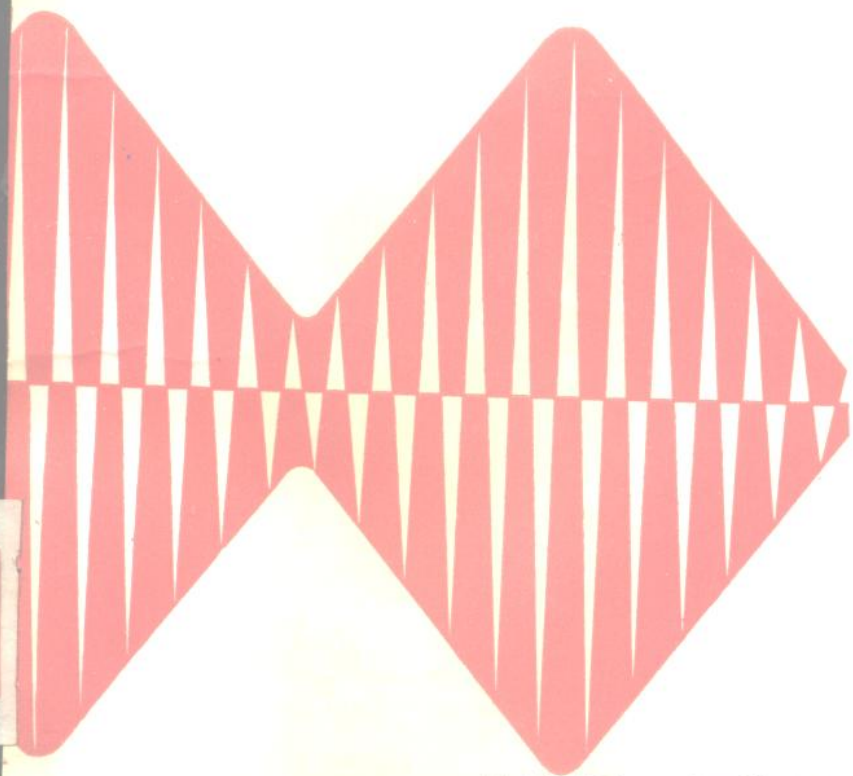


模拟与数字 通信电路

董荔真

倪福卿 编著

罗伟雄



北京理工大学出版社

模拟与数字通信电路

董荔真 倪福卿 罗伟雄 编著

北京理工大学出版社

内 容 提 要

本书根据“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的原则，注意到模拟集成电路和近代数字通信的发展，在“非线性电子线路”（高等教育出版社出版，1987年）一书的基础上，总结了课堂和实践教学环节的经验而编写的。全书由通信系统概述、高频功率放大电路、正弦波振荡电路、调幅与检波电路、混频电路、角度调制与解调电路、模拟信号的数字化和数字调制系统、锁相环路等章组成，每章后附有习题。

本书可作为高等院校电子工程、无线电技术类等专业的课程教材，也可供从事电子线路设计和研制工作的工程技术人员参考。

模拟与数字通信电路

董荔真 倪福卿 罗伟雄 编著

*

北京理工大学出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

地质出版社印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 14.75 印张 381千字

1990年8月第一版 1990年8月第一次印刷

ISBN 7-81013-360-8/TN·20

印数：1—5500册

定价：3.70元

前 言

自1980年6月在成都召开的原高等学校工科电工教材编审委员会扩大会议审定的《电子线路》(I)、(II)教学大纲(草案)实施以来,高等学校的教学形势及要求已有较大的变化。根据国家教委1986年对高校专业面的调整精神,以及通信技术发展带来对电子线路的要求,结合多年来对电子线路课程的教学实践,深感作为电子工程、无线电技术类专业的电子线路课程内容,也应随时代和技术发展的要求而更动。因此,仍本着“打好基础,精选内容,逐步更新,利于教学”的原则,在“非线性电子线路”(高等教育出版社出版,1987年)一书的基础上,总结多年来课堂教学、实验、课程设计以及毕业设计等教学环节的实践经验,编写了本书。

本书的特点是,首先注意到近代数字通信和模拟集成电路的发展,删除了过去教材中为经典分析而设的原理性模拟电路,全书以现代通信系统中的实用模拟和数字电路为主,加强了工程实用的集成电路,着重阐述它们的工作原理、工程设计方法和应用。其次,注意到国家教委对高校专业面拓宽的要求,在打好基础的前提下,对内容作相应调整,适当增加了通信系统的基本概念。

全书共八章。第一章通信系统概述,简要地介绍通信系统的分类、组成和质量指标;第二至六章用工程近似分析方法,讲述模拟通信系统所用各种典型非线性电子线路——高频功率放大,振荡,调幅与检波,混频,调角与解调的基本工作原理,并介绍它们的工程设计计算方法及实用电路,其中第四至六章重点介绍集成模拟乘法器的基本工作原理,和以集成模拟乘法器为主体的

调幅、检波、混频和角度解调等频率变换电路；第七章重点介绍数字通信系统的主要组成部分——几种典型的模拟-数字变换电路和数字调制与解调电路的基本工作原理，以及它们的抗干扰性能；第八章着重介绍锁相环路的组成，作用原理，线性分析及其应用，适当增加了数字锁相环路及实用的单片集成锁相环。全书各章后均有必要的习题。本书可作为高等院校四年制电子工程、无线电技术专业的本科生教材，教学时数为63学时，也可供相近专业的师生参考。

本书的第一、二、三章由董荔真执笔，第四、五、六章由倪福卿执笔，第七、八章由罗伟雄执笔，最后由董荔真统稿。本书由清华大学无线电系郑君里教授主审，提出了很多宝贵有益的意见和建议，在此谨表衷心的感谢。

本书难免有缺点和不妥之处，恳切欢迎选用本书的师生和读者批评指正。

编 者

1989年6月于北京理工大学

目 录

第一章 通信系统概述	(1)
§ 1-1 通信和通信系统	(1)
§ 1-2 模拟和数字通信系统	(3)
1-2-1 模拟和数字信号	(3)
1-2-2 模拟信号的传输	(4)
1-2-3 数字信号的传输	(13)
§ 1-3 通信系统中的信号和噪声分析	(17)
1-3-1 噪声和干扰的分类	(17)
1-3-2 信号的能量、功率及其谱密度	(23)
1-3-3 噪声的功率及其谱密度	(28)
§ 1-4 通信系统的主要质量指标	(36)
习 题	(38)
参 考 文 献	(39)
第二章 高频功率放大电路	(41)
§ 2-1 概述	(41)
§ 2-2 谐振功率放大器的基本工作原理	(43)
2-2-1 电路特点和工作原理	(43)
2-2-2 性能分析	(47)
§ 2-3 谐振功率放大器工作状态的选择	(54)
2-3-1 三种工作状态	(54)
2-3-2 负载和各级电压变化对工作状态的影响	(58)
§ 2-4 谐振功率放大器的耦合电路	(62)
2-4-1 高频功率晶体管的等效电路	(62)
2-4-2 耦合电路的作用和设计原则	(65)
2-4-3 谐振功率放大器的工程设计原则和举例	(71)
§ 2-5 已调波放大和丙类倍频	(78)

2-5-1	已调波放大器的工作原理	(78)
2-5-2	丙类倍频器	(80)
附录2-1	余弦脉冲系数表	(83)
附录2-2	L形、 π 形和T形网络计算公式	(91)
附录2-3	几种国产高频大功率晶体管典型参数	(98)
习 题		(100)
参 考 文 献		(103)
第三章	正弦波振荡电路	(104)
§ 3-1	概 述	(104)
§ 3-2	LC振荡电路	(105)
3-2-1	振荡原理和组成原则	(105)
3-2-2	三点式振荡器	(111)
3-2-3	振荡器的偏置电路	(120)
§ 3-3	LC振荡电路的频率稳定性	(126)
3-3-1	频率稳定度的定义和意义	(126)
3-3-2	影响频率稳定度的因素及改进措施	(127)
3-3-3	克拉波和西勒振荡器	(130)
§ 3-4	石英晶体振荡电路	(137)
3-4-1	石英谐振器及其特性	(138)
3-4-2	晶体振荡器电路	(143)
习 题		(149)
参 考 文 献		(158)
第四章	调幅与检波电路	(159)
§ 4-1	调幅基本原理	(159)
4-1-1	调幅波的频谱和调制定理	(159)
4-1-2	调幅波中的功率关系	(164)
4-1-3	双边带调制和单边带调制	(164)
4-1-4	单边带传输的两种制式	(168)
§ 4-2	低电平调幅电路	(170)
4-2-1	模拟乘法器工作原理	(171)
4-2-2	模拟乘法器调幅电路	(178)

§ 4-3 振幅检波电路	(182)
4-3-1 检波电路的作用和组成	(182)
4-3-2 包络检波和同步检波	(183)
4-3-3 二极管包络检波器	(187)
4-3-4 实用电路举例	(196)
4-3-5 二极管检波器设计考虑	(197)
§ 4-4 自动增益控制电路	(198)
4-4-1 自动增益控制的必要性	(198)
4-4-2 自动增益控制的方法与电路	(199)
习题	(205)
参考文献	(209)
第五章 混频电路	(211)
§ 5-1 概述	(211)
5-1-1 混频器的作用和组成	(211)
5-1-2 混频器的工作原理	(212)
5-1-3 混频器的质量指标	(217)
§ 5-2 场效应管混频器	(218)
5-2-1 工作原理	(218)
5-2-2 主要参数	(219)
5-2-3 电路举例	(222)
§ 5-3 模拟乘法器混频	(226)
§ 5-4 混频器中的干扰和失真	(228)
5-4-1 组合频率分量干扰	(228)
5-4-2 交叉调制 (Cross-modulation) 失真	(232)
5-4-3 互相调制 (Inter-modulation) 失真	(233)
5-4-4 倒易混频失真	(233)
习题	(234)
参考文献	(237)
第六章 角度调制与解调电路	(238)
§ 6-1 角度调制概述	(238)
6-1-1 调角波的数学表示式	(238)

6-1-2	调角波的频谱结构和带宽.....	(240)
6-1-3	调频与调相的比较.....	(245)
6-1-4	调频与调幅的比较.....	(246)
6-1-5	调频电路的性能指标.....	(246)
§ 6-2	调频电路.....	(247)
6-2-1	变容二极管直接调频电路.....	(248)
6-2-2	晶振直接调频电路.....	(255)
6-2-3	变容二极管间接调频电路.....	(257)
6-2-4	脉冲调相电路.....	(261)
6-2-5	电调谐器.....	(263)
§ 6-3	相位检波电路.....	(266)
6-3-1	相位检波电路的作用和组成.....	(266)
6-3-2	乘积型鉴相.....	(267)
6-3-3	门电路鉴相.....	(271)
§ 6-4	斜率鉴频电路.....	(274)
6-4-1	鉴频电路的作用和实现方法.....	(274)
6-4-2	单失谐回路斜率鉴频器.....	(275)
6-4-3	双失谐回路斜率鉴频器.....	(276)
6-4-4	鉴频器主要性能指标.....	(279)
§ 6-5	相位鉴频电路.....	(280)
6-5-1	频率-相位变换网络.....	(280)
6-5-2	乘积型相位鉴频器.....	(282)
6-5-3	门电路相位鉴频器.....	(284)
§ 6-6	脉冲计数式鉴频电路.....	(286)
6-6-1	工作原理.....	(286)
6-6-2	实现方法.....	(287)
§ 6-7	自动频率控制电路.....	(288)
6-7-1	自动频率控制的必要性.....	(288)
6-7-2	自动频率控制电路的组成及原理.....	(289)
6-7-3	自动频率控制电路的工作特性.....	(290)
§ 6-8	限幅电路.....	(292)

6-8-1 限幅器的作用、组成和特性	(292)
6-8-2 差分对管限幅电路	(294)
6-8-3 双二极管限幅电路	(295)
附录 调角波频谱分析	(297)
习题	(300)
参考文献	(305)
第七章 模拟信号数字化和数字调制系统	(307)
§ 7-1 引言	(307)
7-1-1 取样定理	(308)
7-1-2 模拟信号的量化	(312)
§ 7-2 脉冲编码调制 (PCM)	(318)
7-2-1 PCM基本原理和码组选择	(319)
7-2-2 线性编码	(322)
7-2-3 非线性编码	(325)
7-2-4 PCM系统的抗噪声性能	(331)
7-2-5 集成PCM编解码器 (2911A)	(334)
§ 7-3 增量调制 (Δ 调制)	(340)
7-3-1 增量调制原理	(341)
7-3-2 Δ 调制系统的抗干扰性	(343)
7-3-3 PCM系统和 Δ 调制系统的性能比较	(348)
7-3-4 改进型 Δ 调制	(349)
7-3-5 集成 Δ 调制编解码器	(354)
§ 7-4 振幅键控 (ASK)	(357)
7-4-1 2ASK信号的产生和解调	(358)
7-4-2 2ASK 系统的抗噪声性能	(361)
§ 7-5 频率键控 (FSK)	(366)
7-5-1 2FSK 信号的产生和解调	(367)
7-5-2 2FSK 信号的频谱	(370)
7-5-3 2FSK 系统的抗噪声性能	(371)
§ 7-6 相位键控 (PSK)	(374)
7-6-1 2PSK 信号的产生和解调	(375)

7-6-2 2PSK 信号的频谱	(381)
7-6-3 2PSK 系统的抗噪声性能	(381)
§ 7-7 二进制数字调制系统的性能比较	(386)
附录 高斯概率表	(387)
习题	(388)
参考文献	(389)
第八章 锁相环路	(391)
§ 8-1 锁相环路的线性分析	(393)
8-1-1 环路的基本传输函数	(393)
8-1-2 线性环路的稳态误差和稳定性	(399)
8-1-3 线性环路的频率响应和暂态响应	(407)
8-1-4 线性环路的噪声性能	(413)
§ 8-2 锁相环路的非线性分析	(417)
8-2-1 环路锁定、失锁和牵引过程	(417)
8-2-2 环路的同步和捕捉性能	(420)
8-2-3 一阶环路的相图分析	(422)
8-2-4 辅助捕捉方法	(425)
§ 8-3 集成锁相环	(429)
8-3-1 集成鉴相器	(430)
8-3-2 压控振荡器	(435)
§ 8-4 锁相环路的应用	(444)
8-4-1 锁相接收机	(444)
8-4-2 锁相鉴频	(446)
8-4-3 载波提取	(451)
8-4-4 频率合成器	(454)
习题	(458)
参考文献	(459)

第一章 通信系统概述

§ 1-1 通信和通信系统

通信的任务是传递信息。信息可以是语言，音乐，文字，符号，图像或数据。古代依靠烽火，信鸽或信使等工具传递信息，这种方式的信息传输速度是很低的，而且难于进行远距离的传递。自从有了电通信，不仅大大提高了信息传输速度，而且可以进行远距离的信息传递，甚至进行星际间的通信。

现代通信系统的典型框图如图1-1-1所示。首先将所要传送的语言，音乐，符号，图像或数据等信息通过输入变换器（它可以是话筒，拾音器，电键，电视摄像机等）转换成相应的电信号，这种电信号称为基带信号。

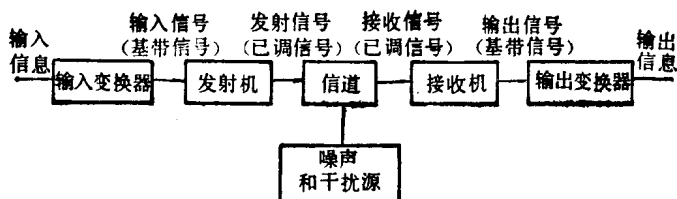


图 1-1-1 通信系统典型框图

发射机将基带信号进行某种变换后再送入信道，以便使基带信号在信道中进行有效的传输，这一变换过程称为调制，变换后的信号称为已调信号或频带信号。发射机主要由载波产生器，调制器，必要的功率放大器和发射天线组成，其组成框图如图1-1-2所示。

信道是传输带有信息的电信号的媒质，它可以是电线，电缆，

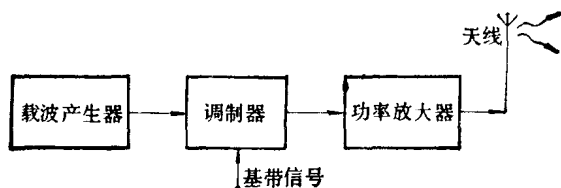


图 1-1-2 发射机组成框图

波导，光导纤维或无线电信道。无线电信道是指携带信息的电信号在空间传播的通道。由于无线电波在空间传播的性能和大气结构、高空电离层结构、大地的衰减以及无线电波的频率、传播途径等密切相关，因此不同频段的无线电波所取传播途径及它受上列不同因素的影响也不同，无线电波频段的划分如表1-1所示。

无线电波频段的划分

表 1-1

波段名称 (传播方式)	波长范围	频率范围	频段名称	主要用途
(地表波) { 长波	30,000~3,000m	10~100kHz	低频LF	电报
	3,000~200m	100~1500kHz	中频MF	广播
(地表波、电离层) { 中短波	200~50m	1,500~6,000kHz	中高频IF	电报、广播
	50~10m	6~30MHz	高频HF	电报、广播
(视距波) { 米波	10~1cm	30~300MHz	甚高频VHF	通信、电视、导航
	分米波	300~3,000MHz	特高频UHF	电视、雷达、 导航、中继通信、 卫星通信等
	厘米波	3~30GHz	超高频SHF	
	毫米波	30~300GHz	极高频EHF	雷达、导航等
(光纤) 激光	$<3 \times 10^{-4}m$	$>10^5GHz$		通信

接收机的功能与发射机相反，它从信道中取出已调信号后进行处理，使恢复出与发送端相应的基带信号，这一过程称为解调。接收机主要由接收天线，选频放大器和解调器组成，其框图如图1-1-3所示。

最后，输出变换器将复原的基带信号转换成与发送端输入信息相对应的原始信息。输出变换器可以是喇叭、电视显象管、打印机等。

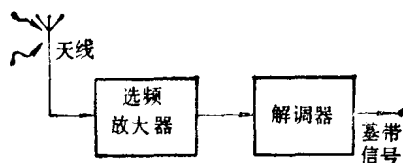


图 1-1-3 接收机组成框图

图1-1-1中用噪声和干扰源集中表示了信道中的噪声和干扰，以及分散在通信系统中其它各处的噪声，由于它们的存在，使得收端信号与发端信号之间存在误差。有关通信系统中的噪声和干扰来源及性质将在§1-3中详细叙述。

§ 1-2 模拟和数字通信系统

1-2-1 模拟和数字信号

虽然通信所要传输的信息形式多种多样，但是它们都可以归纳为两大类：离散信息和连续信息。在连续时间内，信息的状态是可数的或离散型的称为离散信息，例如符号，文字，数据等。在连续时间内，信息的状态是连续的或非离散型的称为连续信息，例如强弱连续变化的声音，亮度连续变化的图象等。

当信息通过输入变换器转换成相应的电信号后，若电信号的

参量（例如幅度、频率、相位等）的变化不仅在时间上是离散的，而且取值也是离散的，则该电信号称为数字信号，例如电机或电机输出的就是数字信号。若电信号的参量是对应于模拟信息而连续取值的，则该电信号称为模拟信号，例如普通电话机输出的就是模拟信号。

按照信道中所传输的信号性质不同，通信系统可分为模拟通信系统和数字通信系统两大类。

需要指出，模拟信号并不限于仅在模拟通信系统中传输，利用模拟-数字(A/D)变换技术，可将模拟信号先转换成数字信号再送入数字通信系统中进行传输，然后在接收端利用数字-模拟(D/A)变换技术再恢复为模拟信号。由于社会发展，需要传输的信息日益增多，对通信的技术要求也越来越高，与模拟通信相比，数字通信更易适应这一要求。首先，因为数字信号的抗干扰能力强，尤其在中继通信中，数字信号可以利用再生技术来消除传输过程中积累的噪声，并且能够对传输中产生的差错进行检验和纠正，这样便极大地提高了通信的可靠性；其次，数字信号易于加密，保密性强；第三，数字信号便于计算机对数字信息进行处理。加之自70年代以来，世界上先进国家已完全掌握了在各种信道（微波，各种电缆，卫星，光纤等）中传输数字信号的技术，以至目前有以数字通信代替模拟通信的趋势。另一方面，考虑到目前现有的多为模拟通信系统，因此若对该系统进行适当改造或增加数字终端设备，也应尽可能利用现有模拟通信系统来传输某些数字信号。

1-2-2 模拟信号的传输

一、调制的必要性

在无线通信系统中，与输入信息相对应的基带信号一般不适于直接在无线信道中传输，而是要经过某种变换后再经过发射天线送入无线信道，这个变换过程称为调制。调制的过程就是

用基带信号去改变高频信号的某个参量的过程。由于发射的已调高频信号带有基带信号的信息，而高频信号本身有如运载信息的工具，因此该高频信号称为载波，相应的频率称为载频。在接收端则必须将已调高频信号进行反变换，以恢复出发送端欲传送的基带信号，这一反变换过程称为解调。图1-1-2和图1-1-3就是典型的模拟通信系统发射和接收设备的基本组成框图。

基带信号必须调制到高频载波上再送入信道的原因：

(1) 高频已调信号易于辐射。为了使电磁能量有效地向空间辐射，通常发射天线的尺寸至少应该是发射信号波长的 $1/10$ ，而对于大多数基带信号来说，其波长很长，以致使天线尺寸大到难以实现的地步。例如，语音信号频率范围是 $100\text{Hz} \sim 3\text{kHz}$ ，其相应的波长为 $(100 \sim 3000)\text{km}$ ，而制作一个 $(10 \sim 300)\text{km}$ 长的天线是不现实的。但是当基带信号调制到较高的载频上后，由于载频的波长较短，因此发射天线易于实现。

(2) 便于同时传输不同的基带信号。考虑到若干个广播电台或电视台同时工作的情况，由于不同基带信号的频谱所占据的频带大致相同，所以，如果不对基带信号进行调制，这些广播电台或电视台就无法同时工作，否则这些基带信号之间将相互干扰，使信道的利用率大为降低。若是将不同的基带信号调制到不同的载频上，只要这些载频的间隔足够大，使发射的各高频已调信号占据的频谱不相重叠，就不会产生所要传输信号间的相互干扰。此时，在接收机输入端只要利用中心频率可调的带通滤波器，就可任意选择所需要的广播电台或电视台的信号。

(3) 传输信号的功率和带宽可以互换^{〔1〕-〔8〕}。信息论中将通信系统（或信道）每秒所能传送信息数量的最大值称为信道容量，并以符号 C 表示。它的含意是，在给定信道内，每秒最多能传

送 C 比特(bit)的信息量。^① 可以证明, 信道容量与系统(或信道)带宽 B 及信号噪声功率比 S/N 有关, 当系统中为高斯白噪声(详见§1-3)时, 信道容量为

$$C = B \log_2(1 + S/N) \quad (\text{bit/s}) \quad (1-2-1)$$

式(1-2-1)即信息论中的核心定理, 称为香农(Shannon)定理。它说明当系统(信道)确定后, 它能够传送信息的最大速率 C 便确定了。换言之, 信道容量 C 受系统(信道)的带宽 B 和噪声 N 所限制; 当 C 确定后, 系统(信道)的带宽 B 和信号噪声功率比 S/N 是可以互换的。这一原理为近年发展起来的扩谱通信技术奠定了理论基础, 即在一定的信道容量下, 利用展宽传送信号的频带可以换取良好的抗干扰能力。由式(1-2-1)可得

$$B_1 \log_2(1 + S_1/N_1) = B_2 \log_2(1 + S_2/N_2)$$

$$\text{则} \quad (1 + S_2/N_2) = (1 + S_1/N_1)^{B_1/B_2}$$

当 S_1/N_1 和 S_2/N_2 均远大于1时, 可写成

$$\frac{S_2}{N_2} \approx \left(\frac{S_1}{N_1} \right)^{B_1/B_2} \quad (1-2-2)$$

由式(1-2-2)看出, 当信道带宽由 B_1 变成 $B_2 = 2B_1$ 时, 传输信号时所需的信号噪声功率比可降低为原来的 $1/\sqrt{2}$ 。换言之, 信道频带越宽, 在同样的噪声背景下, 所需传输的信号功率可越小。通信系统中这种带宽和信号噪声功率比的互换, 就是通过对基带信号进行调制(或编码)来实现的。

二、模拟调制的分类

当控制载波某个参数变化的基带信号(或称调制信号)是时间

^① 信息量是用来定量说明传送消息中所含信息多少的度量, 通常以符号 I 表示。可以证明它是事件发生概率 $p(x)$ 的倒数的对数函数, 即

$$I = -\log_a \frac{1}{p(x)}$$

当 $a=2$, 信息量 I 的单位为比特; 若 $a=e$, 则 I 的单位为奈特; 若 $a=10$, 则 I 的单位为哈特莱。