

数字信号分析

〔美〕詹姆斯 D. 斯特恩斯著

人民邮电出版社

数字信号分析

〔美〕塞缪尔 D. 斯特恩斯 著

高顺泉 江慰德 译
叶金官 姚先璠

人民邮电出版社

Digital Signal Analysis

Samuel D. Stearns

1975

内 容 提 要

这是一本阐述数字信号处理系统的分析和设计方法的基础理论书。重点是讲数字信号分析，并辅以模拟信号分析。写得简明易读，但又相当细致。内容包括：线性信号分析的古典内容复习；连续波形与抽样波形之间的关系及两者的频谱之间的关系；数字信号处理系统的综合和分析；抽样的随机时间序列和功率谱的计算等四个方面，共十四章。每章都有习题，并附部分答案。适于大学生或初学数字信号处理的科技人员阅读。

数 字 信 号 分 析

〔美〕塞缪尔 D. 斯特恩斯 著

高顺泉 江慰德 译

叶金官 姚先琰

责任编辑：林秉方

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

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 1983年11月第 一 版
印张：13 12/32 页数：214 1983年11月河北第一次印刷
字数：308 千字 印数：1—14,000 册

统一书号：15045·总2721—有5296

定价：1.75 元

译者前言

本书是一本阐述数字信号处理系统的分析和设计方法的基础理论书。随着计算机的迅速发展，信号数字处理技术正在越来越多的科学技术领域内得到广泛应用。与模拟信号处理系统相比，用数字系统进行信号处理，精度高，性能稳定，手段灵活，方法多。因此，在我国向四个现代化的进军中，信号数字处理技术必将得到广泛的应用和深入的发展。

数字处理的信号多数来自连续的模拟信号，而且数字处理的结果最后又常常转换成模拟的形式，因此，掌握信号的数字形式与模拟形式之间及其处理系统之间的错综复杂的关系是很重要的。本书的特点是作者经常联系对比模拟信号和数字信号及其处理系统，使读者领悟两者之间的关系。书中阐述的重点放在数字信号分析上，而模拟信号分析却起着辅助的作用。

总的说来，本书写得比较好，容易读，适合大学生或初学数字信号处理的科技人员阅读。读完本书后，读者将易于进一步自学关于数字信号处理的高级教程。本书除第一章绪论外，每章后面都有习题，而且还给出了部分习题的答案；这些习题既作为练习，又是理论知识补充。每章后还附有参考文献可供进一步查阅。但是，我们认为本书不足之处是它没有包括如下一些重要内容：寄存器有限字长的影响、椭圆滤波器的设计、最优窗和逆 z 变换的计算。

本书1到5章和附录由姚先璠翻译，6到10章由叶金官翻译，11到14章由江慰德翻译；全部译稿由高顺泉统一。

翻译过程中，我们对原书中的个别错误作了订正。但由于我们水平有限，难免仍有不少错误和不妥之处，希望读者批评指正。

译者

序

我们正生活在信息时代。这一时代名称本身已经强调了信号处理的重要性，而固态集成电路的进展，特别是小型通用计算机的发展，已经使数字信号处理的许多理论上的优点得以实现。由于上述原因，一本关于数字信号处理的好书，将为广大读者，其中包括工程师、科学家、计算机专家和应用数学家们所欢迎。

虽然大多数信号处理现在已经是数字式的，然而其数据却大多来自连续的模拟信号，而且，数字信号处理的结果在最后运用之前常常仍需转换成模拟形式。因此，信号的数字形式与模拟形式之间复杂的并且常常是难以掌握的关系需要仔细地加以考察。这些关系是贯串本书反复出现的议题。

数字信号处理的理论涉及到相当多的数学。不喜欢数学的读者不要因为看到书中有许多公式和方程而却步，因为作者已精心地阐述了有关内容的物理基础，同时回避了那些并非必需的华丽的数学和人为的抽象。

因此，我很高兴向打算认真学习数字信号处理的人推荐这本书。本书写得很细致，有许多有用的例题和习题做示例，并且所选材料也包括了这一迅速发展的知识领域的有关主题。

贝尔研究所

R. W. 汉明

作者前言

本书阐述信号分析的基础，供工程师、数学家和计算科学家用。重点放在数字信号分析上，而模拟或连续信号的分析仅起辅助的作用。

数字信号和连续信号之间的相似性，以及其信号处理系统之间的相似性，在许多章中都强调了。我们相信在一门课程中同时学习数字的和连续的线性系统的分析，将使发现两种系统之间的基本相似之处，并且认识到同一数学知识能够应用于两者。

本书大体上可分为四个篇幅不等的部分。1，2和3章主要复习线性信号分析中的古典内容，其中包括基本公式和运算、最小二乘方、傅里叶级数、连续变换和传递函数等。古典概念叙述的重点，将放在那些对数字信号分析特别有用的内容上。4章到7章主要阐述抽样、模数变换和数字频谱分析；此外，第6章讲解快速傅里叶变换。在这些章里将着重阐述连续波形与抽样波形之间的关系，以及两者的频谱之间的关系。

8到12章阐述数字信号处理系统的综合和分析。这部分介绍 z 变换，讨论非递归和递归系统、数字传递函数及其与连续传递函数间的关系、连续传递函数的模拟以及数字滤波器的设计。最后，13和14章阐述抽样的随机时间序列和功率谱的计算。

本书是在一年课程“数字信号分析”的基础上编写的。1969年它开始在新墨西哥大学讲授，1970年开始在新墨西哥州

阿布奎基市 (Albuquerque) 的桑地亚 (Sandia) 研究所讲授。修这门课的学生, 许多人已经是前述“古典领域”里有良好基础的电气工程师, 但是, 也有些人是数学或计算科学专业的学生, 他们并不熟悉运算法、频谱分析等等。后面这类学生, 特别是有坚实数学基础的, 学习本课程时十分顺利。

对于工程师、数学家或者计算科学家, 本课程基本上是自成系统的。变换理论和线性系统分析方面传统的技术理论课程, 对学习本课程是有益的, 但并不是必需的。仅有的两点要求是: 具有适当的数学基础——这可以从高等微积分课程获得, 以及具有一定的应用大型或小型计算机解题的经验。作者的目的, 或者至少是希望, 本书可作上述类似课程的教本, 并且当此领域里的工程技术人员需要参考数字信号分析的公式和方法时, 希望本书是他们的有用的参考书。

本书所阐述的理论的主要内容都不是作者的贡献, 作者仅仅是企图把许多人的著作编为单一的论述。在编写这样一本书时, 人们禁不住要赞美对近代线性分析作出贡献的许多人, 他们包括从傅里叶直到汉明等人^①。

新墨西哥州, 阿布奎基市 塞缪尔 D. 斯特恩斯

①以下致谢部分从略——译者注

目 录

译者前言

序

作者前言

1. 绪论..... (1)
现代信号分析 (1) 若干常用公式 (6) 关于以后各章 (10)
2. 最小二乘方、正交性与傅里叶级数的复习..... (12)
引论 (12) 最小二乘方原理 (12) 正交函数 (18) 傅里叶级数 (20) 习题 (26)
3. 连续变换、传递函数与卷积的复习..... (31)
傅里叶变换与拉普拉斯变换 (31) 传递函数 (37) 卷积 (43) 极点-零点图 (45) 习题 (48)
4. 信号的抽样与测量..... (52)
引论 (52) 抽样定理 (53) 抽样数据系统 (58) 模数变换 (62) 数模变换 (66) 习题 (68)
5. 离散傅里叶变换..... (71)
引论 (71) DFT的定义 (71) DFT与傅里叶变换的关系; 混淆现象 (76) 傅里叶级数重构法 (82) 惠特克重构法 (88) 变更总抽样期 (91) 截断 (93) 有限抽样持续时间 (94) 习题 (101)
6. 快速傅里叶变换..... (106)
引论 (106) DFT中的冗余 (107) 样本集分解 (110) 信号流程图 (112) 用时域分解法的FFT (113) 用频域分解法的FFT (116) 矩阵因式分解 (120) 实用中的FFT (123) 习题 (124)
7. 抽样信号的频谱计算..... (127)
引论 (127) 正弦函数的DFT (127) 泄漏的减少 (132) 离散卷积定理 (134) 离散频谱的实例 (139) 习题 (143)
8. 非递归数字系统..... (146)
数字滤波 (146) 非递归算法 (147) 传递函数 (148) 零相移低

通滤波器 (153)	脉冲响应 (157)	z 变换 (161)	框图 (164)
非递归滤波器的综合 (165) 习题 (170)			
9.	递归数字系统 (174)		
	引论 (174) 递归算法 (175) 传递函数 (176) 差分方程的解: 脉冲和阶跃函数响应 (180) 框图 (184) 极点-零点图 (191) z 变换表 (195) 线性相移和零相移 (196) 习题 (202)		
10.	数字系统与连续系统 (206)		
	引论 (206) 零阶逼近或脉冲不变逼近 (207) 卷积 (211) 终值 定理 (214) 极点-零点比较 (216) 结束语 (220) 习题 (221)		
11.	连续系统的模拟 (224)		
	引论 (224) 模拟方法的分类 (225) 输入不变模拟 (227) 其他 模拟方法 (235) 线性模拟法的比较 (240) 多输入系统与非线性 系统 (246) 结束语 (257) 习题 (258)		
12.	模拟滤波器与数字滤波器的设计 (262)		
	引论 (262) 巴特沃斯滤波器 (263) 切比雪夫滤波器 (270) 通过双线性变换设计数字滤波器 (279) 频率变换 (290) 频率抽 样数字滤波器 (297) 有限字长引起的误差 (310) 习题 (316)		
13.	随机函数、相关与功率频谱的复习 (320)		
	随机函数 (320) 均匀密度函数与正态密度函数 (324) 多变量 密度函数 (329) 平稳过程与各态历过程的性质 (331) 相关函 数 (334) 功率与能量频谱 (339) 习题 (344)		
14.	随机序列与频谱估计 (348)		
	引论 (348) 白噪声 (349) 从滤波白噪声产生有色随机序列 (353) 功率频谱的估计 (356) 习题 (366)		
附录 A.	拉普拉斯变换与 z 变换 (369)		
附录 B.	快速傅里叶变换的例行程序 (377)		
附录 C.	数字滤波器设计程序 (382)		
索引	 (398)		

1 绪 论

1. 现代信号分析

信号分析这个术语通常用来称呼分析或者解释由时变物理过程所产生的信号的科学。信号本身可以是仅出现在短暂持续时间内的暂态信号，也可能是周期性的（重复的），或者是随机的和不可预测的信号。信号分析方法可以应用于上述各种信号。各种信号的示例绘于图1-1中。

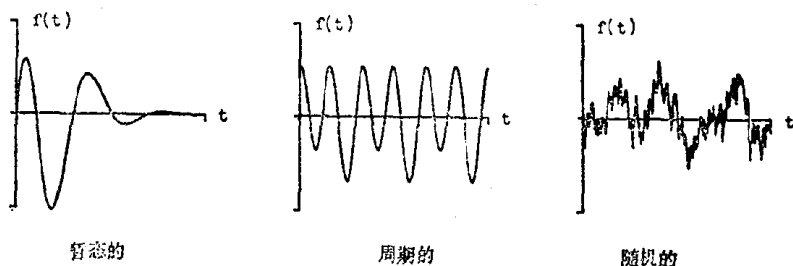


图 1-1 信号的类型

信号分析的应用很广，它应用于许多不同的领域和学科：通信、控制系统、生物学、医学、地震学、机械震动和冲击研究、流体力学与雷达设计。对于上述诸领域，信号分析现在正促进它们的发展。以上所列并不完全；信号分析正不断以新的方式应用于新的领域。

信号分析的许多现代应用是数字处理设备有了惊人发展与变化的结果。现在有着各种规模和价格的数字计算系统；从前

本来辨认得出的计算机，现在已是一种信号处理部件，而常用来在复合系统中完成某些特定的任务。这种部件无论从辨认还是从用途方面看，都不同于通用计算机。数据处理系统已经变得可靠、结实和便于携带；它们可用在人类不能接近的地方和环境中。

数字信号分析领域内的若干典型运算和系统示于图 1-2 到图 1-4 中。图 1-2 中示出了信号分析中若干最常用的运算。一个物理量——例如位移、速度、加速度、强度、力、压力、温度、颜色、电荷、重复率等等——借变换器转换为电位。然后，常常以均匀时间间隔使变换器的输出数字化，即借模数变换器 ADC（ADC 及其工作原理将在第 4 章讨论）变换成一系列的数。由 ADC 产生的数集或**样本集**，既可以记录下来供进一步处理，也可以像图 1-2 所示那样，不经记录而“实时”处理。

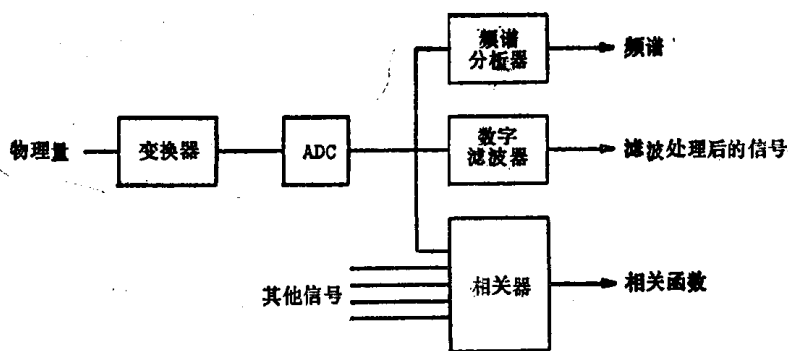


图 1-2 数字信号分析中的某些运算

对样本集常用的一个运算是**频谱**的计算。它通常给出幅度、相位、功率或能量对频率的分布。频谱的若干性质及其计算将在 2、3、5、6、7、13 和 14 章讨论。

数字信号分析中另一常用的运算是**数字滤波**。它一般用来

从原始的或输入的样本集产生输出的样本集，并且在此过程中实现某种目的，例如消去高频、降低噪声等。数字滤波主要在8、9和12章里讨论。

示于图1-2中的第三个运算是**相关**。这是一种把信号与其自身或与其他信号进行比较的特殊处理。相关主要在13章讨论。上述这些运算既可借通用计算机完成，也可用专门为其设计的专用处理器去做。

一个典型的数字控制或通信系统示于图1-3。在该系统中，若干模拟信号先被转换成数字形式，然后借数字信号处理器集中地或分散地予以滤波或以其他方式处理。处理器产生数字输出，然后，每一输出再由数模变换器（DAC）转换为模拟控制信号。

图1-4示出一典型的数据采集系统。与图1-3里输入不同，

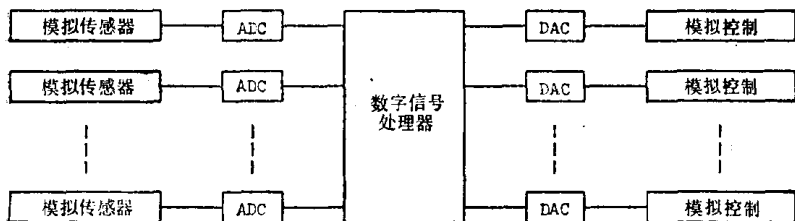


图 1-3 数字控制或通信系统

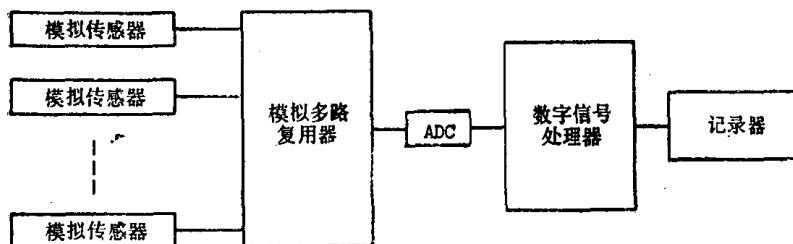


图 1-4 数字数据采集系统

这里从传感器来的诸模拟信号经过多路复用，即轮流抽样，然后用只一个ADC把信号转换成样本集。在数据存入数字记录器之前，信号处理器对数据进行滤波或作其他要求的运算。

在以下各章中，读者将看到许多与信号分析有关的基本课题。将会发现，无论分析的信号是**数字**的还是**连续**的，其所用的数学和方法大多是相同的。当然，如图1-5所示，两种信号及其系统之间存在着根本的差别。模拟或连续系统一般是处理连续的时变物理量 $f(t)$ 的系统；它的输出量 $g(t)$ 也是连续的。这种连续时变量的典型例子是电压、电流、位移、角度等等。另一方面，如上所述，**数字**系统处理数列 $f_0, f_1, f_2, \dots$ ，产生输出数列 $g_0, g_1, g_2, \dots$ 。

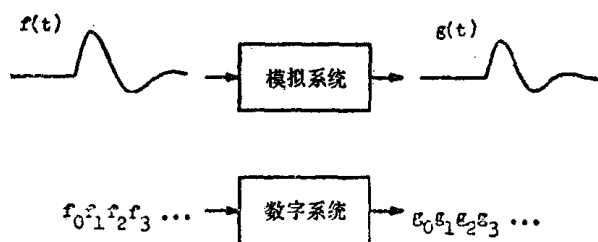


图 1-5 模拟和数字系统

以后诸章中大量的讨论除基于上述简单概念外，还基于下述基本概念：数字和模拟系统间的共同的理论基础，是建立在把数字系统所处理的数列看作好象是一**连续信号的样本**，而且该连续信号本身又由（或可能由）一连续系统处理。此思想可借图1-6来说明。把 $t = 0, T, 2T, \dots$ 时的 $f(t)$ 值排成一无序数列，就从连续函数 $f(t)$ 导出样本集 $\{f_m\} = \{f_0, f_1, f_2, \dots\}$ 。运用样本集概念，就能够对在抽样点上输出完全相同的模拟信号处理系统和数字信号处理系统进行比较。

实际上，图1-6就表示了图1-1中三种信号与图1-5中数列

之间的关系：在数字系统中处理的是由连续信号导出的样本集。例如，一个完整的信号处理系统可能如图1-3所示，它包含连接到数字处理器的A-D变换器和连接在另一端用来产生连续输出的D-A变换器。

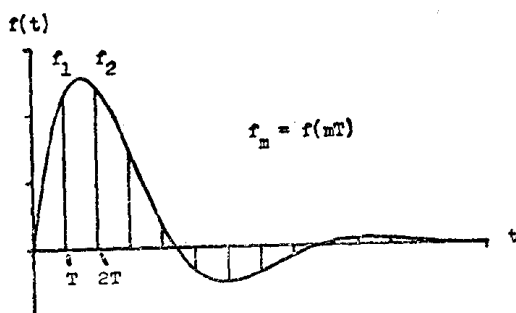


图 1-6 连续信号的抽样

另一方面，数字系统的输出也可能希望为数字形式的，或者也可能在模拟系统的输出端使用一个A-D变换器等等。

这儿最重要的是：分析这些系统或信号的数学方法是十分相似的——人们学习连续和数字信号分析时，同时思考两者是最有利的。

作为此引论的最后一个例子，图1-7给出了特性相似的简单的模拟系统和数字系统以供比较。在图的上半部，一个连续暂态波是一个简单的RC积分电路的输入（R代表电阻，C代表电容）。这种电路对许多工程师是熟悉的。当时间常数（RC）为1.67毫秒时，其输出波形示于图的右上角。图的下半部示出了输入波的样本集（抽样间隔取0.2毫秒）经一简单数字系统处理后的结果。符号 z^{-1} 表示一个抽样间隔的延迟，因此，这里的数字处理器的运算仅是：在每一抽样瞬时，用7.85乘前一输出样本，再与当时的输入样本相加，然后把和乘以0.113，即产生该时刻的输出样本。这类系统的分析将在以后的章节中进行。这一简单例子仅用来表明，在适当选择的数字系统和连续系统之间存在着相似性，这种现象在本书各部分都加以强

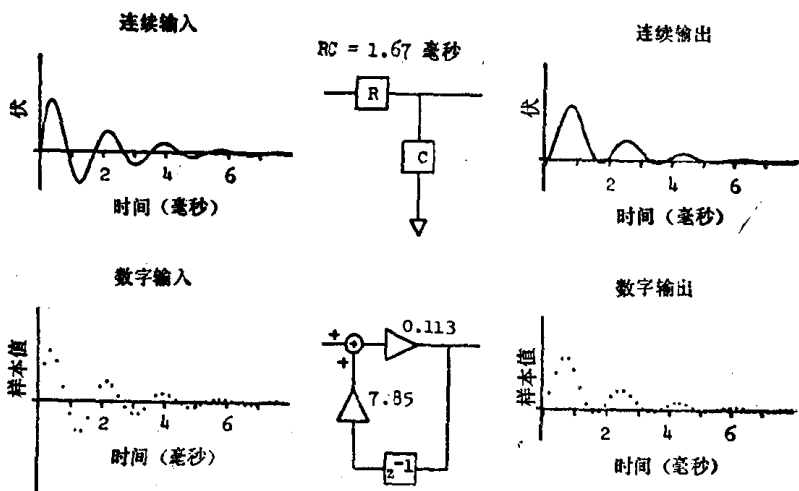


图 1-7 具有相似特性的连续系统和数字系统

调。

2. 若干常用公式

在讲信号分析主要课题之前，头几章先复习若干基本的数学概念，例如最小二乘方原理、正交性等。作为基础数学复习的开始，本节给出了若干以后章节中常用的代数、三角和演算的基本公式。这些公式以及其他常用的公式、表格等都能在标准手册里，例如在本章末所列的那些参考书里找到。

在处理傅里叶级数和变换时，并且，一般说来，在作谐波分析时，经常需要应用三角恒等式。一些最常用的恒等式列于下面表1-1①中。

12章中讨论某些数字滤波器的设计时将用到双曲函数。一

①符号“ j ”代表 $\sqrt{-1}$ 。这是工程技术书籍中的习惯用法，因为 i 已用来代表瞬时电流。

些有用的双曲型关系列于表1-2。

表 1-1

三角恒等式

$\sin(-\alpha) = -\sin \alpha$	}	(1-1)
$\cos(-\alpha) = \cos \alpha$		
$\sin(\alpha + \beta) = \sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta$	}	(1-2)
$\cos(\alpha + \beta) = \cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta$		
$2\sin \alpha \sin \beta = \cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)$	}	(1-3)
$2\cos \alpha \cos \beta = \cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)$		
$2\sin \alpha \cos \beta = \sin(\alpha + \beta) + \sin(\alpha - \beta)$		
$\sin 2\alpha = 2\sin \alpha \cos \alpha$	}	(1-4)
$\cos 2\alpha = 2\cos^2 \alpha - 1$		
$\sin \alpha/2 = \sqrt{(1/2)(1 - \cos \alpha)}$	}	(1-5)
$\cos \alpha/2 = \sqrt{(1/2)(1 + \cos \alpha)}$		
$\sin^2 \alpha = 1 - \cos^2 \alpha$		(1-6)
$\sin \alpha = (1/2j)(e^{ja} - e^{-ja})$	}	(1-7)
$\cos \alpha = (1/2)(e^{ja} + e^{-ja})$		
$e^{ja} = \cos \alpha + j \sin \alpha$		(1-8)

表 1-2

双曲函数

$\sinh(-\alpha) = -\sinh \alpha$	}	(1-9)
$\cosh(-\alpha) = \cosh \alpha$		
$\sinh(\alpha + \beta) = \sinh \alpha \cosh \beta + \cosh \alpha \sinh \beta$	}	(1-10)
$\cosh(\alpha + \beta) = \cosh \alpha \cosh \beta + \sinh \alpha \sinh \beta$		
$2\sinh \alpha \cosh \beta = \sinh(\alpha + \beta) + \sinh(\alpha - \beta)$	}	(1-11)
$2\cosh \alpha \cosh \beta = \cosh(\alpha + \beta) + \cosh(\alpha - \beta)$		
$2\sinh \alpha \sinh \beta = \cosh(\alpha + \beta) - \cosh(\alpha - \beta)$		
$\cosh^2 \alpha - \sinh^2 \alpha = 1$		(1-12)
$\sinh \alpha = (1/2)(e^{\alpha} - e^{-\alpha})$	}	(1-13)
$\cosh \alpha = (1/2)(e^{\alpha} + e^{-\alpha})$		
$e^{\alpha} = \sinh \alpha + \cosh \alpha$		(1-14)
$\sinh^{-1} \alpha = \log(\alpha + \sqrt{\alpha^2 + 1})$	}	(1-15)
$\cosh^{-1} \alpha = \log(\alpha + \sqrt{\alpha^2 - 1})$		