微波技术、信号与系统、电路、传输线、天线与电波传播等若干学科的一些基础知识。本书的第一作者 Dipak L. Sengupta 博士从 1994 年就开始从事 EMC 的科研和教学工作, 对初学者在学习过程中所遇到的困难非常了解, 因此他以 EMC 为背景编写了这本广受欢迎的教材, 其中涵盖了电磁场与电磁波领域的基础知识, 也涉及应用电磁学和 EMC 领域若干专题, 书中的内容对大家分析某些 EMC 现象、设计具体的 EMC 方案、从事具体的 EMC 测试以满足相应的 EMC 标准都是非常有帮助的。

全书共分 13 章。其中, 沈远茂 (北京邮电大学) 负责第 1、2、3、8、12 和 13 章以及附录的翻译, 第 4、5、6、7 章由刘素玲 (河北大学) 负责翻译。第 9 章由石丹 (北京邮电大学) 负责翻译, 第 10、11 章由阮方鸣 (贵州师范大学) 负责翻译。全书最后由沈远茂进行统稿、审校, 高攸纲教授对其中部分章节进行了审校并提出了宝贵的修改意见。需要指出的是, 本书的内容是译者在尽量忠实于原书的基础上翻译的, 书中所述仅代表作者个人的观点和见解, 并不代表译者及其所在单位的观点, 这点请广大读者注意。

在本书的翻译过程中, 得到了北京邮电大学各位领导和老师的支持和帮助, 在此表示感谢。此外, 参加本节部分翻译和资料整理工作的人员还包括: 张苏慧、石淑菊、赵忠林、杨伟方、高峙岫、孙思扬、刘鹤勇、白晶、李明月、杨慧春、康宁、刁寅亮、韩雪梅、丁美群、王静, 在此一并表示感谢。

由于译者水平有限, 加之时间仓促, 书中难免有疏漏和错误之处, 敬请广大读者和同行专家批评指正。

译者于北京
2009 年 5 月

前 言

电子设备只有其发射的电磁噪声通过测试并满足一定的限值时才能被允许进入美国和其他的一些工业化国家的市场。因此，在过去的二十多年里，电磁兼容 (ElectroMagnetic Compatibility, EMC) 问题的处理在世界范围内的数字电子设备及元器件设计领域中变得越来越重要。电子行业也越来越重视那些具有 EMC 背景的电子工程 (EE) 专业的毕业生。目前，虽然美国大多数大学的 EE 专业本科课程大纲中都要求包含至少 3 或 4 个学分的电磁学课程，但这些课程并没有直接涉及 EMC 的问题。

电磁场与电磁波专业的学生可能具备了研究基本 EMC 问题的能力。而且，一些在电磁学领域实力较强的知名院校也通常认为：学生在电磁场与电磁波方面接受良好的教育和培养就足以使得他们做好充分的准备以迎接其职业生涯中遇到的 EMC 问题的挑战了。尽管如此，为了适应工业领域不断增长的需求，IEEE 仍积极鼓励学校将 EMC 作为一门课程纳入其学习计划。

1994 年夏，本书的第一作者 (DLS) 在 Detroit Mercy 大学的物理与电气工程学院引入了一门适用于高年级本科生和研究生的 EMC 课程。当时，大多数学习这门课的都是来自于底特律附近三大汽车制造商和其他相关工业领域的工程师。而学习这门课的 EE 专业的学生虽然具备了不同程度的电磁学方面的背景，但是他们对麦克斯韦方程和平面电磁波的熟悉程度还达不到我们的要求。因此，我们在课程规划时就遇到了困难。不仅如此，当时可供选择的 EMC 方面的教科书也非常有限。虽然当时选择了 C. R. Paul 的《*Introduction to Electromagnetic Compatibility*》，并辅以 H. R. Ott 的《*Noise Reduction Techniques in electronic systems*》，但我们随后发现这两本教材并不能完全满足学生的需要。因此，非常有必要编写具有针对性的讲稿。讲稿前一部分的目的在于提高学生电磁学方面的知识背景，使其对麦克斯韦方程组的熟悉程度相对一致。随后，讲稿会对平面波及其相关的主题、传输线、天线和辐射进行介绍。总之，我们认为上述内容涵盖了 EMC 课程所必需的背景知识。而讲稿的其他部分所针对的都是 EMC 的一些特定的专题。这门课程非常受欢迎，因此第二年 (1995 年) 得以继续讲授；不仅如此，因为持续不断的需求，所以学校每隔一年都会开设这门课程。

上述的这些经历也在促使我们编写一本涵盖电磁场与电磁波的基础知识，并涉及应用电磁学和 EMC 领域中若干专题的教材。书中对电磁学内容的描述都是在 EMC 的背景下进行的，而这对分析一些 EMC 现象、对设计测试方案以符合

EMC 标准都是很有帮助的。多年以来,本书第一作者在 Michigan 大学、Ann Arbor 和 Detroit Mercy 大学的电气工程学院为本科生和研究生讲授电磁场理论和应用电磁学,而这本书就源自于这些教学讲稿。

本书大纲的简要介绍如下。

第 1 章概括介绍了电磁干扰,描述了数字电子时代的 EMC 的发展。另外,它还定义了用于描述电磁干扰现象的各种缩写,这些缩写被交替使用,经常出错。第 2 章对噪声源进行了介绍,电子设备运行所处的电磁环境中包含了多种自然和人为的噪声源,第 3 章介绍了电磁场与电磁波的一些基本概念和它们之间的相互联系,其中包括对基本电磁规律及其麦克斯韦数学表达式的描述和归纳,包括对边界条件、坡印廷定理和能量转换的讨论,包括对时谐麦克斯韦方程组及其在一般问题中的应用的介绍,还包括对处于无损耗和有损耗媒质中的均匀平面波,集肤效应现象以及平面波的反射和折射现象的讨论。第 4 章对已知的电磁场源的频谱进行了必要的描述。从 EMC 的角度来看,它们的电磁发射特性都是频率的函数。第 5 章主要介绍了 TEM 传输线的基本特性和应用,尤其是双线、同轴线、微带线、带状线和平行导体板传输线。此外,它还简要介绍了双线的时变或者瞬态解。第 6 章介绍了天线和辐射的基本原理,包括接收和发射天线的等效电路。另外,第 6 章还详细介绍了基本天线的辐射发射,例如电偶极子和磁偶极子,这些辐射发射随后就被用来对辐射的一般特性进行分析。除此之外,第 6 章还介绍了半波偶极子天线和双锥天线。

第 7 章介绍了集总电路参数 R 、 L 和 C 的特性,其中包括这些参数在电磁场中的定义和它们的性能随频率的变化情况。第 8 章分析了某些电子设备中的器件的辐射发射和它们对外界噪声的敏感度。另外,在对电磁发射和外部平面波入射情况下的器件的电磁敏感度进行估计时还用到了简单的导线和传输线模型。第 9 章介绍了电磁屏蔽的基本原理。第 10 章介绍了特定结构电路中的感性、容性耦合。第 11 章对静电放电 (Electro Static Discharge, ESD) 现象进行了介绍,并从 EMC 的角度讨论了它对电子系统设计的影响。第 12 章介绍了一些 FCC 制定的典型的 EMC 标准,它们既有适用于 A 级电子设备的,也有适用于 B 级电子设备的。此外,介绍中也会涉及一些欧洲标准。第 13 章对测试过程进行了简单的描述。这些测试过程在测试一个设备以了解其是否能够满足强制标准所规定的发射限值时必须被遵循。附录 A 给出了一个相当完整的关于矢量和矢量微积分的描述,这是任何一门电磁学课程都必需的基础知识。另外,在一些章节的末尾还给出了习题和大部分习题的答案。

本书是被作为应用电磁学和电磁兼容课程的教材来编写的,它适用于 EE 专业的高年级本科生和研究生使用。本课程要求预先修完大学本科 EE 和物理方面的基础课程,具体包括电磁学、模拟和数字电子电路以及高等微积分等。

与电磁场和电磁波相关内容一样，本书对 EMC 相关专题的阐述也遵循着一种先易后难的方法，因此与之相关的电磁干扰问题也就能够更好地被理解。根据各班级对电磁场相关知识的掌握情况，教师可以自己判断、调整课程内容的重点。

如果所讲授的班级在电磁学领域有足够的知识背景，教师就可以利用本书更加详细地对 EMC 的相关专题进行深入的研究，也可以由此提出一些 EMC 方面的其他专题进行学习探讨。例如，教师可以在课程计划中加入一些 EMC 设计的内容并扩展到 EMC 测试，而这些都是本书没有涉及的。本书的第 1、2 章和第 7 ~ 13 章中都有适用于这方面扩展的材料。

同时，本书还可以作为应用电磁学课程的教科书。第 3 ~ 6 章（可能也包括第 7 章）以及附录 A 都有相应的内容。教师可以选择加入更多的对这些专题的讨论，例如关于天线方面的内容。这样的一门课程甚至可以作为如前所述的 EMC 课程的前期课程。

最后，工业领域中有志于在 EMC 方面探索的工程师们会发现这本书对自学非常有帮助。而那些与电子设备的 EMC 设计有关的工程师们会发现本书所涉及的专题和内容作为设计的参考工具也非常有用。

D. L. Sengupta
V. V. Liepa
Ann Arbor, Michigan

目 录

译者序
前言

第 1 章 概述	1
1.1 介绍	1
1.2 定义	1
1.3 干扰机理	2
1.4 举例	4
1.5 讨论	5
参考文献	6
第 2 章 电磁环境	7
2.1 概述	7
2.2 自然干扰源	7
2.3 人为干扰源	7
2.4 连续波和瞬态干扰源	8
2.5 授权辐射源的特性参数	9
2.6 噪声辐射强度	10
2.7 家庭环境	11
2.8 干扰源的介绍	12
2.9 本书的主要内容	12
参考文献	13
第 3 章 电磁场与电磁波基础	14
3.1 绪论	14
3.2 基本参数	14
3.3 时域关系	15
3.3.1 电流连续性和电荷守恒	15
3.3.2 法拉第定律	16
3.3.3 安培环路定律	19

3.3.4	洛伦兹定律	20
3.3.5	麦克斯韦方程	21
3.3.6	麦克斯韦方程的历史意义	22
3.3.7	对媒质的考虑	23
3.3.8	边界条件	25
3.3.9	能流和坡印廷定理	32
3.3.10	惟一性定理	35
3.4	时谐场	35
3.4.1	简介	35
3.4.2	相量	36
3.4.3	时谐方程	37
3.4.4	复介电常数	39
3.4.5	再论边界条件	41
3.4.6	关于解的说明	43
3.4.7	复数形式的坡印廷定理	45
3.5	波动方程	48
3.5.1	与时间有关的情况	48
3.5.2	时谐情况	50
3.6	均匀平面波	51
3.6.1	概述	51
3.6.2	关于能量	54
3.6.3	群速度	55
3.6.4	总结	56
3.6.5	TEM 波的一般表示	56
3.6.6	损耗媒质中的平面波	60
3.6.7	集肤深度	63
3.6.8	平面波的极化	66
3.7	平面波的反射和折射	69
3.7.1	对交界平面的垂直入射	69
3.7.2	斜入射	73
	参考文献	83
	习题	84
第 4 章	信号的波形和频谱分析	87
4.1	简介	87
4.2	信号分类	87
4.3	能量信号	88

4.3.1 定义	88
4.3.2 矩形脉冲	89
4.4 功率信号	93
4.4.1 周期信号	93
4.4.2 梯形波	97
4.5 某些信号的举例	100
参考文献	101
习题	102
第5章 传输线	106
5.1 引言	106
5.2 基本问题分析	106
5.3 TEM 传输线	107
5.4 电报方程：准集总电路模型	109
5.5 波动方程	110
5.6 频域分析	111
5.6.1 一般解	111
5.6.2 传播常数和特性阻抗的进一步讨论	112
5.6.3 电压、电流和阻抗的关系	113
5.7 传输线参数	124
5.7.1 同轴线	124
5.7.2 平行线传输线	126
5.7.3 平行板传输线	128
5.7.4 接地平面上的圆形导线	129
5.7.5 微带线	129
5.7.6 带状线	133
5.7.7 评论注释	135
5.8 传输线上的瞬态过程	138
5.8.1 初始值和最终（稳态）值	138
5.8.2 瞬态值	139
5.9 测量	144
5.9.1 开槽线测量	144
5.9.2 网络分析测量	145
参考文献	145
习题	146
第6章 天线与辐射	149
6.1 引言	149

6.2	位函数	149
6.3	电流元产生的辐射	153
6.3.1	完整的场分布	153
6.3.2	近区场和远区场	155
6.3.3	近区和远区场	157
6.3.4	辐射功率和辐射图	158
6.3.5	波阻抗	162
6.4	小电流环的辐射	163
6.4.1	完整场	163
6.4.2	远区场	165
6.4.3	辐射功率	166
6.4.4	波阻抗	166
6.5	基本的天线参数	167
6.5.1	辐射强度	168
6.5.2	方向性系数和增益	169
6.6	任意电流分布情况下的远区场	172
6.6.1	辐射矢量和远区场	172
6.6.2	天线的有效长度矢量	175
6.6.3	总结	177
6.7	线天线	177
6.7.1	中心馈电的线天线	178
6.7.2	长为 l 的偶极子的远场	179
6.7.3	辐射功率和方向性系数	181
6.7.4	余弦、正弦和修正的余弦积分	182
6.7.5	半波偶极子天线	183
6.8	近场区域和远场区域	186
6.8.1	基本假设	186
6.8.2	点源	187
6.8.3	扩展源	187
6.8.4	不同区域的定义	188
6.8.5	区域边界的特殊值	190
6.9	天线等效电路	191
6.9.1	发射天线	191
6.9.2	接收天线	194
6.9.3	等效面积	195
6.10	天线阵	197
6.10.1	一般考虑	197

6.10.2 二元天线阵	199
6.11 地面上的天线	203
6.11.1 地面和接地平面	203
6.11.2 镜像理论	203
6.11.3 理想地面上的电流元镜像	204
6.11.4 地面上的偶极子	205
6.11.5 单极天线	209
6.12 双锥天线	210
6.12.1 双锥传输线	210
6.12.2 有限双锥天线	214
参考文献	216
习题	217
第7章 电路元件的特性	219
7.1 引言	219
7.2 串联 RLC 电路	219
7.3 集总参数 R 、 L 和 C 的定义	221
7.3.1 电路理论的描述	221
7.3.2 场理论的描述	222
7.4 圆导线	224
7.4.1 电阻	226
7.4.2 内电感	227
7.5 圆导线结构的外电感	228
7.5.1 基本关系	228
7.5.2 圆环	230
7.6 直导线的电感	233
7.6.1 部分电感	233
7.6.2 矩形闭合回路的电感	236
7.7 其他结构	237
7.7.1 PCB 线路	237
7.7.2 微带线、带状线和共面导线	238
7.8 电路元件的行为	240
7.8.1 波特图	241
7.8.2 电阻	244
7.8.3 电容	246
7.8.4 电感	247
参考文献	252
习题	253

第 8 章 辐射发射和敏感度	256
8.1 介绍	256
8.2 基本要求	256
8.3 线性元件的辐射	256
8.4 两平行电流	258
8.4.1 引言	258
8.4.2 两平行电流	259
8.5 敏感度分析的传输线模式	263
8.5.1 介绍	263
8.5.2 双线传输线上的感应电压	263
参考文献	266
第 9 章 电磁屏蔽	267
9.1 介绍	267
9.2 定义	267
9.3 屏蔽效能	268
9.3.1 引言	268
9.3.2 屏蔽效能的计算用表达式	270
9.4 屏蔽效能：近场入射	273
9.4.1 电场和磁场源	273
9.4.2 屏蔽效能表达式：近区场考虑	274
9.5 讨论	276
9.5.1 远区场	276
9.5.2 近区场	277
参考文献	277
第 10 章 元件之间的耦合	278
10.1 引言	278
10.2 容性（电）耦合	278
10.3 感性（磁）耦合	281
10.3.1 几个基本概念	281
10.3.2 被扰导体的屏蔽	283
参考文献	286
第 11 章 静电放电	287
11.1 引言	287

11.2 静电在物体上的聚集	287
11.3 起电与电荷的分离	288
11.4 作为静电放电源的人体	289
11.5 静电放电波形	292
11.6 人体电路模型	293
11.7 静电放电发生器与静电放电测试	294
参考文献	295
第 12 章 EMC 标准	296
12.1 引言	296
12.2 现行美国标准	296
12.2.1 引言	296
12.2.2 FCC 对数字设备高频辐射的限值	297
12.2.3 FCC 关于数字设备的传导发射限值	299
12.3 EMI/EMC 标准：非美国标准	300
12.3.1 CISPR 的标准	300
12.3.2 欧洲标准	301
参考文献	301
第 13 章 电磁发射的测量	302
13.1 简介	302
13.2 概要	302
13.3 辐射发射	302
13.3.1 简介	302
13.3.2 接收设备	303
13.3.3 天线	303
13.3.4 相关结果	305
13.4 传导发射	307
13.4.1 简介	307
13.4.2 电源线上的噪声	307
13.4.3 电源线上的瞬态过程	308
13.4.4 待测设备的传导发射	308
13.4.5 相关结果	309
参考文献	310
附录	312
附录 A 矢量和矢量分析	312
A.1 绪论	312

A. 2	标量场和矢量场的定义	312
A. 2. 1	标量场	312
A. 2. 2	矢量场	313
A. 3	矢量代数	313
A. 3. 1	定义	313
A. 3. 2	矢量的加减	314
A. 3. 3	矢量的数乘	315
A. 3. 4	单位矢量	316
A. 3. 5	矢量位移和分矢量	316
A. 4	矢量面积元	319
A. 5	矢量的乘法	320
A. 5. 1	矢量的点乘	320
A. 5. 2	矢量的叉乘	323
A. 5. 3	三矢量相乘	324
A. 6	坐标系统	325
A. 6. 1	3种基本的坐标系	325
A. 6. 2	空间变量和基矢量	326
A. 7	基本微分关系	328
A. 7. 1	直角坐标系	328
A. 7. 2	柱和球系统	328
A. 8	单位矢量的变换	329
A. 9	矢量微积分	330
A. 9. 1	矢量 A 对时间的导数	330
A. 9. 2	矢量 A 的空间导数	330
A. 9. 3	标量函数的梯度	331
A. 9. 4	矢量的通量	334
A. 9. 5	矢量 A 的散度	335
A. 9. 6	矢量函数的旋度	337
A. 10	拉普拉斯算符 $\nabla^2 = \nabla \cdot \nabla$	340
A. 11	关于符号的总结	341
A. 12	一些有用的关系	341
A. 12. 1	矢量代数	342
A. 12. 2	矢量等式	342
A. 12. 3	积分关系	342
参考文献	344
习题	345
附录 B	频段分析	347
附录 C	本构关系	349

第1章 概述

1.1 介绍

现代电子设备或系统都要求与所处的电磁环境兼容。这种电磁环境中包含了许多电磁骚扰和噪声的发射源，通过设计应该能使这些骚扰对电子系统性能的影响最小化。同时，还要求系统在环境中所发射的噪声对周围其他电子系统性能的影响最小化。所有这些问题都被归为电磁干扰（Electro Magnetic Interference, EMI）。

本章，我们定义了几个用于描述 EMI 现象的通用术语，并简要讨论了一些机理，它们会有助于我们解释电子设备中出现的 EMI 问题。如此一来，我们就能以适当的角度去理解应用电磁学和电磁兼容（EMC）的相互关系，它们也构成了本书的主题。

1.2 定义

IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms^[1]将电磁干扰定义为“电磁骚扰对有用电磁信号接收的破坏”。电磁骚扰可以是包括多径形式在内的任意形式的无用电磁信号。在时间上，骚扰可以是连续的或者离散的，可以是周期性的或者非周期性的。通常，任何无用的电磁信号或骚扰都会被当作噪声。

自从无线电通信诞生以来，射频干扰（Radio Frequency Interference, RFI）这个名词就大量地与 EMI 混用，经常被错误地用来描述干扰现象。为了说明这两个名词之间的细微差别，我们引用 IEEE 对 RFI 的定义：“无用的无线电信号对有用的无线电信号接收的破坏，即无线电骚扰”^[1]。按照美国联邦通信委员会（Federal Communications Commission, FCC）^[2]的定义，无线电信号（或射频）的频率范围从 9kHz ~ 3000GHz。因此，RFI 可以被描述为射频干扰对有用信号接收的破坏。

周围环境噪声的存在使得电子设备在其最初的设计阶段就必须适当考虑电磁兼容，如此才能避免设备性能在预先规定的最低水平的电磁噪声的影响下出现下降。同时，确保设备发射的电磁噪声不超过预先规定的水平也很重要，如此就不会导致周围其他电子系统的性能下降。另外，还必须考虑系统内部所产生的噪声

以确保其不会出现内部的相互干扰并导致自身性能的下降。

随着电子系统（尤其是那些能够高效辐射电磁能量的数字设备）的大量增加，现代设计正试图满足上述要求以实现所设计的系统与周围电磁环境的兼容。

我们把电磁兼容定义为“电磁设备或系统在给定电磁环境下按照设计水平运行的能力”^[1]。在美国，这些设计水平通常由 FCC 制定，具体介绍见本书后续章节。

1.3 干扰机理

一个系统可能因为各种 EMI 而导致其性能的下降。例如，无线电接收机在自由空间接收远处发射机（源）发出的信号，如图 1-1 所示。为了简化，我们假设无线电接收机附近只有一个孤立的电磁噪声源，而且也只有有一个简单的反射面（针对发射信号）作为多径源。

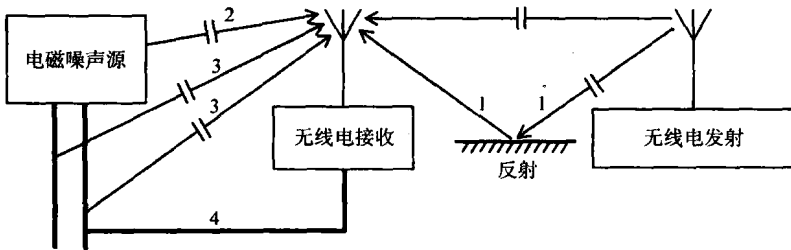


图 1-1 自由空间中的无线电接收机接收到远处发射机（源）发出的信号

理想状况下，无线电接收机只应该接收到直射信号。但如图 1-1 所示，无用电磁骚扰可以通过一些特殊途径到达接收机。除了希望接收到的信号外，接收机还可以通过 4 条路径接收以下 5 种电磁骚扰：

1) 多径信号通过路径 1 到达接收机。该信号与希望接收的信号相似，但它是在经过一个反射面反射之后才到达接收机的。通常，该信号与预期信号的幅度基本相同，但在接收天线处的相位是不同的。其相位差的大小通常也决定了它对接收的破坏程度。

2) 从噪声源辐射出的骚扰通过路径 2 到达接收机。

3) 电源线中存在着大量的电气骚扰，而且电磁噪声源也有可能通过传导的方式将噪声引入电源线。路径 3 显示了电源线上的噪声通过辐射到达接收机的途径。

4) 电磁噪声源还可以通过传导的方式将噪声耦合到信号线或控制线上。当然，线上的噪声可以通过辐射的方式到达接收机，如路径 3 所示。

5) 假设无线电接收机和电磁噪声源共用电源，电源线上的噪声会沿路径 4 以传导耦合的方式到达接收机。