



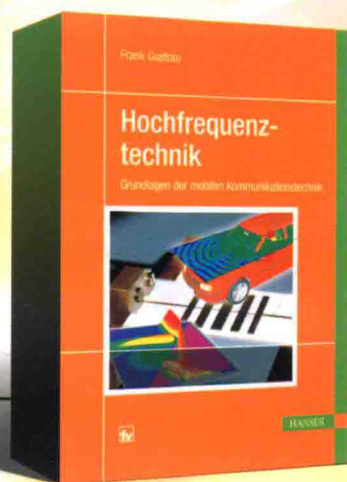
国外信息技术精品丛书

射频与微波工程： 无线通信基础

Hochfrequenztechnik

*Grundlagen der
mobilen*

*Kommunikations-
technik*



[德] Frank Gustrau 著

陈 会 译

张玉兴 审校



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>

国外信息技术精品丛书

射频与微波工程：无线通信基础

Hochfrequenztechnik

Grundlagen der mobilen Kommunikationstechnik

[德] Frank Gustrau 著

陈会译

张玉兴 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书对无线通信领域涉及的射频与微波工程做了基础性和实用性的介绍,通过强调传输线、电路与器件和电波传播的物理本质来揭示广泛的射频/微波主题。主要内容包括电磁波、传输线、无源电路、天线以及电波传播等。本书不仅涵盖了广泛的射频微波概念,而且还列举了大量与工程实践紧密相关的课题。作者将业界广泛使用的射频与微波设计工具,如电路仿真器、电磁仿真器和计算机可视化的史密斯圆图应用于各种电路/器件的分析与设计,以阐明在射频/微波工程实践中如何利用这些工具和方法来卓有成效地处理和解决各种难题。

本书可作为信息科学、电子电气工程和其他相关专业本科生和研究生的教材,也可以作为无线通信、雷达和遥感遥测等电子信息系统领域相关人员的参考书。

Copyright@2013

Carl Hanser Verlag

All right reserved.

Authorized translation from the original German Language edition published by Carl Hanser Verlag

本书版权归 Carl Hanser Verlag 所有。

本书中文简体字版译自于 Carl Hanser Verlag 出版的德语原版。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字:01-2015-1142

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

射频与微波工程:无线通信基础 / (德)格时托著;陈会译. —北京:电子工业出版社,2015.9

(国外信息技术精品丛书)

ISBN 978-7-121-26988-2

I. ①射… II. ①格… ②陈… III. ①射频电路 ②射频电路 IV. ①TN710 ②TN015

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 195630 号

责任编辑:刘海艳

印 刷:北京京科印刷有限公司

装 订:三河市皇庄路通装订厂

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:17.75 字数:454.4 千字

版 次:2015 年 9 月第 1 版

印 次:2015 年 9 月第 1 次印刷

印 数:3 000 册 定价:68.00 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。

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

服务热线:(010) 88258888。

代 序

无线技术已经成为人们日常生活不可分割的一部分，无线数字通信、无线网络融入了每个人的生活，手机上网随处可见。工业、农业、航空航天领域更是离不开无线技术，雷达、导航、空间探测、遥感技术、射频识别，乃至地震、地质灾害预测等等都离不开无线技术。无线技术的基础——射频和微波工程则成为电子工程、通信工程、网络工程等专业的一门必修课程，更是该领域工程师们的基本技能。

在无线技术领域为了更好地利用宝贵的电磁频谱，设计更加有效率的天线，一直使用相对高的载波频率。毫无疑问，这些频率范围占据了射频到微波频段。不仅如此，人们会发现现代高速数据的传输速率达几百兆比特/秒，甚至更高。这样高的传输速率已经完全跨入了射频频率范围。产生、处理、传输这样的数据的相关电路技术已进入了射频、微波领域。数字电路设计工程师面临新的挑战：数据传输需要更加精细的处理，必须考虑传输线的时延、失配和传输线向外辐射而引起的互相耦合问题；相邻元件之间的互耦、寄生参数带来的影响等问题必须纳入高速数字电路设计中考虑。因此，现代高速数字电路已经迈入射频与微波电路领域。

射频与微波领域覆盖了很宽范围的主题，从大的方面分可分为有源电路和无源电路。本书主要讨论无源射频和微波电路，与我国这方面的教材和著作不同，它还包含该领域重要的内容——天线，这是该书鲜明的特点。本书的另一特点是：基本概念非常清晰，而且从与以往不同的方面去阐述，有些提法非常新颖而且有趣，可以从烦琐的 MAXWELL 方程中解脱出来。即使长期从事该领域的老技术人员读起本书来也会耳目一新，对人有启发。

张玉兴教授和陈会副教授长期从事射频、微波电路的教学与科研工作，在无线电接收和发射系统、固态功率放大器、高线性大动态接收机、功率放大器线性化技术、高稳定频率源等领域有所建树。张玉兴教授在 2000 年成立成都赛英科技有限公司，经过十几年的努力，成为上述几个领域集科研与生产为一体的机构。张玉兴教授在 2013 年由电子工业出版社出版了一部著作《射频与微波晶体管功率放大器工程》，并且有幸成为成都宝通天宇电子科技有限公司的顾问，因为该公司主要从事射频与微波晶体管功率放大器的科研开发和生产。特别要提到的是，该公司研发的 UHF 和 S 波段的前馈功率放大器已批量生产，装备有关单位，其指标达到了国际同类产品的先进水平。

本书由电子科技大学副教授陈会博士翻译，张玉兴教授审校。本书能够顺利出版，除了得到了电子工业出版社刘海艳编辑的大力帮助外，还得到了成都赛英科技有限公司和成都宝通天宇电子科技有限公司的资助。此书的出版对无线技术领域做出了无私的贡献，在此对译者和电子工业出版社表示衷心的感谢。

成都赛英科技有限公司总经理 易增辉
成都宝通天宇电子科技有限公司总经理 王武林

前 言

本书的目的主要是让学生对射频和微波工程的基本原理以及无线通信的物理特性有一个基本而又实用的理解。

近年来，无线技术已经引起了日益的关注，特别是在通信领域（例如数据网络、移动电话）、射频识别（RFID）、导航（GPS）及探测（雷达）方面。自此以后，无线电应用一直在使用相对高的载波频率，这将有利于更好地使用电磁频谱和允许设计更多有效的天线。基于低成本的制造工艺和现代计算机辅助设计工具，未来新的应用领域将使用更宽的带宽。

如果我们来看一下今天的电路技术，会发现高数据率的高速数字电路到达了射频范围。结果是，数字电路设计师面临新的设计挑战：传输线需要更加精细的处理，相邻元件之间的寄生耦合变得越来越明显，谐振结构表现出意想不到的电磁辐射，而分布式结构可能会提供比经典集总元件更好的优点。因此，数字技术会迈向使用射频概念的方向发展，如使用诸如传输线理论和基于电磁场的设计方法。

在今天的很多技术产品中，各种无线电应用和高数据率通信系统随处可见，比如，曾经一度认为是仅仅与机械相关的汽车行业。因此，射频技术的基本原理在今天不再只是一个独立的领域，而是提供了诸如电气工程、信息和通信技术以及机电与汽车工程等各种领域的基础。

射频与微波领域覆盖了很宽范围的主题，当然，整个内容超出了本书所关注为基础课题的范畴。与经典电气工程相比，高频技术的显著特征是其结构尺寸相对于波长而言不再是小得可以忽略不计，其结果是电波传播过程导致典型的高频现象：反射、谐振和辐射。因此，本书关注的中心是电波传播及其描述、它的影响和在无源电路与天线结构中的应用。

本书将不涉及有源电子元件，像晶体管和高频电路的整个频谱，如放大器、混频器以及振荡器的设计。为了详细处理这类问题，需要电子电路设计理论和半导体物理的基础知识，这些主题都将超过本书的范围。

如果我们今天来看一下概念化的射频元件和天线，将会清晰地发现：用于电子设计自动化（EDA）的软件工具已经变成了整个设计过程的基本部分。因此，各种设计实例综合使用了电路仿真器和电磁仿真器两种软件。本书使用了如下软件工具：

- 安捷伦公司的 ADS（先进的设计系统）软件；
- IMST GmbH 公司的 Empire 软件；
- 安捷伦公司的 EMPro 软件。

由于这些软件产品的市场一直在变化，因此，强力推荐读者根据自身情况找到最适合自己的产品开始研究。

在每章之后有习题以便加深读者对于本章内容的理解，习题答案可以在如下网站找到：

http://www.fh-dortmund.de/gustrau_rf_textbook

最后，我满怀感激之情：感谢我的同事和学生对于本书的出版所提供的有益建议或在课堂上的有益讨论。同时，感谢我的家人对完成本书的一贯支持。

Frank Gustrau
德国 多特蒙德

缩写列表

3GPP	第三代合作伙伴计划
Al ₂ O ₃	铝
Balun	平衡-不平衡
CAD	计算机辅助设计
DC	直流
DFT	离散傅里叶变换
DUT	待测器件
EM	电磁
EMC	电磁兼容
ESR	等效串联电阻
FDTD	时域有限差分
FEM	有限元法
FR-4	玻璃纤维环氧树脂覆铜板
GaAs	砷化镓
GPS	全球定位系统
GSM	移动通信全球系统
GTD	衍射的几何理论
GUI	图形用户接口
HPBW	半功率波束宽度
ICNIRP	非电离辐射保护国际委员会
IFA	倒 F 天线
ISM	工业、科学与医疗
ITU	国际电讯联盟
LHCP	左手圆极化
LHEP	左手椭圆极化
LNA	低噪声放大器
LOS	直视距
LTE	长期演进
LTI	线性时不变
MIMO	多入多出
MMIC	单片微波集成电路
MoM	矩量法
NA	网络分析仪
NLOS	非直视距
PA	功率放大器

PCB	印制电路板
PEC	理想导体
PML	理想匹配层
PTFE	聚四氟乙烯
Radar	无线电定位与探测
RCS	雷达截面
RF	射频
RFID	射频识别
RHCP	右手圆极化
RHEP	右手椭圆极化
RMS	均方根
SAR	特定吸收率
SMA	亚微型接头 A
SMD	表面安装器件
TEM	横向电磁
UMTS	环球移动通信系统
UTD	衍射的均匀理论
UWB	超宽带
VNA	矢量网络分析仪
VSWR	电压驻波比
WLAN	无线局域网

符号列表

拉丁字母

A	面积 (m^2)
A_{dB}	衰减 (dB)
\vec{A}	磁矢量位 (Tm)
A_{eff}	有效天线面积 (m^2)
\mathbf{A}	ABCD 矩阵 (矩阵元件有不同单位)
\vec{B}	磁通量密度 (磁感应) (T; 特斯拉)
B	带宽 (Hz)
BW	带宽 (角频率) (1/s)
c	波速 (m/s)
C	电容 (F; 法拉)
$C(\varphi, \nu)$	辐射格式函数 (无量纲)
C'	单位长的电容 (F/m)
D	方向性 (无量纲)
\vec{D}	电通量密度 (C/m^2)
\vec{E}	电场强度 (V/m)
f	频率 (Hz)
f_c	截止频率 (Hz)
\vec{F}	力 (N; 牛顿)
\vec{F}_C	库仑力 (N)
\vec{F}_L	洛伦兹力 (N)
G	电导 ($1/\Omega=\text{S}$)
G	增益 (无量纲)
G	格林函数 (1/m)
G'	单位长的电导 (S/m)
\vec{H}	磁场强度 (A/m)
\mathbf{H}	混合矩阵 (矩阵元件有不同单位)
I	电流 (A; 安培)
\mathbf{I}	单位矩阵 (无量纲)
j	虚部单位 (无量纲)
\vec{J}	电流密度 (A/m^2)
\vec{J}_S	表面电流密度 (A/m)
k	耦合系数 (无量纲)
k	波数 (1/m)

k_c	截止波数 (1/m)
\bar{k}	波矢量 (1/m)
l, L	长度 (m)
L	电感 (H; 亨利)
L	路径损耗 (无量纲)
L'	单位长的电感 (H/m)
p	功率密度 (W/m^3)
P	功率 (W; 瓦特)
P_{antenna}	接收功率 (W)
P_{inc}	入射功率 (W)
P_{rad}	辐射功率 (W)
Q	电荷 (C; 库伦)
Q	品质因数 (无量纲)
r	径向坐标 (m)
R	电阻 (Ω)
R_{DC}	稳态电流的电阻 (Ω)
R_{ESR}	等效串联电阻 (Ω)
R_{RF}	射频电阻 (Ω)
R_{rad}	辐射电阻 (Ω)
R'	单位长的电阻 (Ω/m)
s_{kl}	散射参数 (无量纲)
\mathbf{S}	散射矩阵 (无量纲)
\bar{S}	坡印廷矢量 (W/m^2)
\bar{S}_{av}	坡印廷矢量的平均值 (W/m^2)
t	时间 (s; 秒)
T	周期 (s)
$\tan\delta$	损耗角正切 (无量纲)
U	电压 (V; 伏特)
\bar{v}	速度 (m/s)
v_{gr}	群速度 (m/s)
v_{ph}	相位速度 (m/s)
V	体积 (m^3)
w_e	电能量密度 (J/m^3)
W_e	电能量 (J; 焦耳)
w_m	磁能密度 (J/m^3)
W_m	磁能量 (J)
x, y, z	笛卡儿坐标 (m)
Y	导纳 (S; 西门子)

Y	导纳矩阵 (S)
Z_A	负载阻抗 (Ω)
Z_F	特征波阻抗 (Ω)
Z_{F0}	自由空间的特征阻抗 (Ω)
Z_{in}	输入阻抗 (Ω)
Z_0	特征线阻抗 (Ω)
	端口参考阻抗 (Ω)
$Z_{0,cm}$	共模线阻抗 (Ω)
$Z_{0,diff}$	差模线阻抗 (Ω)
Z_{0e}	偶模线阻抗 (Ω)
Z_{0o}	奇模线阻抗 (Ω)
Z	阻抗矩阵 (Ω)
希腊字母	
α	衰减系数 (1/m)
β	相位常数 (1/m)
δ	趋肤深度 (m)
Δ	拉普拉斯算子 ($1/m^2$)
$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$	介电常数 (As/(Vm))
ε_r	相对介电常数 (无量纲)
$\varepsilon_{r,eff}$	有效相对介电常数 (无量纲)
η	辐射效率 (无量纲)
η_{total}	总辐射效率 (无量纲)
γ	传播常数 (1/m)
λ	波长 (m)
λ_w	波导内的波长 (m)
$\mu = \mu_0 \mu_r$	磁导率 (Vs/(Am))
μ_r	相对磁导率 (无量纲)
∇	Nabla 算子 (1/m)
φ	相位角 (rad)
φ	方位角 (rad)
ϕ	标量电位 (V)
φ_0	初相 (rad)
Ψ_e	电通量 (C)
Ψ_m	磁通量 (Wb, 韦伯) (Vs)
ρ	体电荷密度 (C/m^3)
ρ_s	表面电荷密度 (C/m^2)
σ	导电率 (S/m; 西门子/m)
σ	雷达截面积 (m^2)
ν	俯仰角 (rad)

ν_{iB} 布鲁斯特角 (rad)

ν_{iC} 临界角 (rad)

ω 角频率 (1/s)

物理常量

μ_0	$4\pi \times 10^{-7} \text{ Vs/(Am)}$	自由空间的磁导率
ϵ_0	$8.854 \times 10^{-12} \text{ As/(Vm)}$	自由空间的介电常数
c_0	$2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$	真空中的光速
e	$1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$	基本电荷
Z_{F0}	$120\pi\Omega \approx 377\Omega$	自由空间的特征阻抗

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 射频与微波的应用	1
1.2 频段	2
1.3 高频中的物理现象	4
1.3.1 电短传输线	4
1.3.2 大于十分之一波长的传输线	5
1.3.3 辐射与天线	6
1.4 后续章节概述	7
参考文献	8
第 2 章 电磁场与波	9
2.1 电场和磁场	9
2.1.1 静电场	9
2.1.2 稳态电流和磁场	14
2.1.3 差分矢量算子	18
2.2 麦克斯韦方程	18
2.2.1 时域差分形式	19
2.2.2 时谐相关的差分形式	20
2.2.3 积分形式	21
2.2.4 要素关系和材料特性	22
2.2.5 边界条件	24
2.3 电磁问题的分类	25
2.3.1 静态场	25
2.3.2 准静态场	26
2.3.3 耦合电磁场	26
2.4 趋肤效应	27
2.5 电磁波	29
2.5.1 波动方程与平面波	29
2.5.2 波的极化	33
2.5.3 反射和折射	34
2.5.4 球面波	39
2.6 小结	40
2.7 习题	41
参考文献	42
拓展阅读	42

第 3 章 传输线理论及其瞬态信号	43
3.1 传输线理论	43
3.1.1 传输线的等效电路	43
3.1.2 电报方程	44
3.1.3 传输线上的电压和电流波	46
3.1.4 终端加载的传输线	48
3.1.5 输入阻抗	50
3.1.6 无损传输线	51
3.1.7 低损传输线	53
3.1.8 不同终端的传输线	54
3.1.9 无损传输线的阻抗变换	60
3.1.10 反射系数	61
3.1.11 史密斯圆图	63
3.2 传输线上的瞬态信号	67
3.2.1 阶跃函数	67
3.2.2 矩形函数	74
3.3 眼图	75
3.4 小结	77
3.5 习题	77
参考文献	78
拓展阅读	78
第 4 章 传输线与波导	79
4.1 概述	79
4.2 同轴线	81
4.2.1 特殊的电感和特征阻抗	81
4.2.2 低损传输线的衰减	83
4.2.3 频率范围	85
4.2.4 应用领域	86
4.3 微带线	87
4.3.1 特征阻抗和有效介电常数	87
4.3.2 色散与频率范围	89
4.3.3 应用领域	90
4.4 带状线	90
4.4.1 特征阻抗	91
4.4.2 频率范围	91
4.5 共面线	92
4.5.1 特征阻抗和有效介电常数	93
4.5.2 地平面上的共面波导	93

4.5.3	共面波导和空气桥	94
4.5.4	频率范围	95
4.5.5	应用领域	95
4.6	矩形波导	96
4.6.1	电边壁之间的电磁波	96
4.6.2	主模 (TE_{10})	98
4.6.3	高阶模	102
4.6.4	应用领域	102
4.6.5	波导模式的激励	103
4.6.6	腔体谐振	103
4.7	圆波导	105
4.8	双导体传输线	108
4.8.1	特征阻抗	108
4.8.2	应用领域	109
4.9	三导体传输线	109
4.9.1	奇偶模	109
4.9.2	特征阻抗和传播常数	111
4.9.3	奇偶模的传输线终端	113
4.10	习题	113
	参考文献	114
第5章	散射参数	115
5.1	多端口网络描述	115
5.2	归一化功率波	116
5.3	散射参数与功率	118
5.4	网络特性的 S 参数描述	120
5.4.1	匹配	120
5.4.2	复共轭匹配	121
5.4.3	互易性	122
5.4.4	对称性	123
5.4.5	无源和无损电路	123
5.4.6	单向电路	124
5.4.7	三口网络的特征	124
5.5	S 参数的计算	124
5.5.1	反射系数	124
5.5.2	传输系数	125
5.5.3	去归一化	127
5.6	信号流方法	128
5.6.1	单口网络/负载终端	129

5.6.2	源	130
5.6.3	双口网络	130
5.6.4	三口网络	130
5.6.5	四口网络	131
5.7	S 参数的测量	133
5.8	习题	136
	参考文献	137
	扩展阅读	138
第 6 章	射频元件与电路	139
6.1	集总无源元件的等效电路	139
6.1.1	电阻器	139
6.1.2	电容器	141
6.1.3	电感器	141
6.2	传输线谐振器	143
6.2.1	半波谐振器	143
6.2.2	四分之一波长谐振器	145
6.3	阻抗匹配	146
6.3.1	LC 网络	146
6.3.2	分立元件匹配电路	148
6.4	滤波器	151
6.4.1	经典 LC 滤波器设计	152
6.4.2	巴特沃斯滤波器	153
6.5	传输线滤波器	159
6.5.1	边缘耦合线滤波器	159
6.5.2	发夹线滤波器	164
6.5.3	阶梯阻抗滤波器	164
6.5.4	寄生腔体谐振	165
6.5.5	波导滤波器	166
6.6	环形器	167
6.7	功分器	169
6.7.1	威尔金森功分器	169
6.7.2	不等分功分器	170
6.8	分支线耦合器	172
6.8.1	常规 3dB 耦合器	172
6.8.2	不等分分支线耦合器	174
6.9	鼠环耦合器	175
6.10	定向耦合器	176
6.11	平衡-不平衡电路	178

6.12 电子电路	179
6.12.1 混频器	181
6.12.2 放大器和振荡器	183
6.13 射频设计软件	184
6.13.1 射频电路仿真器	184
6.13.2 三维电磁仿真器	184
6.14 习题	187
参考文献	188
扩展阅读	189
第7章 天线	190
7.1 基本参数	190
7.1.1 近场和远场	190
7.1.2 各向同性辐射器	192
7.1.3 辐射模式及其相关参数	192
7.1.4 阻抗匹配和带宽	196
7.2 天线的标准类型	197
7.3 赫兹偶极子的数学处理	199
7.4 线天线	202
7.4.1 半波偶极子	202
7.4.2 单极子	205
7.4.3 减天线高度的概念	205
7.5 平面天线	206
7.5.1 矩形贴片天线	207
7.5.2 圆极化贴片天线	211
7.5.3 平面偶极子和倒 F 天线	213
7.6 天线阵列	214
7.6.1 单元件辐射模式和阵列因子	214
7.6.2 相控阵天线	217
7.6.3 波束形成	221
7.7 现代天线概念	222
7.8 习题	223
参考文献	223
扩展阅读	224
第8章 无线电波的传播	225
8.1 传播机理	225
8.1.1 反射和折射	225
8.1.2 吸收	226
8.1.3 衍射	226

8.1.4	散射	227
8.1.5	多普勒效应	228
8.2	基本的传播模型	230
8.2.1	自由空间的损耗	230
8.2.2	空气的衰减	232
8.2.3	平面地球损耗	233
8.2.4	点对点无线链路	235
8.2.5	分层介质	237
8.3	路径损耗模型	238
8.3.1	多径环境	239
8.3.2	杂波因子模型	240
8.3.3	奥村-哈塔 (Okumara-Hata) 模型	241
8.3.4	物理模型和数值方法	242
8.4	习题	244
	参考文献	244
	拓展阅读	244
附录 A		245
A.1	坐标系	245
A.1.1	笛卡儿坐标系	245
A.1.2	圆柱坐标系	246
A.1.3	球坐标系	247
A.2	对数描述	248
A.2.1	无量纲的量	248
A.2.2	相对和绝对比	248
A.2.3	链路预算	249
附录 B	术语中英对照表	250