



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

通信原理

黄载禄 殷蔚华 黄本雄 编著



科学出版社
www.sciencep.com

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

通信原理

黄载禄 殷蔚华 黄本雄 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以有线通信和无线通信为背景,介绍通信系统和设备的基本概念、原理和技术。本书的章节体系与通信系统的功能模块划分基本一致,其主要章节有信道、信源编码、信道复用、模拟信号的调制与解调、数字信号调制、信号检测、信道编码、扩频通信原理和同步系统等。本书的论述密切联系当前的通信系统实际,结合了现代通信的主要技术,全书的内容和章节体系结构较完整。

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,适用于电子信息工程和通信工程等专业,也可供相关领域的科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

通信原理/黄载禄等编著. —北京:科学出版社,2007

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-03-018453-5

I. 通… II. 黄… III. 通信理论-高等学校-教材 IV. TN911

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第005679号

责任编辑:马长芳 / 文案编辑:潘继敏 / 责任校对:赵燕珍

责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年2月第一版 开本:B5(720×1000)

2007年2月第一次印刷 印张:44 1/2

印数:1—4 000 字数:850 000

定价:52.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换<路通>)

前 言

进入 21 世纪,通信技术也进入了一个新的发展时期,这一新时期的主要特征是:以移动通信为代表的无线通信将进一步发展和普及;无线局域网、高速无线接入网、移动 IP 网将成为信息网络化的主要形式,随时随地,上网无线,将成为互联网时代的主要特征;语音、数据和视频都将能通过无线网络畅通传输,实现了无线网络的多媒体化。这就是现在正在发生或者说今后几年将要发生的事情。面对这一情况,我国普通高等学校通信工程和电子信息工程类专业的通信原理课程的教学内容应如何选取,教材的章节应如何组织,这就是本书作者在编写这本通信原理教材时反复思考的问题。

一、关于教材章节的组织

有两种组织通信原理教材章节的方式:一种是按信号传输流程组织,例如,模拟信号的数字传输、数字信号的频带传输等,以信号传输为线索,串行讲述,即讲完调制就讲解调、同步和分析性能等。以前国内多数教材是按这一模式编写的。其优点是可以有一个信号传输系统作背景,便于较快建立系统概念。在 20 世纪 90 年代以前,通信网络还不十分发达,通信多是以点对点的形式进行,那时按信号传输流程编写教材比较符合当时的通信技术的发展状况。但是到 20 世纪 90 年代以后,通信进入了网络化时代,设备种类繁多,通信体制多样,很难以某一种或几种信号的传输过程来概括当前通信的主要技术。因而按信号传输流程的串行方式来编写教材的缺点就显现了出来,不少新的内容很难组织到原有的教材体系中去;因而本书开始考虑另一种组织教材的方式,这就是依照通信的理论体系,采用并行的方式来组织教材,这一理论体系即是按现代通信系统的功能模块来划分教材的章节。这一方式的优点是便于将不同的通信设备中的同一类模块所采用的新技术组织到一章或一节中去,可以把原理讲的比较清楚;缺点是要等各主要模块都学习过之后才能建立起系统的概念。由于这一组织方式是从宏观上去组织各章节的内容,因而可以建立更加开阔的视野。本书主要按照第二种方式来编写,但模拟通信一章仍将按第一种方式编写。

二、关于内容的选取

根据通信的上述变化,本书作者在内容选取上有如下考虑:① 有线通信和无线通信相比,无线通信技术更复杂,应用更广泛,因而本书主要以无线通信系统为背景选取各章节中的主要内容;② 在无线通信各类系统中,移动通信最具典型性,也是近 20 年来影响最深远的一类通信系统体制,因而对于移动通信系统所涉及的原理、技术应成为本书各章内容选取时的主要领域;③ 调制与检测相比,检测技术

更复杂,编码与译码相比,译码技术更复杂,因而在章节内容安排方面,检测和译码与原有教材相比给予了更多的关注;④ 通信原理是专业基础课,是设计和研究通信系统的理论基础,理论要联系通信系统设备的实际,要为通信系统中的指标、参数计算提供指南。基于上述考虑,本书在主要章节的内容方面作了如下安排:

在信道方面,介绍了恒参信道与变参信道。考虑到移动通信信道属变参信道(又称多径衰落信道),同时在移动通信(GSM 和 CDMA)系统中采取的很多技术措施都与变参信道的特征有关,因而书中对变参信道的介绍较一般教材多。同时在信道这一章中还着重介绍了信噪比的计算,这是所有通信系统设计时都需要分析计算的参数。

在编码理论方面书中安排了两章:信源编码与信道编码,这是因为两类编码的目的完全不同。信源编码的目的是降低数据率,即减少冗余;而信道编码则不同,信道编码是为了提高数据传输的可靠性,或者说是减少差错,因而信道编码的基本方法是加入校验位(即增加冗余)。本书在信源编码方面,介绍了波形编码与参量编码。波形编码技术成熟,主要在固定电话等通信系统中采用,参量编码主要在移动通信系统中采用。为了实现参量编码,就需要掌握矢量量化的概念与算法。同时,考虑到通信对视频传输需求增长,因而在信源编码一章中也介绍了视频编码的主要规范和所采用的技术。信道编码的内容较多,书中除介绍常用信道编码外,也介绍了一些新的信道编码技术,此外对于译码给予了比传统教材较多的关注,如介绍了软判决、硬判决的译码性能等。

在调制理论方面,本书安排了两章,模拟信号的调制与解调和数字信号调制,内容侧重于效率高的、频带利用率好的调制制度,如正交调幅(MQAM)、MFSK、四相移键控(QPSK)等。此外单独安排了一章扩频通信原理。

关于信号检测理论,书中安排了两章,恒参信道的信号检测和变参信道的信号检测,并从信号检测的数学方法、基本理论入手展开讨论。将衰落信道中的信号检测独立安排一章的原因是衰落信道中的信号检测与恒参信道不同,它涉及信号的分集合并,增加了不少对接收信号的处理工作量。

三、关于本书的篇幅

多数学校通信原理课程的课堂教学学时数一般都在 64 学时左右。那么是严格根据学时数来安排本书的篇幅,还是要考虑通信技术架构的完整性? 本书采取了后者。因而本书的篇幅比传统教材稍多。这样考虑的原因是:① 通信原理是大学本科高年级的课程,学生一般已具备了自学能力;② 通信原理是学生了解通信技术、建立系统概念的综合性、基础性课程,教材上有的章节,虽然课堂上未讲,但仍会帮助他们建立起一个知识的构架,这个构架会在他们需要的时候发挥作用;③ 通信原理是建立在多门技术基础课之上的,它要用到很多先行课程的概念,尤其是随机过程理论;而有时先行课程并不是只针对通信原理的需要才安排的,这时需要在通信原理教材中作一点补充。本书的篇幅是在考虑到上述因素的情况下构建的。例如,

第二章随机变量与随机过程概要、第四章中关于图像编码、第九章中关于有记忆信号的检测、第十一章中关于衰落信道中的信号检测的相当一部分内容,以及第十四章通信系统、第十五章通信网等,这些都是可以不在课堂上讲授的章节,而是考虑建立通信系统的完整构架或补充先行课程的不足而安排的。上述章节和可以不在课堂讲授的某些章节中的部分内容在目录和书中均用“*”号标出。

本书由黄载禄、殷蔚华、黄本雄三人共同讨论编写,其中第十章由殷蔚华执笔,第十三章由黄本雄执笔,其余各章由黄载禄执笔。此外,华中科技大学通信原理教学小组的部分老师也参加了本书大纲的讨论制订;长江大学的余厚全教授对本书的编写十分关注,对章节内容、全书结构都提出了十分中肯的建议;还有华中科技大学的不少学生,包括博士生、硕士生与本科生对如何精选教学内容、修改教材也提出了不少好意见。本书作者对为本书编写工作做出了贡献的同事、同学和朋友表示衷心的感谢。

由于本书涉及通信中广泛的理论与技术,限于作者的水平,书中难免还有错误,敬请读者批评指正。

作 者

2006年11月于华中科技大学

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 信源、消息、信号与信息	1
1.3 通信系统模型	2
1.3.1 经典通信系统模型	2
1.3.2 现代通信系统的功能模型	2
1.4 通信技术的发展	4
1.4.1 通信技术发展大事记	4
1.4.2 促进通信技术发展的主要动因	4
1.5 通信原理课程内容及与其他课程的关系	5
1.6 通信系统概述	7
1.6.1 通信系统分类	7
1.6.2 无线通信系统的简化框图	8
1.6.3 通信系统的质量指标	10
1.7 计算机技术对通信系统发展的贡献	11
1.8 通信系统仿真	12
1.8.1 仿真研究的优点	12
1.8.2 仿真方法	12
1.8.3 仿真工具	13
思考题	14
习题	14
拓展学习题	15
*第二章 随机变量与随机过程概要	16
2.1 随机变量	16
2.1.1 随机事件与概率	16
2.1.2 概率分布和概率密度	18
2.1.3 随机变量的统计平均(数学期望)	23
2.1.4 随机变量的函数	26
2.1.5 随机变量的特征函数	29
2.1.6 通信中的几种常用概率分布	31

2.1.7 概率的上边界	42
2.1.8 中心极限定理	45
2.2 随机过程	49
2.2.1 平稳随机过程	49
2.2.2 功率密度谱	52
2.2.3 窄带平稳随机过程	53
2.2.4 随机信号通过线性时不变系统的响应	56
2.2.5 时间离散随机信号与系统响应	59
2.2.6 周期平稳过程	61
2.3 信号的相关与累积	62
思考题	64
习题	64
第三章 信道	69
3.1 信道的分类	69
3.2 有线信道	70
3.3 无线信道	72
3.4 恒参信道的链路计算	74
3.5 多径衰落信道	76
3.5.1 移动通信信号的衰落特性	76
3.5.2 多径衰落信道的路径损耗	76
3.5.3 多径衰落信号的统计特征	78
3.5.4 多径信道的统计描述	81
3.6 信道的加性噪声与信噪比计算	88
3.6.1 加性噪声	88
3.6.2 信噪比计算	90
3.7 信道容量与香农极限	96
思考题	97
习题	98
拓展学习题	103
第四章 信源编码	104
4.1 字符编码与码元	105
4.2 抽样定理	106
4.3 波形的量化	109
4.3.1 均匀量化	110
4.3.2 非均匀量化	112
4.4 语音的波形编码	118

4.4.1	脉冲编码调制	118
4.4.2	差分脉冲编码调制	123
4.4.3	增量调制	126
4.4.4	波形编码的极限问题	129
4.5	语音的参量编码	130
4.5.1	参量编码原理	130
4.5.2	语音参量编码的实现	131
4.5.3	低速率语音编码器	136
4.6	语音编码小结	139
* 4.7	图像编码	140
4.7.1	引言	140
4.7.2	图像压缩编码原理	141
4.7.3	图像压缩编码标准	141
思考题	.....	147
习题	.....	147
拓展学习题	.....	151
第五章	信道复用	152
5.1	引言	152
5.2	频分复用	154
5.2.1	有线载波群路标准	155
5.2.2	正交频分复用(OFDM)	155
5.3	时分复用	159
5.3.1	时分复用原理	159
5.3.2	时分复用的群路标准	160
5.3.3	PCM 基群的帧结构	160
5.3.4	数字复接终端机	163
5.3.5	异步时分复用(ATM)	163
* 5.3.6	光复接	164
5.4	移动通信的信道复用	165
5.4.1	移动通信的蜂窝结构	165
5.4.2	移动通信的网络结构	167
5.4.3	时分多址与码分多址	168
思考题	.....	172
习题	.....	172
拓展学习题	.....	173

第六章 数字基带信号的传输	174
6.1 引言	174
6.2 数字基带传输的常用码型	175
6.2.1 常用码的波形结构	175
6.2.2 基带传输系统的组成	179
6.2.3 基带码的功率谱分析	180
6.3 基带传输系统的波形设计	185
6.3.1 奈奎斯特准则:抽样值无失真	185
6.3.2 升余弦滚降信号	188
6.4 部分响应基带传输系统	190
6.5 眼图	194
6.6 均衡	195
6.6.1 均衡概述	195
6.6.2 频域均衡	196
6.6.3 信道均衡器	198
6.6.4 自适应均衡器	201
6.7 基带数据传输差错率计算	203
6.7.1 二元码的误比特率	203
6.7.2 三元码的差错率	206
6.7.3 M 元码的错误概率	207
6.7.4 误码率的测量	209
思考题	210
习题	210
拓展学习题	214
第七章 模拟信号的调制与解调	215
7.1 引言	215
7.2 带通信号的表示方法	216
7.2.1 带通信号频域和时域的对应关系	216
7.2.2 带通信号的复包络表示	217
7.2.3 带通信号的能量计算	218
7.2.4 带通线性系统的表示方法	219
7.2.5 线性带通系统对带通信号的响应	219
7.2.6 等幅正弦信号相位的复包络表示	220
7.3 模拟线性调制	222
7.3.1 线性调制系统的一般表达	222
7.3.2 模拟振幅调制(AM)	222

7.3.3	模拟线性调制信号的抗噪声性能	228
7.3.4	模拟线性调制技术的应用	237
7.4	模拟信号的角调制与解调	239
7.4.1	模拟信号角调制的数学表述	239
7.4.2	模拟信号的角调制分析	240
7.4.3	模拟调频信号的产生与解调	247
7.4.4	模拟调频信号的抗噪声性能	249
思考题	.....	254
习题	.....	255
拓展学习题	.....	261
第八章 数字信号调制	.....	262
8.1	数字信号的幅度调制	263
8.1.1	多电平数字幅度调制	263
8.1.2	数字信号的正交调幅	264
8.1.3	部分响应正交调幅	271
8.2	数字信号角调制的参数描述	274
8.2.1	引言	274
8.2.2	PSK 信号的相位参数描述	275
8.2.3	FSK 信号的频率参数描述	276
8.3	连续相位频移键控(CPSK)信号分析	278
8.3.1	最小移频键控(MSK)信号描述	278
8.3.2	CPSK 常用基带信号波形	280
8.3.3	MSK 信号分析与实现	282
8.4	相移键控(PSK)信号分析及应用	290
8.4.1	PSK 信号解调中的相位模糊问题	290
8.4.2	四相差分相移键控	296
8.4.3	移动通信系统中的 QPSK 调制解调方案	296
思考题	.....	300
习题	.....	300
拓展学习题	.....	306
第九章 加性高斯白噪声信道中的信号检测	.....	308
9.1	信号的相关检测	308
9.1.1	接收机模型	308
9.1.2	信号相关检测模型	309
9.1.3	信号的基函数表述	312
9.1.4	脉冲调幅信号(PAM)的相关检测	318

9.2	信号的匹配滤波	318
9.2.1	匹配滤波器的输出信噪比	319
9.2.2	匹配滤波器的频域表述	320
9.3	信号的判决准则	323
9.3.1	最佳判决准则	323
9.3.2	最佳相关接收机的结构模型	326
9.4	最佳检测条件下的误码率	327
9.4.1	二进制双极性信号的错误概率	327
9.4.2	M 元正交信号的错误概率	330
9.4.3	M 元双正交信号的错误概率	332
9.4.4	M 元二进制编码信号的错误概率	333
9.4.5	M 元 PAM 信号的错误概率	333
9.4.6	M 元 PSK 信号的错误概率	335
9.4.7	DPSK 的误码率	339
9.4.8	QAM 错误概率	341
9.4.9	数字调制信号性能的比较	344
* 9.5	有记忆信号的检测	346
9.5.1	有记忆二进制差分码的状态图与网格图	346
9.5.2	最大似然序列检测	348
9.5.3	逐个符号最大后验概率(MAP)检测	351
* 9.6	连续相位(CPFASK)信号检测	353
9.6.1	CPFASK 信号最佳检测器结构	353
9.6.2	CPFASK 最大似然检测性能	357
9.6.3	CPFASK 信号的逐个符号检测	360
9.7	加性高斯白噪声信道中随机相位信号检测	363
9.7.1	二进制随机相位信号检测	363
9.7.2	M 元正交信号的最佳检测	368
	思考题	373
	习题	373
	拓展学习题	383
第十章	信道编码	385
10.1	信道编码基本概念	385
10.1.1	差错控制类型	385
10.1.2	信道编码中的基本概念	386
10.1.3	信道编码的性能参数与译码准则	388

10.2	线性分组码	390
10.2.1	线性分组码的构造	391
10.2.2	线性分组码的性质	394
10.2.3	完备码与 MDC 码	395
10.3	循环码	397
10.3.1	循环码的构造	397
10.3.2	系统循环码	402
10.3.3	循环码的编码器	404
10.3.4	实用循环码简介	409
10.4	线性分组码的译码与性能分析	415
10.4.1	线性分组码的最佳软判决译码及性能	415
10.4.2	线性分组码的硬判决译码及性能	419
10.4.3	硬判决和软判决译码的性能比较	427
10.4.4	线性分组码的最小距离边界	428
10.5	卷积码	430
10.5.1	卷积码的编码原理	430
10.5.2	卷积码的编码描述	431
10.5.3	卷积码的自由距离与转移函数	440
10.5.4	卷积码的译码	445
10.5.5	卷积码的性能分析	454
10.6	码的改造与组合	463
10.6.1	线性分组码的改造	463
10.6.2	删余卷积码	466
10.6.3	交织编码	469
10.6.4	级联码	475
*10.7	先进信道编码技术	477
10.7.1	Turbo 码	478
10.7.2	LDPC 码	483
10.7.3	网格编码调制	487
10.7.4	空时码	493
*10.8	信道编码的应用	497
10.8.1	GSM 中的信道编码	497
10.8.2	3G 系统中的信道编码	501
	思考题	502
	习题	502

拓展学习题	509
第十一章 多径衰落信道中的信号检测和分集接收	510
11.1 衰落信道的信号模型与性能改善	510
11.2 瑞利衰落信道条件下的差错率	512
11.2.1 瑞利衰落条件下二进制 PSK 和 FSK 的差错率	513
* 11.2.2 Nakagami 衰落条件下二进制 PSK 的差错率	515
11.3 多径衰落信道信号的分集接收	516
11.3.1 分集接收方法	516
11.3.2 二进制信号分集接收系统模型	516
11.3.3 分集合并技术	517
11.3.4 二进制 PSK、FSK 分集接收信号性能	518
* 11.3.5 多相信号分集接收性能介绍	524
11.3.6 M 元正交信号的分集接收性能	525
11.4 宽带信号在衰落信道中的传输与接收	530
11.4.1 信道的抽头延时线模型	530
11.4.2 频率选择性衰落信道信号的 Rake 接收	532
* 11.4.3 Rake 分集接收性能	533
11.4.4 IS-95 中 Rake 分集接收的工程实现	538
思考题	540
习题	541
拓展学习题	548
第十二章 扩频通信原理	549
12.1 概述	549
12.2 扩频通信系统模型	550
12.3 直接序列扩频	551
12.3.1 扩频序列信号表述与接收	551
12.3.2 扩频信号的译码性能	554
12.3.3 DS 扩频技术的应用	560
* 12.3.4 脉冲干扰对 DS 扩频信号的影响	562
12.4 扩频码的生成	564
12.5 跳频扩频通信	567
12.5.1 跳频扩频通信方案	567
12.5.2 加性高斯白噪声信道中 FH 扩频信号的性能	569
* 12.5.3 局部频带干扰下 FH 扩频信号的性能	572
12.5.4 基于 FH 扩频信号的 CDMA 系统	575
12.6 扩频信号的同步	576
12.6.1 扩频信号的捕获	577

12.6.2 扩频信号的同步跟踪	579
思考题	583
习题	583
拓展学习题	589
第十三章 同步原理	590
13.1 同步需求	590
13.2 载波信号恢复方法	591
13.2.1 非线性变换法	591
13.2.2 锁相环生成法	592
13.2.3 导频插入法	594
13.3 噪声对载波同步的影响	595
* 13.4 载波相位估计与信号接收	599
13.4.1 估值理论	599
13.4.2 相位估计似然函数	600
13.4.3 信号相干解调接收机模型	600
13.4.4 相位误差对解调的影响	602
13.4.5 最大似然载波相位估计	603
13.4.6 实现相位估值的锁相环	605
13.4.7 最大似然估计的性能	614
13.5 码元同步	617
13.5.1 引言	617
13.5.2 随机数码码元同步	618
13.5.3 内插定时码元同步	620
13.5.4 码元同步误差对误码的影响	623
* 13.6 连续相位调制的码元同步	625
13.6.1 概述	625
13.6.2 数据信息辅助同步	627
13.6.3 非数据信息辅助同步	628
13.7 帧同步	630
13.8 网同步	633
13.8.1 固定通信网的网同步	633
13.8.2 移动通信网的网同步(基站同步)	634
思考题	638
习题	638
拓展学习题	641
* 第十四章 通信系统	642
14.1 固定通信系统	642

14.2 移动通信系统.....	644
14.3 交换机.....	646
14.3.1 时分交换网络	646
14.3.2 时分空分组合交换网络	647
14.4 信令系统.....	650
思考题.....	652
习题.....	652
* 第十五章 通信网	653
15.1 通信网的主要类型.....	653
15.2 通信网的分层结构.....	655
15.2.1 开放式系统互联参考模型	655
15.2.2 通信网的其他分层结构模型	656
15.3 电话网.....	658
15.3.1 固定电话网	658
15.3.2 移动电话网	658
15.4 数据网.....	659
15.4.1 X.25 分组网	660
15.4.2 DDN 数字数据网	661
15.4.3 帧中继(FR)网	662
15.4.4 ATM 网	662
15.5 传输网.....	663
15.6 七号信令网.....	665
思考题.....	666
习题.....	666
参考文献.....	668
附录 A 线性预测系数的求解算法(列文森-杜宾算法)	670
附录 B 基带信号的功率谱密度	672
B.1 无记忆基带信号的功率谱密度	672
B.2 有记忆基带信号的功率谱密度	675
附录 C Q 函数与补误差函数	678
附录 D 12 位 A/D 与 8 位 PCM 编码对应表	680
附录 E BCH 码的部分素多项式表	682
附录 F 本原 BCH 码生成多项式系数(八进制形式)表	684
附录 G 常用三角公式.....	686
英文缩写名词对照表.....	687

第一章 绪 论

1.1 引 言

人类社会需要进行信息交互,社会越进步,交互信息越多。通信系统是人类社会进行信息交互的工具。在通信系统的发展过程中产生了很多理论,如信息论、调制理论、检测理论和编码理论等,也发展了多种多样的通信手段,如有线通信、无线通信、卫星通信、移动通信等。尤其是 20 世纪的后 20 年,通信技术得到了飞速发展,使通信技术、计算机技术和微电子技术相结合形成了新的学科——信息学科。

通信作为信息科学的一个重要领域,不但与人类的社会活动、个人生活与科学活动密切相关,而且也有其独立的技术理论体系。“通信原理”课程或者更确切地称之为“信号传输原理”课程是信息与通信类专业的基础课程,它涉及通信专业的众多基本概念与技术,是今后学习专业课的基础,也是从事通信设备设计、制造与研究工作的基础。

1.2 信源、消息、信号与信息

在通信专业领域,首先要涉及的是信源、消息、信号与信息概念。

信源(source) 是消息的来源,是消息的产生者或接收者,提供消息的可以是人或机器。

消息(message) 是通信系统要传送的对象;它由信源产生,如语音、图像、文字或某些物理参数等,所以通常也称语音和图像的编码为信源编码。

信号(signal) 是为了传送消息,而对消息进行变换后在通信系统中传输的某种物理量,如电信号、声信号或光信号等。另外与其相近的名词是信令(signaling),它是通信系统进行控制操作或为用户服务的一类控制信号。

信息(information) 是消息所含内容的量度,香农信息论给出了它的定义,单位为比特 bit。计算公式为 $I = \log_2 M$ 。式中, M 是消息集合的符号单元数,并假定各符号的出现概率是相等的。对于二进制数码,有两个符号:1 和 0。在 1 和 0 等概率情况下,通信系统每传送一个符号的信息量是 1bit。如果不相等,香农信息论定义用各自出现的概率分别计算。

传送“1”的信息量 $I_1 = \log_2 \frac{1}{P_1}$ (P_1 为“1”出现的概率)