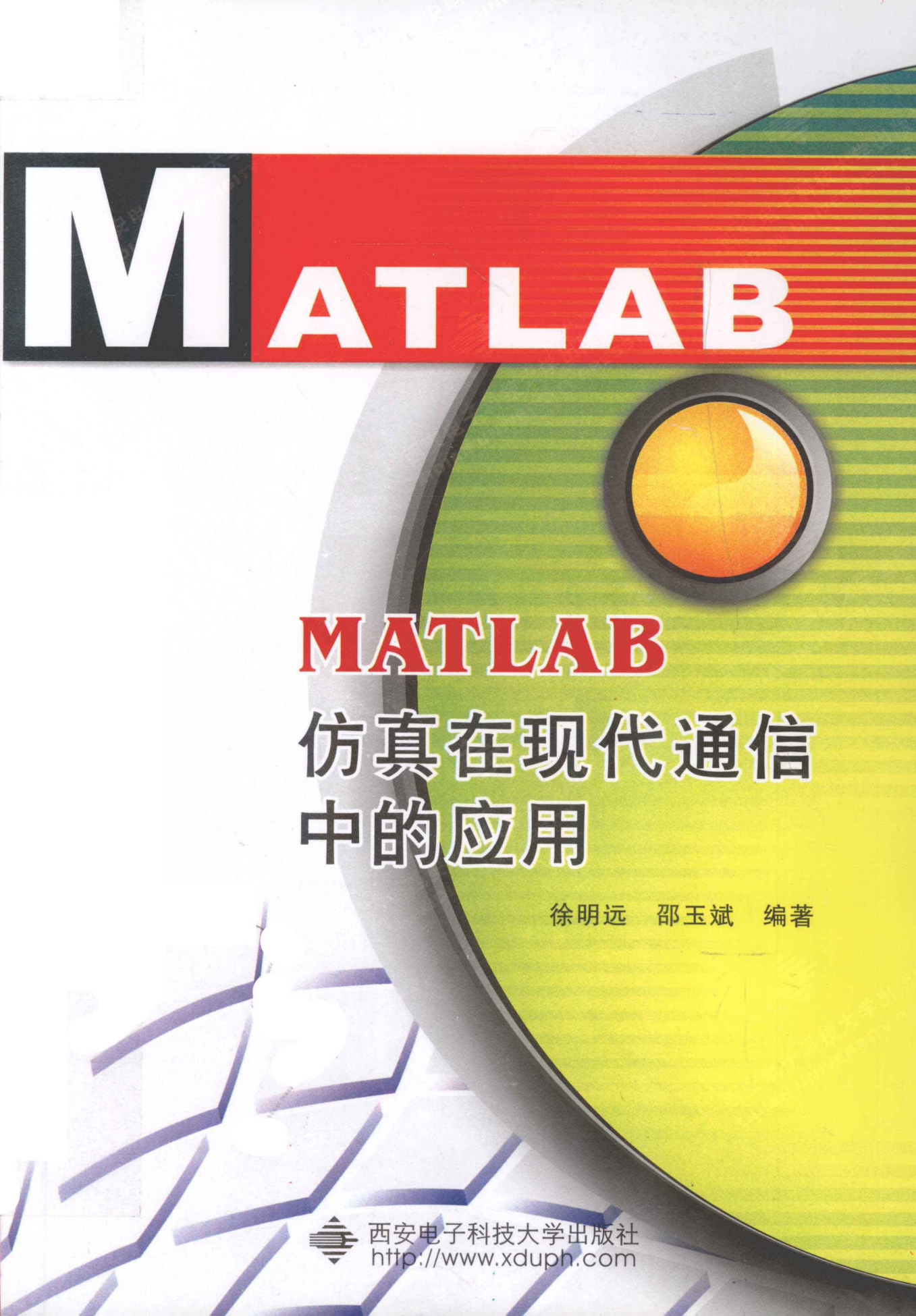


The background of the cover features a large, stylized circular graphic on the right side, transitioning from green at the top to yellow at the bottom, with a black ring and a glowing orange-yellow center. On the left, there are abstract purple and white geometric shapes. The MATLAB logo is prominently displayed at the top.

MATLAB

MATLAB

仿真在现代通信 中的应用

徐明远 邵玉斌 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

MATLAB 仿真在现代通信中的应用

徐明远 邵玉斌 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书以现代无线电通信中的关键技术:扩频、跳频、OFDM、3G 系统、无线接入系统以及常见无线通信系统作为对象,以 MATLAB/Simulink 作为仿真工具,对上述系统进行了仿真实验;还对数字信号通过各种调制方式,发送滤波器后的频谱特性,以及应用各种差错控制方式后的传输特性给出了系列仿真实例。并对上述仿真内容进行了简单的原理性介绍,对于建模和仿真编程中出现的主要问题与注意事项做了相应的讲解。全书源程序附有光盘。

本书可作为高等学校通信专业的教学、科研参考书,也可供管理部门作为参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

MATLAB 仿真在现代通信中的应用/徐明远,邵玉斌编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2011.4
ISBN 978-7-5606-2554-6

I. ① M… II. ① 徐… ② 邵… III. ① 通信系统—系统仿真—软件包, MATLAB
IV. ① TN914

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 027693 号

策 划 臧延新

责任编辑 杨宗周

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2011 年 4 月第 1 版 2011 年 4 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 13.625

字 数 315 千字

印 数 1~2000 册

定 价 30.00 元(含光盘)

ISBN 978-7-5606-2554-6/TN · 0594

XDUP 2846001-1

如有印装问题可调换

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

近十年来,无线电技术突飞猛进,无线电事业快速发展。扩频、跳频、OFDM 技术、3G 系统、蓝牙、IEEE 802.11a、数字电视、智能天线等技术的出现,让人目不暇接。无线电成了现代文明的重要组成部分。人们在享受现代文明带来的方便与效率时,想到了应该对这些新技术和新系统多一些了解,然而,深奥的理论、复杂的技术、昂贵的设备与仪器给学习带来了不少的困难。人们在寻找与快速进步的技术相适应的学习与研究方法时,MATLAB 仿真在新技术的学习与新系统的研发中成了有力的工具。应用 MATLAB 的编程方法和功能模块,可以搭建各种仿真系统,还可以应用丰富的时间域、频率域、相位域的仿真测量仪器。许多新一代通信系统的系统级的仿真程序出现在 MATLAB 软件的演示实例中,这使得学习的效率大为提高,对技术与系统的理解已经从概念深入到电路方案和参数选取的层面。

建立和谐的电磁环境,需要了解各种无线电通信系统的特性,其中包括时间域、频率域、相位域以及传输特性。特别是它们之间的定量关系可以从仿真实例运行的结果中得到。也可以说,每个仿真实例就是一个小实验平台,实验中可以对通信的相关原理,甚至通信系统进行研究,其中的分类结果也可以作为资料备查。本书应用 MATLAB 仿真工具对常见的调制方式、发送滤波器、差错控制方式以及各种通信系统(包括新一代的通信系统)的相关特性进行研究。可以运行的大量仿真实例,一方面给出了仿真的结果;另一方面还给出了部分仪表测量的结果可供比对。仿真实例大部分是作者在教学与科研实践中自行编制的,小部分是 MATLAB 软件中的演示仿真实例。

全书分以下五部分:

第一部分 基础知识,包括数字调制、发送滤波器、通信信号的测量与表达。

第二部分 常用无线电通信系统,包括公众移动通信系统、专用移动通信系统、卫星通信系统。

第三部分 新技术与 3G,包括扩频、跳频、OFDM 以及 3G 系统。

第四部分 无线接入系统与数字电视,包括蓝牙、802.11a 与数字电视。

第五部分 天线与射频技术,包括天线阵列、射频传输线、滤波器。

书中给出了简单的原理介绍、MATLAB 仿真的系统、程序(光盘)以及程序运行结果。对编程中的主要问题与注意事项作了讲解。着重讨论了各种系统及输出信号的频谱特性。对于系统的传输特性,以及影响系统传输特性的因素,譬如调制方式、差错控制方式也进行了较系统的讨论。

为了保持本书简练的篇幅,没有在书中详细介绍所有仿真系统中各个模块的参数设置,也没有将雷同的系列仿真系统的程序在书中展示。购书所附的光盘提供了书中提到的全部

软件。点击模块打开对话框可以仔细研究其中每个模块的参数设置。若需要还可以将其拷贝出来后按照读者的意愿，遵循 MATLAB 的相关规则更改参数后进行学习研究。

本书可作为高等学校通信专业的教学、科研参考书，也可供管理部门作为参考资料。

本书编写中的不妥和疏漏之处，还望读者给予指出。

作者的联系方式：xumy1@163.com，shaoyubin999@sina.com

徐明远 邵玉斌

2011 年 1 月

说 明

1. 用 MATLAB m 文件编写的程序序号在本书中是这样表示的：比如程序 3-5 表示第 3 章的序号为 5 的程序。在 MATLAB 软件中用 CHX3_5 表示。
2. MATLAB/Simulink 程序在本书及 MATLAB 软件中都用 SCHX3_10 表示(第 3 章的序号为 10 的程序)，该仿真系统框图在本书中用图 3-10 表示。
3. 本书的程序可运行在 MATLAB 2008B 版本。

欢迎选购西安电子科技大学出版社教材类图书

~~~~~ “十一五” 国家级规划教材 ~~~~~

计算机系统结构(第四版)(李学干)	25.00
计算机系统安全(第二版)(马建峰)	30.00
计算机网络(第三版)(蔡皖东)	27.00
大学计算机应用基础(陈建铎)	31.00
C++程序设计语言(李雁妮)	37.00
中文版3ds max 9室内外效果图精彩实例创作通	36.00
中文版3ds max9效果图制作课堂实训(朱仁成)	37.00
Internet应用教程(第三版)(高职 赵佩华)	24.00
网络信息安全技术(周明全)(第二版)	30.00
微型计算机原理(第二版)(王忠民)	27.00
微型计算机原理及接口技术(第二版)(裘雪红)	36.00
微型计算机组成与接口技术(高职)(赵佩华)	28.00
微机原理与接口技术(第二版)(龚尚福)	37.00
软件工程与开发技术(第二版)(江开耀)	34.00
单片机原理及应用(第二版)(李建忠)	32.00
单片机应用技术(第二版)(高职)(刘守义)	30.00
单片机技术及应用实例分析(高职)(马淑兰)	25.00
单片机原理及实验/实训(高职)(赵振德)	25.00
Java程序设计(第二版)(高职)(陈圣国)	26.00
数据结构——C语言描述(第二版)(陈慧南)	30.00
编译原理基础(第二版)(刘坚)	29.00
人工智能技术导论(第三版)(廉师友)	24.00
多媒体软件设计技术(第三版)(陈启安)	23.00
信息系统分析与设计(第二版)(卫红春)	25.00
信息系统分析与设计(第三版)(陈圣国)(高职)	20.00
传感器原理及工程应用(第三版)	28.00
传感器原理及应用(高燕)	18.00
数字图像处理(第二版)(何东健)	30.00
电路基础(第三版)(王松林)	39.00
模拟电子电路及技术基础(第二版)(孙肖子)	35.00
模拟电子技术(第三版)(江晓安)	25.00
数字电子技术(第三版)(江晓安)	23.00
数字电路与系统设计(第二版)(邓元庆)	35.00
数字电子技术基础(第二版)(杨颂华)	30.00
数字信号处理(第三版)(高西全)	29.00

电磁场与电磁波(第二版)(郭辉萍)	28.00
射频电路基础(赵建勋)	33.00
天线技术(第二版)(高职)(许学梅)	20.00
现代通信原理与技术(第二版)(张辉)	39.00
现代通信技术与网络应用(第二版)(张宝富)	33.00
移动通信(第四版)(李建东)	30.00
移动通信(第二版)(章坚武)	24.00
光纤通信(第二版)(张宝富)	24.00
光纤通信(第二版)(刘增基)	23.00
物理光学与应用光学(第二版)(石顺祥)	42.00
数控机床故障分析与维修(高职)(第二版)	25.00
液压与气动技术(第二版)(朱梅)(高职)	23.00
机械设计基础(第二版)(高职)(赵冬梅)	28.00

~~~~~ 计 算 机 类 ~~~~~

计算机应用基础(Windows XP+Office 2007)(高职)	34.00
计算机科学与技术导论(吕辉)	22.00
网络信息检索(董守斌)	32.00
网络与TCP/IP协议(武奇生)	29.00
现代信息网技术与应用(赵谦)	33.00
计算机网络工程(高职)(周跃东)	22.00
计算机网络技术与应用(孙健敏)	21.00
信息安全理论与技术(李飞)	26.00
入侵检测(鲜永菊)	31.00
网页设计与制作实例教程(高职)(胡昌杰)	24.00
ASP动态网页制作基础教程(中职)(苏玉雄)	20.00
新编Dreamweaver CS3动态网页设计与制作教程	24.00
局域网组建实例教程(高职)(尹建璋)	20.00
Windows Server 2003组网技术(高职)(陈伟达)	30.00
综合布线技术(高职)(王趾成)	18.00
基于Java EE的电子商务网站建设(潘海兰)	31.00
新编电子商务实用教程(高职)(司爱丽)	20.00
数据结构(高职)(刘肖)	20.00
数据结构与程序实现(司存瑞)	48.00
离散数学(第三版)(方世昌)	30.00
软件体系结构实用教程(付燕)	26.00
软件工程——理论、方法与实践(吴军华)	26.00

软件技术基础(高职)(鲍有文)	23.00	Visual C#.NET程序设计基础(高职)(曾文权)	39.00
软件技术基础(周大为)	30.00	Visual FoxPro数据库程序设计教程(康贤)	24.00
软件工程与项目管理(高职)(王素芬)	27.00	数据库基础与Visual FoxPro9.0程序设计	31.00
软件工程实践与项目管理(刘竹林)	20.00	Oracle数据库实用技术(高职)(费雅洁)	26.00
计算机数据恢复技术(高职)(梁宇恩)	15.00	Delphi程序设计实训教程(高职)(占跃华)	24.00
微机原理与嵌入式系统基础(赵全良)	23.00	SQL Server 2000应用基础与实训教程(高职)	22.00
嵌入式系统原理及应用(刘卫光)	26.00	SQL Server 2005 基础教程及上机指导(中职)	29.00
嵌入式系统设计与开发(章坚武)	24.00	C++面向对象程序设计(李兰)	33.00
ARM嵌入式系统基础及应用(黄俊)	21.00	面向对象程序设计与C++语言(第二版)	18.00
数字图像处理(郭文强)	24.00	Java 程序设计项目化教程(高职)(陈芸)	26.00
ERP项目管理与实施(高职)(林逢升)	22.00	JavaWeb 程序设计基础教程(高职)(李绪成)	25.00
电子政务规划与建设(高职)(邱丽绚)	18.00	Access 数据库应用技术(高职)(王趾成)	21.00
电子工程师项目式教学与训练(高职)(韩党群)	28.00	ASP.NET 程序设计案例教程(高职)(李锡辉)	22.00
电子线路 CAD 实用教程(潘永雄)(第三版)	27.00	XML 案例教程(高职)(睦碧霞)	24.00
中文版 AutoCAD 2008 精编基础教程(高职)	22.00	JSP 程序设计实用案例教程(高职)(翁健红)	22.00
网络多媒体技术(张晓燕)	23.00	Web 应用开发技术: JSP(含光盘)	33.00
多媒体软件开发(高职)(含盘)(牟奇春)	35.00	~~~~~电子、电气工程及自动化类~~~~~	
多媒体技术及应用(龚尚福)	21.00	电路分析基础(曹成茂)	20.00
图形图像处理案例教程(含光盘)(中职)	23.00	电子技术基础(中职)(蔡宪承)	24.00
平面设计(高职)(李卓玲)	32.00	模拟电子技术(高职)(郑学峰)	23.00
CorelDRAW X3项目教程(中职)(糜淑娥)	22.00	模拟电子技术基础——仿真、实验与课程设计	26.00
计算机操作系统(第二版)(颜彬)(高职)	19.00	数字电子技术及应用(高职)(张双琦)	21.00
计算机操作系统(第三版)(汤小丹)	30.00	数字系统设计基础(毛永毅)	26.00
计算机操作系统原理——Linux实例分析(肖竞华)	25.00	数字电路与逻辑设计(白静)	30.00
Linux 操作系统原理与应用(张玲)	28.00	数字电路与逻辑设计(第二版)(蔡良伟)	22.00
Linux 网络操作系统应用教程(高职)(王和平)	25.00	电子线路CAD技术(高职)(宋双杰)	32.00
微机接口技术及其应用(李育贤)	19.00	高频电子线路(第三版)(高职)	22.00
单片机原理与应用实例教程(高职)(李珍)	15.00	高频电子线路(王康年)	28.00
单片机原理与程序设计实验教程(于殿泓)	18.00	高频电子技术(高职)(钟苏)	21.00
单片机应用与实践教程(高职)(姜源)	21.00	微电子制造工艺技术(高职)(肖国玲)	18.00
计算机组装与维护(高职)(王坤)	20.00	电路与电子技术(高职)(季顺宁)	44.00
微型机组装与维护实训教程(高职)(杨文诚)	22.00	电工基础(中职)(薛鉴章)	18.00
微机装配调试与维护教程(王忠民)	25.00	电子与电工技术(高职)(罗力渊)	32.00
微控制器开发与应用(高职)(董少明)	25.00	电工电子技术基础(江蜀华)	29.00
高级程序设计技术(C语言版)(耿国华)	21.00	电工与电子技术(高职)(方彦)	24.00
C#程序设计及基于工作过程的项目开发(高职)	17.00	电工基础——电工原理与技能训练(高职)(黎炜)	23.00
Visual Basic程序设计案例教程(高职)(尹毅峰)	21.00	维修电工实训(初、中级)(高职)(苏家健)	25.00
Visual Basic程序设计项目化案例教程(中职)	19.00	电子装备设计技术(高平)	27.00
Visual Basic.NET程序设计(高职)(马宏锋)	24.00	电子测量技术(秦云)	30.00


~~~~~自动控制、机械类~~~~~		液压传动技术(高职)(简引霞)	23.00
控制工程基础(王建平)	23.00	发动机构造与维修(高职)(王正键)	29.00
现代控制理论基础(舒欣梅)	14.00	汽车典型电控系统结构与维修(李美娟)	31.00
过程控制系统及工程(杨为民)	25.00	汽车单片机与车载网络技术(于万海)	20.00
控制系统仿真(党宏社)	21.00	汽车故障诊断技术(高职)(王秀贞)	19.00
模糊控制技术(席爱民)	24.00	汽车使用性能与检测技术(高职)(郭彬)	22.00
运动控制系统(高职)(尚丽)	26.00	汽车电工电子技术(高职)(黄建华)	22.00
工程力学(项目式教学)(高职)	21.00	汽车电气设备与维修(高职)(李春明)	25.00
工程材料及应用(汪传生)	31.00	汽车空调(高职)(李祥峰)	16.00
工程实践训练基础(周桂莲)	18.00	现代汽车典型电控系统结构原理与故障诊断	25.00
工程制图(含习题集)(高职)(白福民)	33.00	~~~~~其 他 类~~~~~	
工程制图(含习题集)(周明贵)	36.00	移动地理信息系统开发技术(李斌兵)(研究生)	35.00
现代工程制图(含习题集)(朱效波)	48.00	地理信息系统及 3S 空间信息技术(韦娟)	18.00
现代设计方法(曹岩)	20.00	管理学(刘颖民)	29.00
液压与气压传动(刘军营)	34.00	西方哲学的智慧(常新)	39.00
液压与气压传动案例教程(高职)(梁洪洁)	20.00	实用英语口语教程(含光盘)(吕允康)	22.00
先进制造技术(高职)(孙燕华)	16.00	高等数学(高职)(徐文智)	23.00
机电一体化控制技术与系统(计时鸣)	33.00	电子信息类专业英语(高职)(汤艳)	20.00
机械原理(朱龙英)	27.00	高等教育学新探(杜希民)(研究生)	36.00
机械设计(王宁侠)	36.00	国际贸易实务(谭大林)(高职)	24.00
机械 CAD/CAM(葛友华)	20.00	国际贸易理论与实务(鲁丹萍)(高职)	27.00
画法几何与机械制图(叶琳)	35.00	电子商务与物流(燕春蓉)	21.00
机械制图与 CAD(含习题集)(杜淑辛)	59.00	市场营销与市场调查技术(康晓玲)	25.00
机械设备制造技术(高职)(柳青松)	33.00	技术创业: 企业组织设计与团队建设(邓俊荣)	24.00
机械制造技术实训教程(高职)(黄雨田)	23.00	技术创业: 创业者与创业战略(马鸣箫)	20.00
机械制造基础(周桂莲)	21.00	技术创业: 技术项目评价与选择(杜跃平)	20.00
特种加工(高职)(杨武成)	20.00	技术创业: 商务谈判与推销技术(王林雪)	25.00
数控加工进阶教程(张立新)	30.00	技术创业: 知识产权理论与实务(王品华)	28.00
数控加工工艺学(任同)	29.00	技术创业: 新创企业融资与理财(张蔚虹)	25.00
数控机床电气控制(高职)(姚勇刚)	21.00	计算方法及其 MATLAB 实现(杨志明)(高职)	28.00
机床电器与 PLC(高职)(李伟)	14.00	网络金融与应用(高职)	20.00
电机与电气控制(高职)(冉文)	23.00	网络营销(王少华)	21.00
电机安装维护与故障处理(高职)(张桂金)	18.00	网络营销理论与实务(高职)(宋沛军)	33.00
供配电技术(高职)(杨洋)	25.00	企划设计与企划书写作(高职)(李红薇)	23.00
模具制造技术(高职)(刘航)	24.00	现代公关礼仪(高职)(王剑)	30.00
塑料成型模具设计(高职)(单小根)	37.00	布艺折叠花(中职)(赵彤凤)	25.00

欢迎来函来电索取本社书目和教材介绍! 通信地址: 西安市太白南路 2 号 西安电子科技大学出版社发行部  
 邮政编码: 710071 邮购业务电话: (029)88201467 传真电话: (029)88213675。

# 目 录

## 第一部分 基础知识

第 1 章 数字调制.....	3
1.1 非连续相位的角度调制.....	3
1.1.1 FSK 信号的仿真.....	3
1.1.2 PSK 信号的仿真.....	14
1.2 连续相位的角度调制.....	22
1.3 正交幅度调制.....	29
第 2 章 发送滤波器.....	32
2.1 概论.....	32
2.2 升余弦脉冲滤波器.....	33
2.3 平方根升余弦滤波器.....	41
2.4 高斯滤波器.....	46
第 3 章 通信信号的测量与表达.....	51
3.1 通信仿真中常用的信号测量模块.....	51
3.1.1 Simulink 基本模块中的 Sinks 子库简介.....	51
3.1.2 Simulink 通信工具箱中的 Comm Sinks 子库简介.....	52
3.1.3 Simulink 信号处理工具箱中的 Signal Processing Sinks 子库简介.....	53
3.2 信号的测量.....	62
3.2.1 窄带随机信号的产生和波形测量.....	62
3.2.2 各种信号的表示和测量.....	63
3.3 差错控制传输特性的测量与表达.....	72
3.3.1 线性码.....	73
3.3.2 循环码.....	75
3.3.3 里德-索洛蒙码.....	77
3.3.4 卷积码.....	80
3.3.5 汉明码.....	82
3.3.6 BCH 码.....	84
3.3.7 循环冗余码.....	85
3.4 信号统计参数的测量.....	86
3.4.1 统计模块库.....	86
3.4.2 概率密度函数.....	87
3.4.3 瑞利衰落信道的仿真测试.....	89
3.4.4 图像的灰度直方图.....	90

3.5 图像和视频信号的测量与表达 .....	92
3.5.1 模块库 .....	92
3.5.2 图像的读出与显示 .....	93
3.5.3 图像加噪与滤波 .....	94
3.5.4 图像的二维变换与反变换 .....	96
3.5.5 图像有损压缩 .....	97

## 第二部分 常用无线电通信系统

<b>第4章 公众移动通信系统</b> .....	101
4.1 公众通信系统概述 .....	101
4.1.1 最早期的移动通信系统 .....	101
4.1.2 第1代移动通信系统 .....	102
4.1.3 第2代移动通信系统 .....	102
4.1.4 第2.5代移动通信系统 .....	104
4.1.5 第3代移动通信系统 .....	106
4.1.6 第4代移动通信系统 .....	108
4.2 GSM 全球移动通信系统 .....	109
4.3 CDPD 蜂窝数字分组数据网 .....	111
4.4 NADC 北美数字蜂窝网 .....	113
4.5 PDC 个人数字蜂窝电话 .....	114
4.6 CDMA IS-95 码分多址通信系统 .....	117
4.7 CT-2 第2代无绳电话系统 .....	118
4.8 数字增强型无绳通信标准 .....	120
4.9 PHS 个人手持式电话系统 .....	122
<b>第5章 专用移动通信系统</b> .....	124
5.1 集群通信系统 .....	124
5.2 APCO 数字集群通信系统 .....	125
5.3 TETRA 欧洲数字集群通信系统 .....	127
5.4 TETS 地面航空电话系统 .....	129
<b>第6章 卫星通信系统</b> .....	131
6.1 铱星系统 .....	131
6.2 美国 ICO 卫星通信系统 .....	133
6.3 甚小孔径终端卫星通信系统 .....	135

## 第三部分 新技术与 3G

<b>第7章 新技术</b> .....	141
7.1 扩频 .....	141
7.2 多元扩频 .....	144

7.3 跳频.....	146
7.4 正交多载波调制 OFDM.....	150
<b>第 8 章 3G 系统</b> .....	<b>152</b>
8.1 WCDMA 码分多址通信系统.....	152
8.2 CDMA2000 码分多址通信系统 .....	157

## 第四部分 无线接入系统与数字电视

<b>第 9 章 无线接入系统</b> .....	<b>165</b>
9.1 蓝牙系统 BLUE TOOTH.....	165
9.2 无线局域网 HiperLAN2.....	169
9.3 无线局域网 802.11 标准.....	174
<b>第 10 章 数字电视系统</b> .....	<b>179</b>
10.1 数字电视广播系统.....	179
10.2 卫星广播系统.....	182

## 第五部分 天线与射频技术

<b>第 11 章 天线</b> .....	<b>187</b>
11.1 天线方向图.....	187
11.2 均匀直线阵的波束扫描.....	187
11.3 均匀圆形阵的波束扫描.....	189
11.4 非均匀直线阵的波达方向估计.....	192
11.4.1 Capon 法 .....	194
11.4.2 Music 法.....	195
<b>第 12 章 射频</b> .....	<b>196</b>
12.1 波导.....	196
12.2 传输线.....	198
12.3 滤波器.....	205
<b>参考文献</b> .....	<b>207</b>

# 第一部分



## 基础知识



# 第1章 数字调制

## 1.1 非连续相位的角度调制

角度调制包含频率调制和相位调制两种。对于数字调制而言,基本的频率调制方法是频移键控(FSK),而基本的相位调制方法称为相移键控(PSK)。现代无线电通信系统中,实用的数字信号角度调制方法均是在这两种基本数字调制方法的基础上改进而来的,如多元频移键控(M-FSK)、多元相移键控(M-PSK)、最小频移键控(MSK)、偏移相移键控(OPSK)、差分相移键控(DPSK)、高斯最小频移键控(GMSK)等。

依据角度调制波形在码元相邻位置的相位变化情况,可以将角度调制分为非连续相位的角度调制和连续相位的角度调制两种。

### 1.1.1 FSK 信号的仿真

非连续相位的2元频移键控(BFSK, Binary Frequency-Shift Keying)调制在基带二进制数码的控制下,调制输出两个频率相异的正弦波。由于没有相位连续限制条件,相邻码元间的波形可能产生跳变,这将引起较大的频谱旁瓣。

BFSK 的调制指数  $h$  定义为

$$h = \frac{|f_2 - f_1|}{R_b} \quad (1-1)$$

式中,  $f_1$ 、 $f_2$  为两个键控输出频率(Hz),  $R_b$  为基带传输速率(b/s)。设二进制基带数码的码元周期为  $T_s$ , 则基带传输速率为码元周期的倒数,即  $R_b = 1/T_s$ 。

Simulink 中的 FSK 调制和解调模块分别为“M-FSK Modulator Baseband”和“M-FSK Demodulator Baseband”。这两个模块是等效低通信号模型。通过设置模块参数,可以修改调制的元数  $M$ 、调制输出波形相位是否连续、输出相邻键控频率间隔等参数。

下面对非连续相位的2元频移键控调制的输出频谱进行仿真,以说明 BFSK 的调制指数与频谱形状的关系。

设基带数码是二进制的( $M$  取 2), 数码率为 1 kb/s, BFSK 的键控频率间隔分别为 500 Hz、750 Hz 以及 1500 Hz。对应的调频调制指数分别是 0.5、0.75 和 1.5, 该仿真模型如图 1-1 所示。模型中, 要求信源模块“Random Integer”随机地产生整数 0 或 1, 速率为 1000 b/s, 故设置其输出元数  $M$  为 2, 采样时间间隔为  $1 \times 10^{-3}$  s^①, 随机数种子可取任意整数。三个 FSK 调

① MATLAB 中带数量级描述的规则是 1/(1e3)或 1e-3, 等同于  $1 \times 10^{-3}$ , 前两种方式在 MATLAB 中均可识别, 当然,  $1 \times 10^{-3}$  更符合文字表达。

制模块的参数设置为：调制元数  $M$  为 2，相位连续性设置为不连续的调制模式。每个符号期间采样数设为 50，这样对 FSK 调制输出信号的采样率就是 50 kHz，其频谱分析的宽度可达到 25 kHz。相邻频率间隔分别设为 500 Hz、750 Hz 以及 1500 Hz。

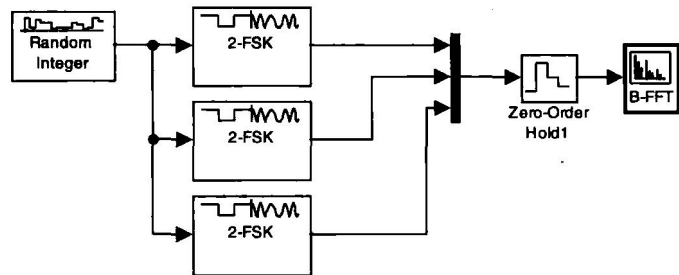


图 1-1 非连续相位的 2 元频移键控调制的频谱测量仿真模型(SCHX1_1.mdl)

FSK 信号带宽可以估算为调制输出频率间隔与基带比特率之和，即

$$B=f_2-f_1+R_b \tag{1-2}$$

可知，FSK 调制输出信号的能量频带集中在带宽为 2.5 kHz 范围内。为了观察到这段频谱，可设计频谱仪的频率观测范围，也可在频谱仪之前接入一个零阶保持器作为降采样器，从而将 FSK 输出信号的采样率降低至  $F_s=4000$  Hz(零阶保持器采样时间间隔为  $2.5\times 10^{-4}$  s)。这样，观测频谱(功率密度谱)范围为  $\pm 2000$  Hz。注意，MATLAB 的 Simulink 仿真中的频谱仪应用的是数字信号处理中的快速傅里叶变换技术，采样速率为  $F_s$ ，频谱显示范围可以是  $\pm F_s/2$ ，或者是  $0\sim F_s$ 。频谱显示刻度设置为线性的(显示坐标属性中的幅度刻度选择为 Magnitude-squared)。

执行仿真，结果如图 1-2 所示。从仿真频谱结果看，在键控的两个频率位置(如  $\pm 250$  Hz、 $\pm 375$  Hz 以及  $\pm 750$  Hz 处)存在线谱，表示在这些频率位置上存在正弦波分量，而在这些频率附近，则存在连续谱。在线性刻度下，这些连续谱分量相对于线谱分量显得很小，显示不明显。在工程上，一般采用对数刻度(分贝 dB)显示信号的功率谱，这样连续谱成分将可以被很清楚地表达出来。

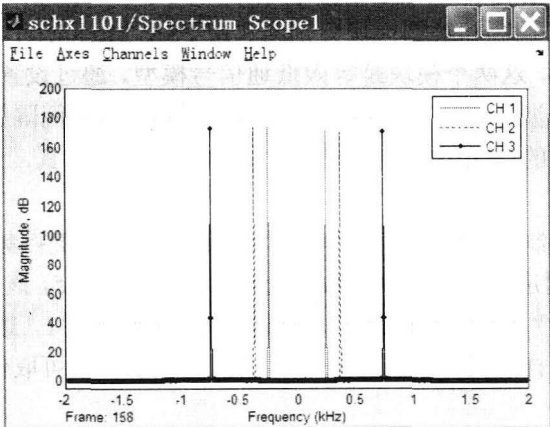


图 1-2 调制指数不同的 FSK 信号的频谱图(线性刻度)



修改系统模型中的频谱仪显示参数,将显示坐标属性中的幅度刻度选择为“dB”,保存为“SCHX1_1.mdl”,执行仿真,就得到了对数刻度的功率密度频谱,如图 1-3 所示。从图中可以实测出 FSK 信号的带宽。通道 1 的频率间隔为 500 Hz 的 FSK,理论带宽为 1500 Hz,实测 3 dB 带宽(从图 1-3 中观测通道 1 显示的连续谱从最大值下降了 3 dB 的那个功率谱范围)约为 1500 Hz,通道 2 的频率间隔为 750 Hz 的 FSK,理论带宽为 1750 Hz,实测 3 dB 带宽比通道 1 的输出略宽一些。随着调制频率间隔的增加(调频调制指数也增加),调制输出信号的频带逐渐增加,并呈现出双峰状态,如图中通道 3 的信号频谱那样。

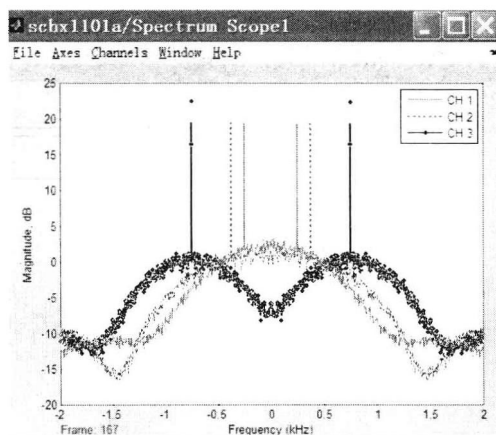


图 1-3 调制指数不同的 FSK 信号的频谱图(分贝刻度)

相位非连续的 FSK 信号虽然产生方式简单,例如采用电子开关,在基带数码的控制下在两个独立的频率源之间选择输出即可,但其频谱性能却很差,不适宜无线电传输。这是因为:第一,由于相位不连续,在传输码元跳变时刻输出信号波形会造成跳变,频谱上表现为高频分量增加,调制输出信号带宽增大,对邻近信道的干扰(称为邻道干扰)也就会增加。第二,由于键控信号源之间是独立的,在各自输出频率点上存在着恒定相位的正弦波成分,这些正弦波由于相位相同,不会相互抵消,因此在频谱上表现为线谱成分。由于线谱不携带传输信息(线谱对应的正弦波是确定信号,没有随机性,故没有携带信息量),因此传输线谱是能量的浪费,同时,也增大了对其他通信设备的干扰,破坏了传输信号的隐蔽性。

为了了解调制信号相位连续性对输出功率谱的影响,观察图 1-4 所示的仿真系统。该系统有两个 BFSK 调制器,输入数码率仍然为 1000 b/s,键控频率间隔为 750 Hz(调制指数为 0.75),通道 1 上的调制器设置为相位不连续模式,通道 2 上设置为相位连续模式,其余参数同图 1-1 所示的模型一样。

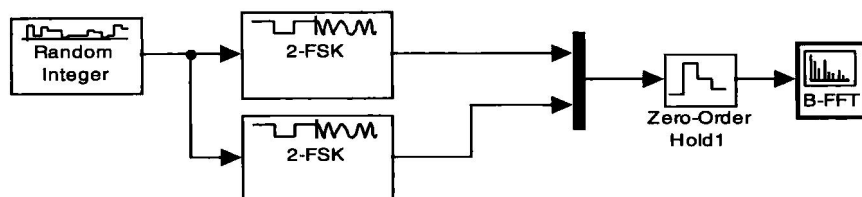


图 1-4 相位连续性对频移键控输出功率谱影响的测试模型(SCHX1_4.mdl)