

电子模拟 数字转换器

〔西德〕D.舒塔寿 著

机械工业出版社

TP353
1

电子模拟数字转换器

〔西德〕D. 舒塔寿 著
赵学铭 李忠德 译



机械工业出版社

Elektronische Analog-Digital-Umsetzer

Springer-Verlag 1977

D. Seitzer

* * *

电子模拟数字转换器

[西德] D. 舒塔寿 著

赵学铭 李忠德 译

王汝范 校

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 · 新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $4^{3/8}$ · 字数 112 千字

1984 年 6 月北京第一版 · 1984 年 6 月北京第一次印刷

印数 00,001—10,800 · 定价 0.70 元

*

科技新书目: 71-119

统一书号: 15033 · 5648



JS458/17

原 序

本书是电子、自动化、仪表类专业学生的教材，可安排在第六学期。每周二学时，一学期结束。学习本教材必须具有晶体管电路的原理和分析方面的知识。

本课程的教学目的在于：从实例引导出设计电子仪器和电子系统的思想方法。这个任务就好象一个建筑师那样，遵照用户提出的一定技术要求，用预先制成的建筑构件来“组合”一幢大楼。模拟数字转换器特别适用于学生作为课程设计练习，这是因为作为仪器来说，其技术性能容易一目了然，而且可以定量的用一些参数来表示。即使没有设计电路知识的读者，也能理解其基本原理，甚至在一定程度上理解其构造。这将有助于设计人员具体设计时，能用比较少的或简单的基本电路以及它们的组合来完成预期的功能。

本课程的安排是：首先讲授工作原理，然后是基本电路，最后介绍应用实例。

本书除了作为教材外，还有一个任务是要及时反映当前的技术水平，因此本书不对个人的论文作历史性的评价。由于现有的参考资料既广泛而又分散，为了帮助参加实际工作人员了解其总的概貌，本书各章均列出了参考资料。

作者认为目前电子模拟数字转换技术的任务特别有现实意义，其一个原因是：数字信息处理正在飞快发展，故确定编码及信息处理等都应当在微处理机投入之前。另外的原因是：集成电路器件价格的不断降低，故模拟电路和数字电路之间的“分界线”被放到转换器本身上去了，因此这个题目已引起使用者和设计者的兴趣。

综上所述，作者是以自己的看法来对待这个题目、收集资料

写成这本著作的，难免有错误和偏见。希望厚爱本书的读者会原谅笔者的主观性，在看到有偏见之处，望予以提出建设性的批评并加以指正，对此作者表示感谢。

1976年秋 Erlangen D.舒塔寿

目 录

第一章 绪论	1
1.1 什么是模拟数字转换器	2
1.2 模拟数字转换器的应用	3
1.3 模拟数字转换器的特性与参数	5
1.4 模拟数字转换器分析	6
第二章 理论基础概述	9
第三章 模拟数字转换方法	15
3.1 模拟数字转换方法分类	15
3.2 并行转换法	15
3.2.1 编码管	17
3.2.2 电压比较法并行转换器	19
3.2.3 电流比较法并行转换器	21
3.3 串行转换法	24
3.3.1 概述	24
3.3.2 串行转换法为平行转换法的发展	25
3.3.3 一位串行法	27
3.3.4 格雷码串行转换器	30
3.3.5 延迟式模拟数字转换器	37
3.4 循环转换法	38
3.4.1 概述	38
3.4.2 简单的和扩展的数字处理	41
3.4.3 带有标准件的循环编码器	43
3.4.4 内插式模拟数字转换器	45
3.5 间接转换法	47
3.5.1 锯齿电压法	47
3.5.2 双积分式(双斜率式)	49
3.5.3 电荷分布式	52
3.6 特殊形式转换法	54
3.6.1 称量法	54

3.6.2 非线性模拟数字转换(语言编码)	55
3.6.3 多路工作制的模拟数字转换器	59
3.6.4 三角形调制式	60
3.6.5 随机式	62
3.7 小结	65
第四章 数字模拟转换器	71
4.1 概述	71
4.2 权重电流法数字模拟转换器	72
4.3 T型电阻网络数字模拟转换器	75
4.4 沙诺-拉克数字模拟转换器	76
4.5 重新分配负荷的数字模拟转换器	78
第五章 模拟数字转换器的构件及基本电路	80
5.1 开关	80
5.1.1 机械触点式开关	81
5.1.2 半导体二极管开关	82
5.1.3 倒接晶体管开关电路	82
5.1.4 过载控制的射极跟随器开关电路	86
5.1.5 场效应晶体管开关电路	87
5.1.6 二极管-运算放大器开关	92
5.2 采样保持器	93
5.2.1 基本原理	93
5.2.2 双相电路采样保持器	96
5.2.3 二极管电桥采样保持器	97
5.2.4 数字采样保持器	100
5.3 比较电路	102
5.3.1 概述	102
5.3.2 通频带和过渡特性	103
5.3.3 运算放大器构成的比较电路	105
5.3.4 隧道二极管构成的比较电路	109
5.4 锯齿波发生器	109
5.4.1 概述	109
5.4.2 密勒积分电路	110

5.4.3	同步充电电压法	111
5.4.4	恒电流充电法	113
5.4.5	阶梯波电压发生器	115
5.5	计数器	115
5.5.1	异步计数器	116
5.5.2	同步二进制计数器	118
5.5.3	可逆计数器	119
第六章	转换器特性的测试	121
6.1	概述	121
6.2	数字模拟转换器的测量	121
6.2.1	静态测量	122
6.2.2	动态测量	124
6.3	模拟数字转换器的测量	127
6.3.1	静态测量	127
6.3.2	动态测量	131
6.4	小结	132

第一章 绪 论

模拟数字转换器简称模数转换器，它是模拟信号源和数字仪器（或数字系统）之间的连接器，它的技术性能系根据模拟信号源与数字仪器间的要求而确定。

近年来，由于数据处理设备的广泛应用，使得各种系统出现数字化的趋向。这些数据处理设备具有能够灵活地，并且在相当大的程度上统一和经济地处理信息，因此电信号的处理也正在向数字化方向发展。而且，由于集成电路技术的发展，使电路成本大幅度的降低，就象袖珍电子计算机那样大幅度降价而引人注目，从而更促进了数字技术的进一步发展。

在电子技术、自动化和仪表专业范围内，对微型处理机^[1.1]的强烈兴趣以及国际电气技术委员会的努力使信息转换通道接口达到国际统一标准化都是这种技术发展的标志。

信号源有多种形式，例如测量值（压力、温度及位移等）、语言和图象等，这类信号按其性质一般多数是连续性的，也就是模拟信号，如何按照要求将模拟信号与数字仪器匹配就是模数转换器的任务。模数转换器的设计问题是要在转换精度和速度之间找出最佳的折衷办法，它的成本则是应当尽量降低，能达到由于采用了转换器所增加的费用，可由省去数字处理电路而得以补偿，以使它在经济上具有竞争能力。

考虑到学习本课程的基础知识和课程内容的完整性，因此本教材的编写作了如下的安排：首先在第二章中复习一下信号理论的一些基础知识。在第三章中讨论模数转换的几种方法，按照其结构的特征进行分类，并把代表技术水平的实例串插进去。然后在第四章中讨论相反的任务，即数模转换器，这是因为它是构成模数转换器的基础，并且数模转换器已被制成定型的器件，这样

就使设计与制作模数转换器的工作可在定型器件的基础上进行。第五章专题讨论模数转换器的构件和基本电路。第六章叙述模数转换器技术性能的测量，本章的任务是使本教材内容更为完整。

1.1 什么是模拟数字转换器

前已述及，模拟数字转换器系用于连接模拟部分和数字部分之间的接口，广义地来说，它们可归属测量仪器范畴。测量仪器可用一个合适的代表量来表示某一个测量值，它可以有模拟与数字两种表示方法。在模拟表示法中代表量（如仪表指针偏转所代表的测量值）连续性地追踪被测量值（如电压），如图1.1所示。与此相反，数字表示法是不连续的，它是在相应的范围内，以一定的有限数量的分散数值（如数字）来代表测量值。数字表示法在电子技术中常用二进制，它是以二的幂指数为基础的表示方法。而在显示时考虑使用习惯，则优先采用十进制。图1.2是表示在同一情况下

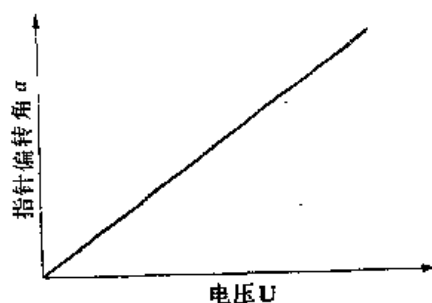


图1.1 模拟电压与指针偏转角的关系

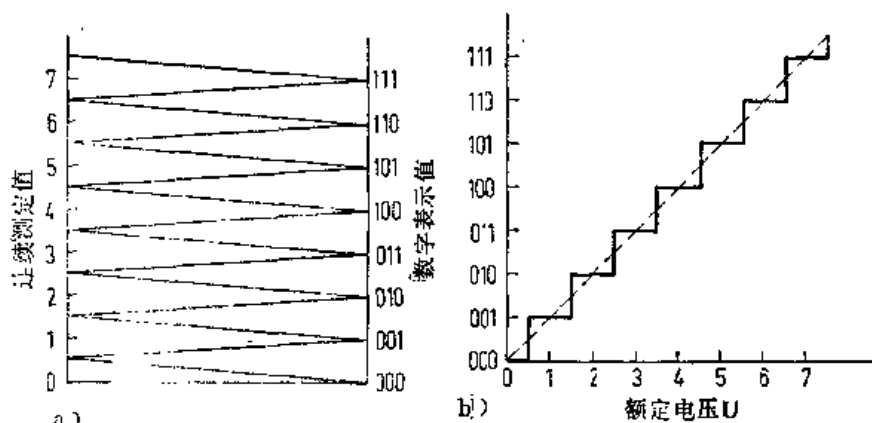


图1.2 二种表示方法

a) 数值分布范围 b) 特性表示

用两种不同制式表示方法进行对比，左边 a) 图是随着测量值连续变化的，而右边 b) 图则包含八个二进制分级的数值从 0 0 0 到 1 1 1，如果分级的数值有误差，其误差值可达到末级的大小。

图 1.3 是一种把直线位移(行程)转换为二进制电量的方式，

称为码盘。它是在一个可以活动的尺上采用四位二进制编码，图中用黑色代表逻辑“1”，白色代表逻辑“0”。在活动尺上有四个接触片，可分别

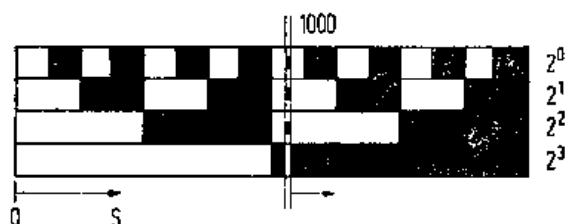


图1.3 位移量模数转换器

与四个代码接触，当尺移动到不同位置时，就能以二进制的数字来反映移动的位置。

1.2 模拟数字转换器的应用

模拟数字转换器的用途非常广泛，最常见的是应用在数字式仪表中，如数字电压表将被测的模拟电压经模数转换器转换后，可用十进位数字表示被测电压。

在遥测装置中，用一个多路调制器将多个测量信号收集并输送到模拟数字转换器上（见图1.4），经传输后再通过一个多路解调器把各个信号分解出来再进一步处理。在宇宙空间进行物理测量和实验的探测器就是用这种方法进行的。

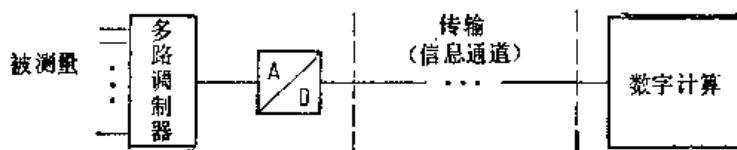


图1.4 遥测系统框图

在进行过程控制和调节时，可以在模拟数字转换器和传输通道之后再接有一台数字计算机，它能按照程序来处理测量数据，并能经过一个与其连接的数字模拟转换器，将由计算机输出的数字信号转换为模拟信号，以控制正在进行的过程，实现调节（见图1.5）。自动控制机床、轧钢机及高炉均以这种方式进行控制，联合供电网也以这种方式实现监控。未来的数据传输的远距离通讯网也将用这种方式进行电话通讯和数据交换，其模数转换器是采用按照脉冲编码调制的时间多路传输方法，传送语言和图象设备的基本部件（见图1.6）。最后，还可提出核物理的多路分析器，它实质上也是由一个模拟数字转换器构成的。这个转换器把从核辐射检测器的输出电压进行二进制编码来作为计算位置的编号并用来控制计数器，这计数器的读数提供频率的分布规律，即为核辐射能量的函数。模拟数字转换器的应用还可列出很多，限于篇幅不再一一枚举，可参考有关参考文献（见本章末所附参考资料）。

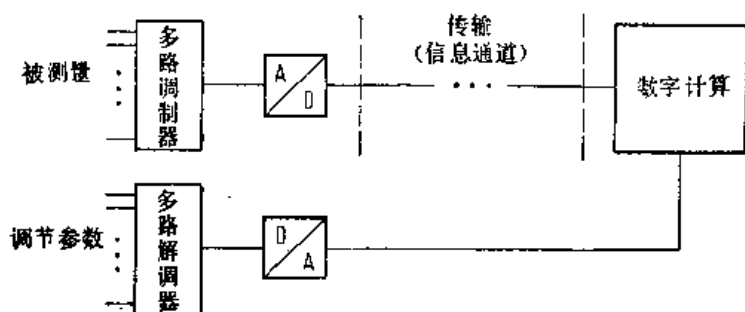


图1.5 过程控制和调节系统框图

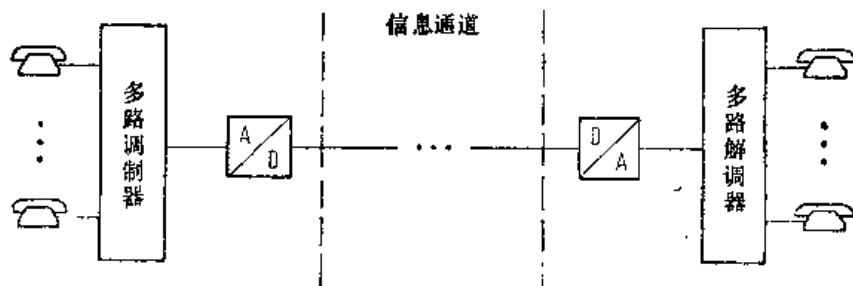


图1.6 用脉冲编码调制器传递数字信息的框图

1.3 模拟数字转换器的特性与参数

掌握模拟数字转换器的技术特性与参数,对于了解模数转换器的性能和正确地使用都具有很重要的作用。现将其主要技术参数叙述于下:

1. 测量范围和输出位数

测量范围系指模拟数字转换器的输入模拟电压范围,包括符号的正负(即从零扩展到某一个一定的正值或负值)。

模拟数字转换器的输出端一般采用十进制输出方式,或者以二进制或其它的编码方式。该电压可以在一根导线上按时间顺序一个接一个地串行输送,或者在多根导线上并行输送。对这类方式输出的技术指标,主要是输出电平值的高低及编码方式,而特别重要的是输出位数。它是衡量模拟数字转换器精确度的重要指标,也就是转换过程中能分成的级数。目前常用的为二进制12位(4096级),个别情况下也有采用14位,而16位也是可能应用的。

测量范围和输出位数能确定转换器所能分辨的被测量的最小值(即分辨力)。

还有一些特性和出现误差的可能性也是与精度有关的,在图1.7的特性曲线上清楚地表明了这一点。图中是将一个理想的幅度分层和一个实际幅度分层的曲线相对照,在理想特性曲线的整个测量区间范围内,数字输出量的每一级均代表相同幅度的模拟量,其平均坡度为1。而实际特性曲线有一个零位误差,就是说它的零位不在最小的一级的一半数值时开始,且各级所代表的幅度是不等的。如果偏差是均匀的,它即对应于一个放大系数误差。而且,如果幅度分层的临界下限值(阈值)不是单调上升,那么在局部区域每一级数字输出量将代表不等的幅度,使平均坡度出现非线性,有时甚至会导致缺少个别数值。

2. 转换速度

模拟数字转换器的转换速度一般是指每秒内完成的转换次

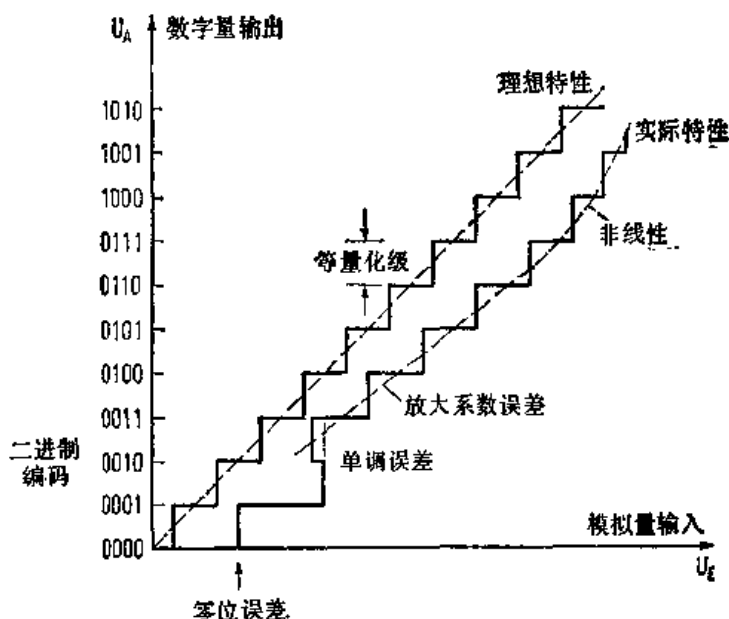


图1.7 模数转换器的传输特性曲线
(理想过程与实际过程对照)

数，或用完成一次转换所需的时间来衡量。但必须指出，这二个指标并不是互成倒数的，每秒内转换的次数往往比由完成一次转换所需时间的倒数稍低些。目前，在工程实践中，能够投入实际使用的二进制（四位）模数转换器，转换速度界限为 10^3 次/秒^[1.14]。

1.4 模拟数字转换器分析

图 1.8 为典型的由模拟数字转换器组成的装置框图。模拟信号先输入到采样保持器，它的功能是，当模拟数字转换器对输入信号进行幅度分层和编码时，在控制电路的作用下，每间隔一定的时间从输入模拟信号中随机采样，并保持采样信号的幅度。由采样保持器输出的信号进入模拟数字转换器，经一定时间后，转换器就出现数字编码形式的信号。

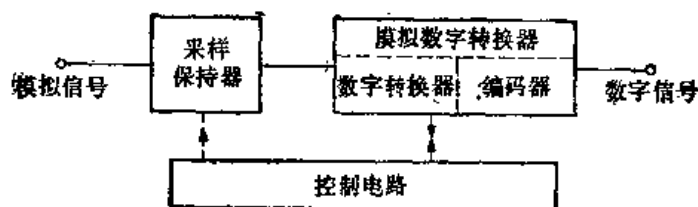


图1.8 模数转换器的一般结构

模拟数字转换器的任务就在于把输入的连续信号，进行编码后，在时间上和幅值上进行幅度分层。一般如果没有特别说明，就采用二进制编码。如输出信号的标准化确定其最小幅度级为标准值 $q = 1$ ，就得到以下公式：

$$S = b_{n-1} \cdot 2^{n-1} + b_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \cdots + b_1 \cdot 2^1 + \cdots + b_0 \cdot 2^0$$

式中 b_{n-1} 是最高位 (MSB) 系数， b_0 是最低位 (LSB) 系数，系数可取“0”或“1”。它们的主要任务在于确定编码字的 n 个位数。总测量范围包括数值 $0 \leq mq \leq 2^n - 1$ ，这样就有 2^n 个数值。

S 通常取其能使最高位价项得到 2^{-1} 加权。这种表示方法是由上式除以 2^n 来表示的，而系数 b_i 保持相同。

采样保持器将在第五章中叙述，转换方法内容可见第三章。控制电路将采用实例来进行说明。

参 考 资 料

- [1.1] Special issue on microprocessor technology and applications. Proc. IEEE 64 (1976) 6
- [1.2] Knoblock, D. E.; Loughry, D. C.; Vissers, Ch. A.; Insight into interfacing, IEEE spec. 12 (1975) 5, 50-57
- [1.3] Hercllick, D.; Larsen, R. S.; CAMAC; a modular standard. IEEE spec. 13 (1976) 4, 50-55
- [1.4] Hoeschele, D. F.; Analog to digital/digital to analog conversion techniques. New York, John wiley & sons 1968
- [1.5] Schmid, H.; Electronic analog/digital conversions. New York; Van Nostrand Reinhold Comp. 1970
- [1.6] Sheingold, D. H.; Analog-digital conversion handbook.

Norwood, Analog Devices 1972

- [1.7] Busse, G. ; AD-und DA-Umsetzer in der Meß-und Datentechnik (Stufenumsetzer). Bad wörishofen; ErwinGeyer 1971
- [1.8] Lange, W. -R. ; Digital-Analog/Analog-Digital-Wandlung. Elektronik in der Praxis. München; R. Oldenbourg 1974
- [1.9] Steinbuch, K. ; Taschenbuch der Nachrichtenverarbeitung. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York; Springer 1967
- [1.10] Dokter, G. F. ; Steinhauer, J. ; Digitale Elektronik in der Meßtechnik und Datenverarbeitung. Band II; Anwendung der digitalen Grundschaltungen und Gerätetechnik. Hamburg; Philips Fachbücher 1970
- [1.11] Tietze, U. ; Schenk, Ch. ; Halbleiter-Schaltungstechnik. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York; Springer 1974
- [1.12] Best, R. E. ; Eine Systemtheorie der DA-und AD-Converter und ihre Anwendung auf die Konstruktion schneller AD-Converter. Dissertation Nr. 4785. Zurich; Eidgen. Techn. Hochschule 1971
- [1.13] Euler, K. ; Neue Prinzipien zur Analog-Digital-Umwandlung und deren optimale Auslegung. Frequenz 17(1963) 10, 364-370
- [1.14] Pretzl, G. ; Analog-Digital-Umsetzer. Eine Produkt-und Literaturübersicht. Elektronik 25 (1976) 12

第二章 理论基础概述

在这一章内将讨论采样的时间间隔和被转换的模拟信号所占有的频带之间的关系,以及通过幅度分层所引起的误差和噪声。由此得到一些从时域过渡到频域或从频域过渡到时域时的简化关系。

数字信号意味着,用采样代替相应于图 2.1 a 所示的一个连续量。例如,随时间变化的电压 $u(t)$ (时间的幅度分层),它的高度只能容纳有限的数值 (幅度分层)。深入研究这些关系是信息理论和控制理论的任务〔2.1〕。在这里只能归纳一些对于设计模拟数字转换器所必要的和有用的重要特性。

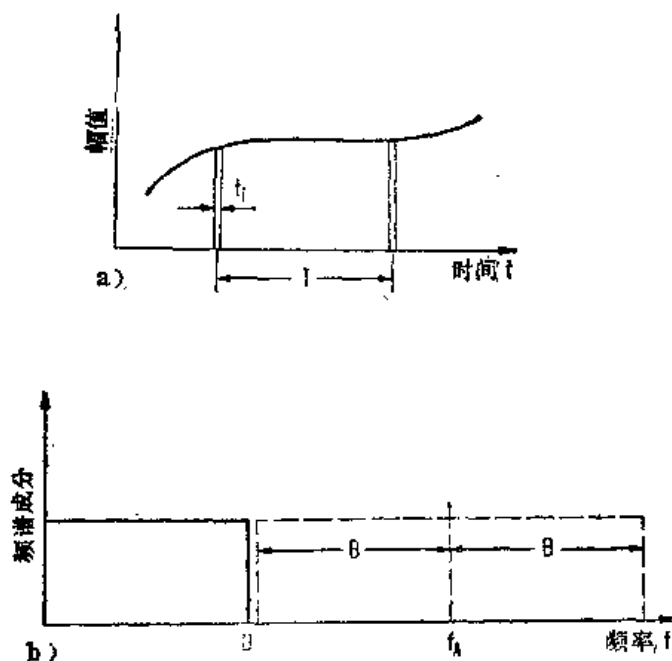


图2.1 用采样代替一个连续电压

a) 时间分配 b) 采样信号的频谱