

Linear Time Invariant
Single Side Band Modulation

Low Density Parity Check

Shannon Limit
Channel Capacity

Beauty of Communications

通信之美

Digital Subscriber Line

IMT-2020

Signal-to-Noise Ratio

Linear Block Codes

张力 编著

Beauty of
Communications

通信之美

张力 编著

電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京•BEIJING

内 容 简 介

与很多技术类书籍不同的是,本书不是简单地罗列知识点和代码,而是以专题的形式,由浅入深地讲解通信和信号处理相关的专业知识。本书在深入浅出的基础上,也力求保持数学的严谨性,带领读者一路探究通信原理中那些不为人知的奥秘,从而让读者体验到理论联系实际的畅快。

全书分为两部分:理论篇和实战篇。其中理论篇讲述了通信和信号处理相关的特定知识点,并附上一些高质量代码。实战篇则以 MATLAB 为平台,介绍了如何在通信系统仿真的过程中充分利用 MATLAB 进行高效编程、并行计算,以及进行 MATLAB 与 C、C++的混合编程。

全书的大部分内容都是密切围绕系统设计中要解决的技术问题而展开的。无论是用于自我提升技术水平和拓展视野,还是用于具体指导系统设计,本书都是非常值得研读的精品。本书可作为通信和信号处理相关专业的本科生及研究生的教辅书,也可作为从业技术人员的参考资料。

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

通信之美 / 张力编著. —北京:电子工业出版社, 2016.9
ISBN 978-7-121-29856-1

I. ①通… II. ①张… III. ①通信系统 IV. ①TN914

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 211974 号

策划编辑:张国霞

责任编辑:徐津平

印 刷:中国电影出版社印刷厂

装 订:三河市良远印务有限公司

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:787×980 1/16 印张:18.25 字数:375 千字

版 次:2016 年 9 月第 1 版

印 次:2016 年 9 月第 1 次印刷

印 数:3000 册 定价:69.00 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, 88258888。

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

本书咨询联系方式:010-51260888-819 faq@phei.com.cn。



推荐语

作者张力，以自己平时的研究经历为基础，对自己曾经遇到的问题深入思考后加以整理，并以深入浅出的语言，在本书中描述了相关通信技术背后的数学原理。同时，该书并不仅仅局限于通信理论，而是很好地将通信理论与 MATLAB 仿真结合起来，能方便读者加深理解。

——《通信新读》作者 陈小锋

《通信之美》将 MATLAB 与通信技术完美地结合起来，在通信中学习仿真，在仿真中强化通信理论。与一般 MATLAB 书籍不同的是，该书详细介绍了如何在通信物理层仿真中运用 MATLAB 高效编程、并行计算，以及与 C、C++混合编程以提高仿真效率，不愧为广大学生学习通信理论与仿真实践的有效工具书，也是老师们进行相关课程教学的黄金参考资料。

——ARM 亚太大学计划经理、前 MathWorks 教育业务发展总监 陈炜

前言

从上大学开始，笔者所学的专业便是通信工程。之后又经历了3年读研和3年工作，到今天正好10年。可以说，在这10年之中，笔者从未离开过通信领域一天。由于通信技术涉及非常广泛和复杂的数学理论，所以在学习和工作的过程中，笔者遇到了很多问题，翻遍书本也找不到答案，无奈之下只有钻牛角尖。还好，很多问题的答案都通过自己的不懈努力找到了。本书便记录了这些问题及相应的思考过程，希望通过本书将这些分享给大家。

在思考的过程中，笔者查阅了大量书籍和文献，深刻领悟到了前辈们严谨治学的态度，也感觉到了数学的重要性。所以本书在深入浅出的基础上，也力求保持数学的严谨性。本书可作为本科生及研究生的参考书籍，也可作为从事通信产品开发工作的工程师的技术参考手册。

感谢电子工业出版社的编辑张国霞，没有您的慧眼，本书的出版便无从谈起。感谢好友姜帆为本书审稿，也感谢陈琳为本书的漫画配图。感谢笔者的硕士生导师林水生教授，正是因为您的严格要求，笔者在读研期间形成的良好习惯让自己终生受益。最后感谢笔者的父母，正是因为你们的无私奉献和默默支持，才有了今天的张力。

由于时间紧迫、知识有限，在编写的过程中难免存在不妥之处，恳请读者批评指正。

仿真用到的软硬件参数

- ◎ CPU: Intel Core i5 2520M, 双核四线程, 主频 2.5GHz, 可超频到 3.2GHz。
- ◎ RAM: DDR3 1600MHz 16GB。

- ◎ 操作系统：Windows 7（64-bit）。
- ◎ MATLAB 版本：R2016a（文中凡是涉及 MATLAB 安装路径的，都用 MATLABRoot\ 表示）。

本书提供配套程序下载，下载地址为 <http://www.broadview.com.cn/29856>。

目 录

理论篇

第 1 章 线性时不变——通信系统的基石 2

1.1 LTI 系统.....	3
1.2 非 LTI 系统存在的意义.....	7
1.2.1 时变系统的 MATLAB 仿真.....	9
1.2.2 非线性系统的 MATLAB 仿真.....	12
1.3 总结.....	13
1.4 参考程序.....	14

第 2 章 五花八门的通信标准 15

2.1 有线通信.....	16
2.1.1 xDSL	16
2.1.2 IEEE 802.3 (Ethernet)	17
2.1.3 HomePlug.....	18

2.2 无线通信.....	20
2.2.1 蜂窝通信.....	20
2.2.2 IEEE 802.11 (Wi-Fi)	27
第 3 章 为什么通信标准中不采用单边带调制	30
3.1 SSB 调制的原理.....	31
3.2 采用 SSB 调制的前提条件.....	32
3.3 发散思维 (一) ——ASK+SSB 模式可行吗	37
3.4 发散思维 (二) ——三维 QAM 可行吗	39
第 4 章 被误解的最大似然——算法与准则的区别和联系	41
4.1 穷举法.....	42
4.2 优化算法 (一)	44
4.3 优化算法 (二)	59
4.4 对三种算法复杂度的比较	66
4.5 原来 ML 可以不复杂.....	71
4.6 发散思维 (一) ——硬件设计	71
4.7 发散思维 (二) ——软解调.....	73
4.8 参考程序.....	74
第 5 章 定点仿真——定点方案未必为真	75
5.1 问题所在.....	76
5.2 解决方案.....	77

5.3 博弈：绝不溢出 vs 很小可能溢出	78
5.3.1 做不到	78
5.3.2 没必要	78
5.3.3 折中——产业界永恒不变的主题	79
5.4 建模误差——让定点方案误入歧途	79
5.5 答在之后：你选择好了么	82
5.6 参考程序	82

第 6 章 信噪比中的玄机—— E_b/N_0 、 E_s/N_0 和 S/N 三者的关系 83

6.1 E_b/N_0 与 E_s/N_0 的单位	84
6.2 E_b/N_0 与 E_s/N_0 的关系	84
6.3 E_s/N_0 与 S/N 的关系	85
6.3.1 复基带信号通过 AWGN	86
6.3.2 过采样的信号通过 AWGN	91
6.3.3 实带通信号通过 AWGN	94
6.3.4 AWGN 模块对实基带信号的处理	97
6.4 加入所有因素的仿真	100
6.5 参考程序	105

第 7 章 OFDM 技术如何抵抗多径衰落 106

7.1 理想定时同步情况下的推导	109
7.2 定时同步不准造成的影响	115
7.2.1 向前偏差 1 个采样点	115
7.2.2 向前偏差 n_0 个采样点	116

7.3 参考程序.....	117
---------------	-----

第 8 章 当概率遇上复数时 119

8.1 对 AWGN 进行 DFT 之后的统计分析.....	119
8.2 从随机信号到随机变量.....	127
8.3 发散思维——量子概率.....	127
8.4 参考程序.....	128

第 9 章 深入浅出线性分组码 129

9.1 线性分组码的概念.....	131
9.2 生成矩阵的基本特性.....	132
9.3 校验矩阵的基本特性.....	133
9.4 参考程序.....	139

第 10 章 熟悉又陌生的信道容量与香农限 140

10.1 信道容量.....	141
10.1.1 AWGN 波形信道.....	141
10.1.2 BSC 信道.....	142
10.1.3 BI-AWGN 信道.....	145
10.2 香农限.....	146
10.2.1 码率和误比特率都趋于 0 时的香农限.....	147
10.2.2 非零码率、误比特率为 0 时的香农限.....	152
10.2.3 非零码率、非零误比特率下的香农限.....	156

10.2.4 码长对香农限的影响	158
10.2.5 码的类别对香农限的影响	161
10.3 参考程序	162

实战篇

第 11 章 MATLAB 高效编程 164

11.1 何为好程序	164
11.2 利用 profile 评估运行时间	166
11.3 预分配内存	167
11.4 列优先准则	169
11.5 向量化编程 vs 循环加速	174
11.6 使用稀疏矩阵	186
11.7 选择恰当的数据类型	186
11.8 选择恰当的函数类型	189
11.9 可提高开发效率的函数	190
11.9.1 arrayfun 和 cellfun 函数	190
11.9.2 bsxfun 函数	193
11.10 参考程序	194

第 12 章 MATLAB 并行编程——parfor 并行结构 195

12.1 为什么要仿真	195
12.2 并行问题的由来——从抛硬币说起	196

12.3	能够并行运行的条件	197
12.4	MATLAB 并行池的打开与关闭	198
12.5	MATLAB 并行工作的原理	198
12.6	在 MATLAB 中编写并行程序	200
12.7	parfor 循环中的变量类型	201
12.7.1	循环变量	202
12.7.2	分段变量	203
12.7.3	广播变量	208
12.7.4	临时变量	208
12.8	简约操作与简约变量	209
12.8.1	MATLAB built-in 简约操作规范	212
12.8.2	用户自定义的简约操作规范	213
12.9	并行编程之优化	221
12.10	并行编程之调试	223
12.11	其他 MATLAB 并行编程	226
12.12	参考程序	226

第 13 章 MATLAB 与 C、C++混合编程——MEX 文件 228

13.1	MATLAB 编译器的安装及设置	229
13.2	MATLAB 中调用 MEX 文件的实例	230
13.3	MEX 文件结构说明	234
13.4	编译 MEX 文件的常用选项	235
13.5	MATLAB 与 C、C++的接口数据类型	236
13.6	创建 MATLAB 矩阵 mxArray 的 mx 函数	239

13.7	对 MATLAB 矩阵 mxArray 的读写操作	241
13.8	对 mxArray 矩阵维数的操作	243
13.9	对 mxArray 矩阵索引号的操作	245
13.10	运行结果分析	246
13.11	C、C++语言，快者恒快吗	247
13.12	MEX 文件的调试	249
13.13	参考程序	251
附录 A 星座映射归一化系数的计算		252
附录 B 带通随机信号的功率谱密度		256
附录 C OFDM 峰值的分布特性		258
C.1	取得最大值的概率	258
C.2	OFDM 符号 PAPR 特性	262
附录 D 802.11ac 中 LDPC 码的校验矩阵		265
附录 E 不同类型信道的信道容量		270
E.1	AWGN 波形信道	272
E.2	BSC 信道	275
E.3	BI-AWGN 信道	275
参考文献		278

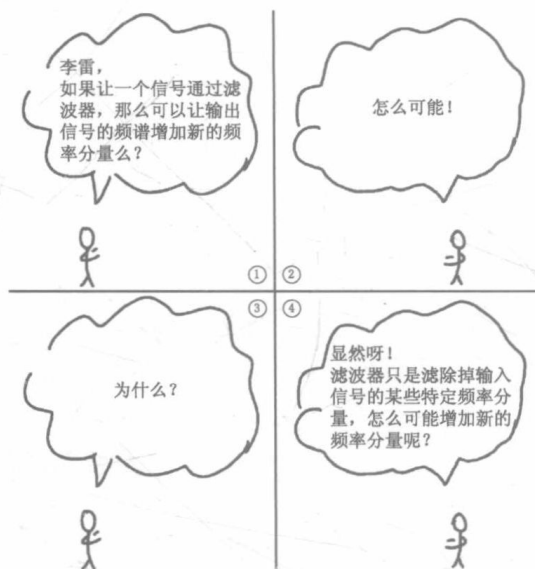
理 论 篇

第1章

线性时不变——通信系统的基石

时间是什么？没人问我，我很清楚，一旦被问起，我便茫然。

——圣奥古斯汀《忏悔录》



仔细分析上面的对话，李雷的解释貌似很牵强，那么有没有更严谨的理论解释？答案其实很简单：只要是系数不变的滤波器，则其必然属于线性时不变（Linear Time Invariant, LTI）系统。而信号与系统理论中有一个基本的定理：任何线性时不变系统都不会产生新的频率分量。且看下面的详细分析。

1.1 LTI 系统

对于任意一个 LTI 系统，其输出 $y[n]$ 可表示为输入 $x[n]$ 和系统的冲激响应 $h[n]$ 的卷积。

$$\begin{aligned}
 y[n] &= \sum_{k=-\infty}^{+\infty} h[k] x[n-k] \\
 &= \sum_{k=-\infty}^{+\infty} h[k] \int_{-\infty}^{+\infty} X(e^{j\omega}) e^{j\omega(n-k)} d\omega \\
 &= \int_{-\infty}^{+\infty} X(e^{j\omega}) e^{j\omega n} \left(\sum_{k=-\infty}^{+\infty} h[k] e^{-j\omega k} \right) d\omega \\
 &= \int_{-\infty}^{+\infty} \underbrace{H(e^{j\omega})}_{\text{gain at frequency point } \omega} X(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega
 \end{aligned} \tag{1-1}$$

可以看到，通过系统 $h[n]$ 后，输入信号 $x[n]$ 的所有频率分量都有了一个增益，该增益是频率 ω 的函数。显然，如果输入信号 $x[n]$ 的频谱 $X(e^{j\omega})$ 没有某部分的频率分量，那么不管 $H(e^{j\omega})$ 的值有多大，也不可能输出信号 $y[n]$ 中包含该部分频率分量。该结论在频域更容易证明，即大家非常熟悉的 $Y(e^{j\omega}) = X(e^{j\omega})H(e^{j\omega})$ ，证明如下：

$$\begin{aligned}
 Y(e^{j\omega}) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} y[n] e^{-j\omega n} \\
 &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] \cdot h[n] e^{-j\omega n} \\
 &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} x[n-m] h[m] e^{-j\omega n} \\
 &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} h[m] \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n-m] e^{-j\omega n} \\
 &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} h[m] \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] e^{-j\omega(m+k)}
 \end{aligned} \tag{1-2}$$

$$\begin{aligned}
 &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} h[m] e^{-j\omega m} \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] e^{-j\omega k} \\
 &= H(e^{j\omega}) X(e^{j\omega})
 \end{aligned}$$

即只要输入信号的频谱在某个频段内为 0，那么不管系统的频率响应在这个频段内如何大，输出信号的频谱在这个频段内也一定为 0。因为 0 乘以任何数都等于 0，就这么简单！

接下来，再仔细考虑这句话：任何线性时不变系统都不可能产生新的频率分量。也就是说，不产生新的频率分量是有前提的：该系统必须是线性时不变的。那么，什么叫线性时不变？

奥本海默所著的《信号与系统（第 2 版）》用整整一章详细描述了 LTI 系统及基于 LTI 系统的卷积，对于一个系统是否是 LTI 系统，给出了相应的判断方法。

- ⊙ 线性：如果某个输入是由几个信号的加权和组成的，那么输出也是系统对这组信号中每个分量的响应的加权和。即：如果 $x_1(t)$ 通过这个系统的输出是 $y_1(t)$ ， $x_2(t)$ 通过这个系统的输出是 $y_2(t)$ ，那么 $\alpha x_1(t) + \beta x_2(t)$ 的输出是 $\alpha y_1(t) + \beta y_2(t)$ 。
- ⊙ 时不变：如果系统的响应不随时间改变，那么该系统就是时不变的。更具体地说，就是如果在输入信号上有一个时移，而输出信号产生同样的时移，那么这个系统就是时不变的。即：如果 $x(t)$ 通过这个系统的输出是 $y(t)$ ，那么 $x(t-t_0)$ 通过这个系统的输出是 $y(t-t_0)$ 。

以上两个命题是可逆的，是充分必要的关系。面对如此简洁明了的描述，各位读者不觉得很美么？

用更直白的话来说，线性意味着任何一个系统，当把输入变为原来的 n 倍时，其输出也变为原来的 n 倍；当把输入叠加上另一个信号时，其输出也变为原来的输出加上叠加信号单独输入时所对应的输出。时不变意味着如果在某个时刻给系统一个激励，那么在其他任意时刻给其相同的激励，其输出仍然不变。

在前面关于“任何线性时不变（LTI）系统都不可能产生新的频率分量”的证明中，我们用到了卷积和傅里叶变换。那么什么叫卷积？为什么会有卷积这种类型的运算呢？

《信号与系统（第 2 版）》中先是给出了一般离散时间系统（Discrete-time System）的输入、输出关系：