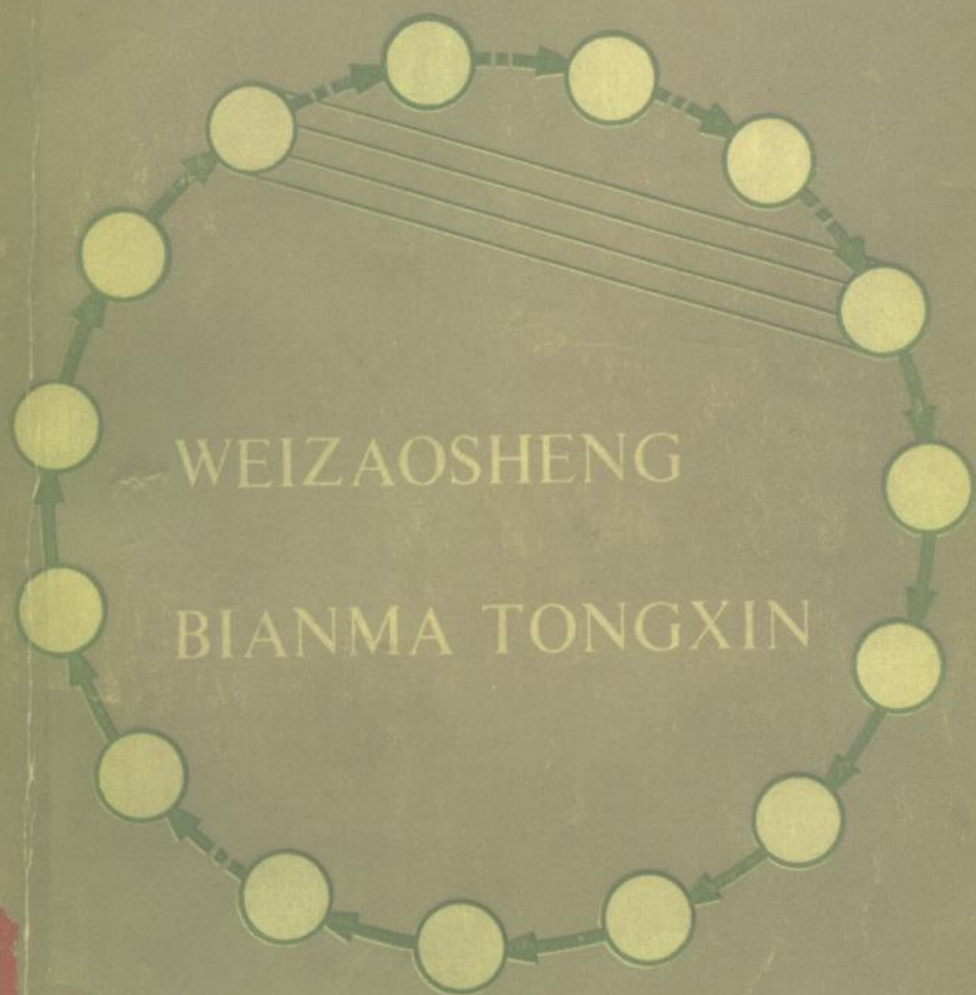


伪噪声编码通信



钟义信编著 · 人民邮电出版社出版

伪噪声编码通信

钟义信 编著

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书先讲信息论的一些基本知识，并运用这些知识讲伪噪声编码通信技术的重要意义和各种应用。书中一方面对实现伪随机序列的技术作了极为详细的说明，并提供了设计详表；一方面又对伪噪声编码技术在高效通信、码分通信、射束分集、纠错与同步以及其它方面的应用，作了较多讨论，指出了发展前景。本书是信息论方面一本参考书，也是近代通信技术方面的一本入门书，可供通信工程师、技术员、研究人员、高等院校通信专业的教师和研究生参考。

伪 噪 声 编 码 通 信

钟 义 信 编 著

*

人 民 邮 电 出 版 社 出 版

北 京 东 长 安 街 27 号

北 京 印 刷 一 厂 印 刷

新 华 书 店 北 京 发 行 所 发 行

各 地 新 华 书 店 经 售

*

开本：787×1092 $1/32$ 1979年3月第一版

印张：19 $12/32$ 页数：310 1979年3月北京第一次印刷

字数：448千字 印数：1—10,700册

统一书号：15045·总2286-无663

定价：1.95元

序

事物总是一分为二的，噪声也不例外。

在通信、雷达、计算机以及各种电子技术中，噪声总是作为信号的对立物而存在，是令人憎恶的东西。特别是其中的白噪声，在一定的平均噪声功率条件下具有最大的熵值（用通常的话来说就是具有最大的不定性），因而为害最甚。多少年来，人们曾经费尽苦心，采取过许多办法和措施，试图削弱和限制噪声的影响，而成效甚微。

随着人们认识的不断深化，特别是本世纪四十年代末期信息论形成以来，一些惊人的新观念出现了！人们对噪声的看法开始发生剧变。

四十年代末，信息论的奠基人仙农（G. E. Shannon）首先指出，在高斯噪声干扰下，在限平均功率的信道上的最有效信号，应当具有白噪声的统计性质。这就是说，在限平均功率的高斯信道上，实现有效通信的最佳信号乃是白噪声形式的信号。五十年代初，伍德华特（P. M. Woodward）等人也发现，在雷达技术中，为了实现同时测距（测时延）、测速（测频率），应当采用白噪声式的信号，才能达到最小的测量模糊度。随后不久，哈尔凯维奇（А. А. Харкевич）又证明：为了克服多径衰落干扰的影响，最佳信号也应当具有白噪声的形式。这样，人们就逐渐看到，这种历来被认为最可憎的白噪声，却在许多重要场合显示出极为有益的性质。

这种对白噪声认识上的剧变，吸引着人们对噪声的利用进行了大量的研究，很快就形成了名骚一时的所谓“噪声通信”理

论。可是，进一步的研究表明：白噪声的产生、加工、控制和模拟(复制)，都有许多技术上的困难，无法加以利用。自此，人们对噪声通信的热情便迅速降低。直到六十年代中期，由于逐渐发现了一些既易产生、加工和复制又具有白噪声性质的“伪噪声编码信号”(也有叫伪随机信号、伪随机序列或伪随机码的)，噪声通信的想法才又重新活跃起来，并不断获得了许多实际的应用。

从目前情况和长远发展的观点看来，伪噪声编码信号的应用有着极为广阔的前景。比如，在高斯信道上，可以利用伪噪声编码信号来实现高效率通信，充分利用信道的容量和信号的功率；在深空通信场合，可以利用伪噪声编码信号来实现低信噪比接收，大大改善通信的可靠性；在多径衰落信道上，可以利用这种信号来实现各个射束之间的分离，进行射束的分集接收，明显地改善抗衰落干扰的性能；还可以利用伪噪声编码信号来进行信号的波型分割，实现多用户间随意呼叫的码分多址通信(包括地面多址通信和卫星通信)；此外，利用伪噪声编码信号也可以实现高性能的保密通信以及差错控制等等。鉴于以上种种引人入胜的重要应用，作者认为有必要把它们作为一个专门的课题和技术来进行研究，以期引起各方面的进一步关注。这就是编写本书的目的。

伪噪声编码信号的应用还远不止于通信。在雷达技术、导航技术、一般的信息处理和测量技术方面，在统计数学理论研究方面，伪噪声编码信号及相应的技术都有广泛的应用。关于这些方面的内容，本书末章作了简略的叙述。

伪噪声编码通信技术本身所经历的过程，生动地说明了一门新技术是怎样在一般理论的指导下，在实际需要的推动下发生和发展起来的。了解这种新技术生长的规律和发展的逻辑，

对于我们的工作也许会有深远的、方法论上的意义。为了使读者能够洞悉伪噪声编码通信技术的来龙去脉；为了使读者比较系统地掌握伪噪声编码通信的理论和应用，本书安排了三个方面的基本内容：头两章从通信的基本模型出发，阐明通信的一些重要概念和基本要求，引出经典噪声通信的思想。随后两章介绍伪噪声编码理论，包括伪噪声编码信号的数学结构、逻辑设计和基本性质。最后六章介绍伪噪声编码信号在通信以及其它领域的主要应用。

本书初稿承西北电讯工程学院胡征、樊昌信、王新梅、王育民等同志审阅，提出了许多宝贵的改进意见；在写作过程中，周炯槃教授以及北京邮电学院通信理论教研室的同志们，经常给予指导和帮助，作者谨向他们表示诚挚的感谢！

作者 一九七八年五月于北京

目 录

第一章 通信问题引论	1
§ 1-1 通信的基本模型	1
§ 1-2 信源和信息量	5
§ 1-3 信道和信道容量	18
§ 1-4 编码定理	22
§ 1-5 有效性问题	26
1-5-1 信源最佳化	26
1-5-2 信道利用率最佳化	34
§ 1-6 抗扰性问题	40
1-6-1 信道干扰	42
1-6-2 纠错编码	47
1-6-3 调制技术与最佳接收	62
本章小结.....	70
参考文献.....	71
第二章 经典噪声通信理论	73
§ 2-1 编码定理的证明	73
§ 2-2 高斯信道的理想通信系统	81
§ 2-3 抗多径衰落的噪声通信	92
§ 2-4 最佳测距测速雷达	111
§ 2-5 经典噪声通信的评述	118
本章小结.....	121
参考文献.....	122
第三章 伪噪声编码理论	123

§ 3-1 伪噪声编码原理	123
3-1-1 几个基本的定义	123
3-1-2 超正交码和正交码	127
3-1-3 双值自相关码	133
3-1-4 狭义伪噪声码	140
3-1-5 复码及其它	150
§ 3-2 伪噪声码的性质	155
3-2-1 m 序列的随机性	156
3-2-2 相关函数	160
3-2-3 功率谱	181
3-2-4 调制、解调和混频	188
附录: 若干数学知识	193
A·3-1 集论简述	193
A·3-2 群、环、域概论	195
A·3-3 布尔代数基础	212
A·3-4 图论初步	218
本章小结	223
参考文献	224
第四章 伪噪声编码技术	225
§ 4-1 反馈移存器分析	225
4-1-1 触发器和移存器	226
4-1-2 反馈移存器	231
4-1-3 反馈逻辑函数及反馈移存器的分类	237
4-1-4 移存器分析举例	245
§ 4-2 线性反馈移存器序列	251
4-2-1 线性反馈移存器序列	252
4-2-2 线性移存器序列的周期性	256

4-2-3 m 序列	263
4-2-4 m 序列的采样	267
§ 4-3 伪噪声码的逻辑设计	271
4-3-1 直接逻辑法	271
4-3-2 间接逻辑法	278
4-3-3 线性移存器综合	310
本章小结	320
参考文献	321
第五章 高效通信	322
§ 5-1 伪噪声编码通信的基本概念	322
§ 5-2 系统性能分析	336
§ 5-3 空间应用的高效伪噪声编码通信系统	358
本章小结	376
参考文献	377
第六章 码分通信	378
§ 6-1 信号分割原理	378
§ 6-2 华尔什多路通信	391
§ 6-3 码分多址移动通信	408
§ 6-4 码分多址卫星通信	419
本章小结	439
参考文献	439
第七章 射束分集	440
§ 7-1 衰落和分集	440
§ 7-2 射束分集原理	451
§ 7-3 实用射束分集系统	456
§ 7-4 射束分集的系统性能	469
本章小结	482

参考文献.....	483
第八章 保密通信	484
§ 8-1 保密通信的基本概念	484
§ 8-2 保密理论	491
§ 8-3 伪噪声编码保密技术	499
本章小结.....	511
参考文献.....	512
第九章 纠错和同步	513
§ 9-1 伪噪声编码的纠错技术	513
§ 9-2 巴克序列与群同步	522
§ 9-3 无逗点码与自同步	532
§ 9-4 伪噪声码的延时锁定	547
本章小结.....	562
参考文献.....	562
第十章 其它应用	563
§ 10-1 伪噪声编码雷达.....	563
§ 10-2 在测试和振荡源方面的应用.....	580
§ 10-3 图象数据压缩.....	589
本章小结.....	599
参考文献.....	599
名词索引.....	601

第一章 通信问题引论

什么是伪噪声编码通信？为什么要研究伪噪声编码通信？它和其他现代通信技术有什么联系，又有什么区别？为了回答这些问题，有必要首先弄清通信的基本概念和人们对通信的基本要求。

§ 1-1 通信的基本模型

通信，简单说来就是互通信息。它的一般模型可以归纳为图 1-1。信息通过信道来传送。信道是沟通信源(发信者)与信宿(收信者)的桥梁或渠道。但是，在许多场合，为了使信息能够在信道中传递，往往在发端需要对信息进行必要的加工或处理(统称为变换)。在收端，为了还原信息，就对应地有所谓反变换。最简单的、人与人面对面的讲话，是直接通信方式，不需要任何变换与反变换步骤，但通信距离有限制；人们早已大量使用的电报、电话、传真、电视等等，克服了时间、空间的限制，则都属于间接通信方式，信息需要进行适当的变换和反变换，并借助电的作用来传送，因此叫做电信。在现代电信中，信源和信宿可以是人，也可以是机器(如计算机等)，信道可以



图 1-1 通信的一般模型

宿(收信者)的桥梁或渠道。但是，在许多场合，为了使信息能够在信道中传递，往往在发端需要对信息进行必要的加工或处理(统称为变换)。在收端，为了还原信息，就对应地有所谓反变换。最简单的、人与人面对面的讲话，是直接通信方式，不需要任何变换与反变换步骤，但通信距离有限制；人们早已大量使用的电报、电话、传真、电视等等，克服了时间、空间的限制，则都属于间接通信方式，信息需要进行适当的变换和反变换，并借助电的作用来传送，因此叫做电信。在现代电信中，信源和信宿可以是人，也可以是机器(如计算机等)，信道可以

是各种电磁波传播的媒质,如明线、电缆、波导、光导、无线电波传播空间、卫星转发器等等。变换和反变换则是各种各样的终端处理设备(如电话通信中的声电变换,传真和电视通信中的光电变换,数字或数据通信中的模数或数模变换)以及电信号的编码调制设备等等。其中,声电或光电变换器又常常称为换能器,它们把原始信息的能量形式转换为电能的形式,以便在电信系统中进行处理和加工。转换前后的两种能量形式的变化状况要相互对应,这叫做不失真变换。我们常常把由声能或光能转换过来的电振荡,统称为电信号,或者就简称为信号。这种信号充分代表了原始信息,因此在考察信源的时候,就可以不去分析真正的原始的信源,而分析由它转换过来的信号。

模数变换是数字或数据通信特有的设备,它是对上述电信号执行的一种变换。如上所述,换能器得到的信号是对原始信息的逼真的摹写,因此称为模拟信号;而采用模拟信号进行通信的系统,称为模拟通信系统。这种模拟信号在任意时刻的取值是任意的,它是时间的连续函数。在数字通信中,信号只能取有限数种离散值,而且出现的时间也是离散的。图 1-2 的(a)

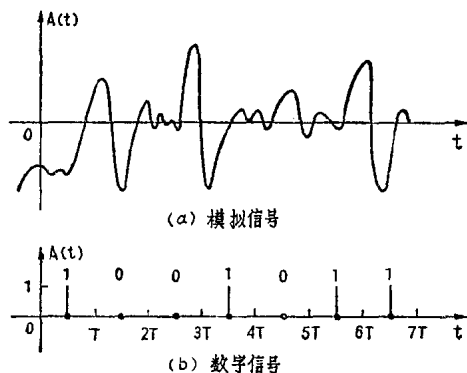


图 1-2 两种信号形式

和(b)分别示出了这两种不同的信号形式。其中图(b)示出的是
一种最常见的**二进制数字信号**。它在区间 $(nT, (n+1)T)$ 内的
取值只能是1或0,而不能是别的。图中的二进制数字信号可以
表示成1,0序列:

... 1 0 0 1 0 1 1 ...

但是,模拟信号和数字信号是可以互相转化的。比如,在数字
式电话通信中,就是把模拟话音的电信号转化为数字信号来传
输(这样做的目的,往往是为了提高传输的可靠性),然后在接
收端再把数字信号还原成模拟信号。这两种转换步骤,就分别
叫做模数变换和数模变换。

既然实际的模拟信号一般都可以转化为数字信号,因此,
今后本书将着重讨论数字信号的问题。

编码也是一种变换,这通常是对处理数字信号来说的。不
过,广义的编码,也可以用于模拟信号的处理。

电信系统的编码,通常主要有两种目的:一种是为了改善
信息传输的效率,一种是为了提高信息传输的可靠性。前者称
为**有效性编码**,后者称为**可靠性编码**。关于这方面的内容,后
面将会作进一步的讨论。

信号的**调制**也可以看作是一种变换,它的主要作用是使信
号适于在给定的信道上传输。比如,当给定的信道是微波信道
时,就需要把信号的频谱迁移到指定的微波频段上去。这种信
号频谱的迁移,就是一种调制。调制过程的实质,是把信号的
参量变化(它代表要传输的信息)“注入”到某个适于在指定信道
上传输的信号中去。通常,我们把后者称为载波。“注入”的方
式有很多,常见的是使载波的幅度或频率或相位随信号的变化
而变化,也就是,把信号的变化(即信息)“注入”到载波的幅度
或频率或相位参量上。这些调制方式,分别叫做**调幅**、**调频**和

调相。在数字信号场合，它们又可分别叫做振幅键控、移频键控和移相键控。由这些基本的调制方式，还可以派生出许多其它调制方式。关于这些内容，后面另有详细讨论。

信息总是在干扰作用下进行传输的。干扰可能发生在变换和反变换过程中，也可能发生在信道传输过程中。为了研究的方便，一般把干扰集中在信道上来表示。

我们还注意到，图 1-1 的通信模型中，两个信息传输方向的情况是对称的。因此，只要研究其中的一个方向就可以了。这就是图 1-3 所示的通信基本模型。它是图 1-1 一般模型的具

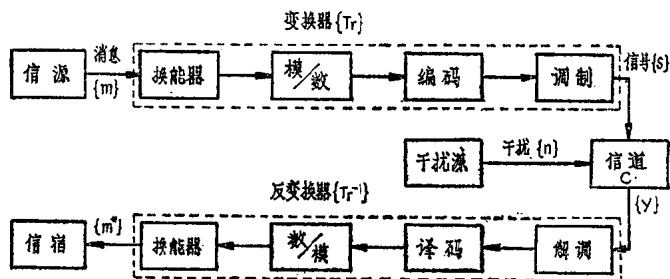


图 1-3 通信的基本模型

体化。如果信源本身是数字式的，其中的模数变换和数模变换就不再需要；在比较简单的场合，编码和译码也不必要。信源产生需要传送的消息 $\{m\}$ ，经过变换器 $\{T_r\}$ 的处理，把消息 $\{m\}$ 变成适合于信道传输的电信号 $\{s\}$ 。信号 $\{s\}$ 在信道上受到干扰 $\{n\}$ 的作用。于是，在收信方面的反变换器输入端，收到的将是信号 $\{s\}$ 与干扰 $\{n\}$ 的总合 $\{y\}$ 。反变换器 $\{T_r^{-1}\}$ 对 $\{y\}$ 进行与发方相反的处理加工，还原出消息 $\{m^*\}$ ，送给信宿。由于干扰的作用， $\{y\} \neq \{s\}$ ，因此， $\{m^*\}$ 一般不可能与原发的消息 $\{m\}$ 完全一致，而往往有某种误差或错误 $\{\varepsilon\}$ 。这种差错与信道干扰的性质以及变换 T_r 及反变换 T_r^{-1} 的结构有关，即

$$\{e\}=f[\{n\},\{T_r\},\{T_r^{-1}\}] \quad (1-1)$$

显然, 这里的 f 不是一般简单的函数关系。

我们对通信的基本要求, 可以归结为对“质”和“量”的要求。对于通信技术来说, “质”和“量”之间有什么样的制约关系呢?

我们知道, 通信之所以必须进行, 总是因为发信者有某种事情需要告诉对方, 而对方在进行通信之前对该事情的状态则存在着某种程度的不定性。通信之后, 不定性是怎样消除的呢? 当然是因为对方收到了送去的信息的缘故。由此, 我们可以说, 信息就是用来消除收信者的不定性的东西。

需要告诉对方的事情一般都属于所谓**随机事件**, 即其状态可能这样也可能那样, 而且各种状态出现的可能性也不一定相同。如果不是随机事件, 而是完全确定的事件, 就没有告诉对方的必要。信源产生的是一些随机事件, 信道传送的也是随机事件, 而且, 信道中存在的干扰也是某种随机事件, 因此需要用概率论、**随机过程**这样一些统计数学工具来描述和分析它们。

§ 1-2 信源和信息量

本书不是研究**信息论**的专书, 因此, 对于一些比较专门的概念和公式的推证, 将不得不省略。下面, 就在这样的前提下讨论信源的数学描述。

设某随机事件可能取 N 种**状态**: $x_1, x_2, \dots, x_N$, 取每种状态的**概率**分别为 $p(x_1), p(x_2), \dots, p(x_N)$ 。显然

$$\sum_{n=1}^N p(x_n) = 1 \quad (1-2)$$

即除了这 N 种可能状态之外, 这个随机事件不再能取别的任何

状态。比如，在二进制数字通信场合，某一时刻发出的信号只能为两种可能状态之一：或为 1，或为 0，而且，通常取这两种状态的概率相同。因此，这里就有 $N=2$ ：

$$\begin{aligned}x_1 &= 0, & x_2 &= 1 \\p(x_1) &= \frac{1}{2}, & p(x_2) &= \frac{1}{2} \\p(x_1) + p(x_2) &= 1\end{aligned}$$

为了书写方便，常用大写字母来代表上述的状态序列和相应的概率序列：

$$\begin{cases} X = \{x\}: x_1, x_2, \dots, x_N \\ P(x): p(x_1), p(x_2), \dots, p(x_N) \end{cases} \quad (1-3)$$

事件状态的全体 $\{x\}$ 称为事件的**状态空间**或**基本空间**，而状态的概率序列 $P(x)$ 称为该事件各个可能状态的**概率分布**。状态空间和相应的概率分布一起，则称为**概率空间**，记为 $\{X, P(x)\}$ 。

在简单的情况下，就可以用这种概率空间来描述信源。这时，我们把 $\{X, P(x)\}$ 称为该信源的**概率空间**或**信源空间**。比如，对一个简单的科学试验可以描述如下：以 x_1 表示试验成功， x_2 表示部分成功， x_3 表示试验失败；三种结果的概率分别记为 $p(x_1)$ 、 $p(x_2)$ 和 $p(x_3)$ 。因此，它的概率空间就是

$$\begin{cases} X: x_1, x_2, x_3 \\ P(x): p(x_1), p(x_2), p(x_3) \end{cases}$$

有了这种描述，根据概率论的法则，也可以对比较复杂的信源进行统计描述。比如某个信源包含两个随机事件 x 和 y ，它们的概率空间分别是

$$\begin{cases} X: x_1, \dots, x_N \\ P(x): p(x_1), \dots, p(x_N) \end{cases}$$

和

$$\begin{cases} Y: y_1, \dots, y_M \\ P(y): p(y_1), \dots, p(y_M) \end{cases}$$

则该信源的联合概率空间就是它们的联合空间:

$$\begin{cases} X \otimes Y: x_1 y_1, \dots, x_1 y_M; \dots; x_N y_1, \dots, x_N y_M \\ P(x, y): p(x_1, y_1), \dots, p(x_1, y_M); \dots; p(x_N, y_1), \dots, p(x_N, y_M) \end{cases} \quad (1-4)$$

其中, $p(x_n, y_m)$ 为 x_n 与 y_m 的联合概率:

$$p(x_n, y_m) = p(x_n) p(y_m/x_n) = p(y_m) p(x_n/y_m) \quad (1-5)$$

$p(y_m/x_n)$ 是在 x_n 发生的条件下 y_m 发生的条件概率。当 x_n 与 y_m 独立时, 有

$$p(y_m/x_n) = p(y_m) \quad (1-6a)$$

$p(x_n/y_m)$ 的意义可作类似的解释。当 x_n 与 y_m 独立时, 也有

$$p(x_n/y_m) = p(x_n) \quad (1-6b)$$

这时,

$$p(x_n, y_m) = p(x_n) \cdot p(y_m) \quad (1-7)$$

称 $X \otimes Y$ 为二联空间。照此, 可以推出 K 联空间如下:

$$\begin{cases} \overbrace{X \otimes Y \otimes \dots \otimes Z}^{K \text{ 个}}: x_1 y_1 \dots z_1, \dots, x_N y_M \dots z_L \\ P(x, y, \dots, z): p(x_1, y_1, \dots, z_1), \dots, p(x_N, y_M, \dots, z_L) \end{cases} \quad (1-8)$$

如果 Y 与 X 相同, 则上述二联空间就变为二重空间:

$$X \otimes X = X^2 \quad (1-9)$$

类似地, 可以得到 K 重空间 X^K 。

利用概率空间来描述信源, 可以很好地表现信源的随机性质。但是, 任意给定一个信源, 怎样来计算它所产生的信息量呢?