

855916

修德纯 高鸣 ● 译

7/4332

上海交通大学出版社

FFT 分析仪实用手册

[日] 城户健一 编著

佟德纯 高 鸣 译

钟廷修 校

上海交通大学出版社

内 容 提 要

快速傅里叶变换 (FFT) 分析技术以及 FFT 分析仪在各工程领域有着广泛的应用。本书系统地阐述了 FFT 分析技术的基本理论,并用大量实例介绍了 FFT 分析技术在旋转机械故障诊断、切削状态识别和噪声控制中的应用。理论与实践的紧密结合是本书的特点。

全书共分六章,内容包括 FFT 分析技术基础知识、旋转机械故障诊断、切削状态诊断、噪声频率分析和音响设备分析。书末的附录提供了 GP-IB 接口技术。

本书可作为机械、电气、航空、建筑、地质、生物和医学工程等专业技术人员的实用手册,也可供从事试验技术、信号分析和故障诊断的教师、研究生和本科生参考。

FFT アナライザ活用マニュアル

〔日〕城戸健一 编著

日本プラントメンテナンス協会 1984 年

FFT 分析仪实用手册

上海交通大学出版社出版

(淮海中路 1984 弄 19 号)

新华书店上海发行所发行

江苏常熟文化印刷厂排版印装

开本 787×1092 毫米 1/32 印张 7.5 字数 163,000

1987 年 11 月第 1 版 1987 年 12 月第 1 次印刷

印数 2000

ISBN 7-313-00078-2/TB 1

科技书目: 167—283

定价: 1.45 元

译者前言

随着电子计算机技术的发展,快速傅里叶变换(FFT)逐渐形成了一门新兴独立的分析技术,有关FFT的专用软件和FFT分析仪器也相继问世。作为一种基本和有效的分析工具,FFT的重要性正日益为人们所认识,现在已卓有成效地应用在通信工程、自动控制、机械振动、地震地质以及生物医学工程等领域。机械设备状态监测和故障诊断的声-振数字谱分析方法,就是建立在FFT分析基础上的一门新技术。

本书由日本音响学会主席、东北大学信息处理中心主任城户健一教授编著。作者长期从事快速傅叶变换和数字信号处理方面的教学和研究工作,具有较高的理论造诣和丰富的实践经验。编写一本FFT分析技术的实用性手册,既满足了广大科技工作者的迫切要求,也实现了作者本人的宿愿。

正如作者在序言中所指出的,本书的特点是理论上注重基本概念和基本方法的阐述,同时用大量现场工程实例介绍了快速傅里叶变换分析技术在机械故障诊断、切削状态识别和噪声控制中的应用。在每个工程实例中,都介绍了FFT分析仪的原理和使用方法、测试分析系统的结构以及对数据的评价等,书后的附录还提供了为FFT分析结果作二次处理的GP-IB接口技术。对于在现场使用操作FFT分析仪的科技人员,本书是一本实用性手册;对于从事数字信号处理和机械故障诊断技术的研究人员,本书也不失为一本很好的参考书。

本书由佟德纯译原序、第一章、第二章和第三章,高鸣译第四章、第五章、第六章和附录,全部译稿由佟德纯统稿,并请钟廷修副教授作了全面审校。

在本书的翻译过程中，虽力求准确无误地表达原书的内容和风格，但由于水平所限，译文中错误和不妥之处一定不少，恳望读者赐教指正，以便重印时修改。

译者于上海交通大学
1985年10月5日

序 言

本书是一本收集了大量 FFT 分析仪应用实例的实用手册。发明 FFT 算法至今已有 18 年的历史了，虽然时间不算太短，然而在国内外国却均未见到这类书。因此，作为曾经多次在学会刊物上发表过有关 FFT 原理和应用技术的笔者，编写此书是对社会应尽的义务。

本书的内容仅限于单通道 FFT 分析仪，其中列举了大量有关机械工程的应用实例。至于双通道 FFT 分析仪，大概只有研究人员对它感兴趣和可能在工作中要使用。本书为了避免失之浅薄，不拟把面铺得太宽，因此力求从基础出发，逐步加深巩固。

尽管是单通道 FFT 分析仪，但当阅读整理收集到的资料时，发现竟有这么多的应用，真令人感叹不已。能有机会收集到这些资料，对笔者来说，也从中获得了极其宝贵的经验。

早在 20 年前，笔者就开始实际使用傅里叶分析方法。当时靠不断地查找三角函数表和摇动老式计算机，往往连续工作几个小时才计算到第六阶谐波分量，它的理论虽然简单，但费时却惊人，对此，笔者有切身的体会。

两年以后，到了 1955 年（昭和 30 年），笔者又经历了一次深刻的教训。那时，为了控制一台七缸 240 r/min 双循环柴油机的噪声，需对机器进行测试。观察示波器的波形，噪声似乎以 28 Hz 为主，但根据噪声和振动的节奏感以及通过高速摄影摄得排烟的照片来看，却好像为 4 Hz。具体分析时从示波器的波形中截取 0.5s 一段，将它分成 48 等分，根据某刻度测量瞬时值。上级说，如用傅里叶变换进行分析，结果可以一目了然。当时笔者虽然感到难办却又无法拒绝，只好照做，并且为此设计了框图，编制了便于使用

的程序。即便如此，当时计算一个波形往往还需要打短工的女学生花费一整天的时间，相当麻烦。最后，由于忽视了采样定理致使计算结果无效，但前后已经用去了1个多月的时间。以后，笔者自制了一台外差式分析器用于进行现场测试，半年后终于完成此项试验。

在此以前，曾听说过在大洋彼岸已经发明了电子计算机，但是，笔者所在的日本东北大学却在3年后才研制出电子计算机。最初的计算机的性能还不及现在带程序的袖珍电子计算器，还不适宜用于需要大量存贮器的傅里叶分析。

这以后又经历了10年的岁月，终于在我的研究室里也引入了一台配备AD/DA转换器的内存24kW的中型(当时的称法)计算机，这时才能够领略早已公开问世的FFT所具有的种种优点和好处。

早先提出的“一句一句编写程序太费事，最好能够一按电钮立即得到结果”的设想，如今已经变成现实。现在甚至有人说这已经太简单落后了，连FFT分析仪无用论也时有所闻。

如果本书能对充分发挥FFT分析仪的功能做出一点贡献的话，那就实现了笔者与傅里叶分析结缘30年的夙愿。

城户健一

1984年1月20日

目 录

第一章 快速傅里叶变换分析技术基础知识

1.1 前言	1
1.2 傅里叶变换	2
1.3 采样	8
1.4 量化	11
1.5 离散傅里叶变换(DFT)	13
1.6 时间窗	14
1.7 功率谱	18
1.8 相位谱	22
1.9 细化	24
1.10 自相关函数和功率谱	27
参考文献	29

第二章 旋转机械故障诊断(一)

2.1 振动分析目的	31
2.2 工业旋转机械故障类型	33
2.3 旋转机械振动原因分析及控制措施	34
2.4 评价标准实例	37
2.5 主要诊断仪器	40
2.6 螺旋式双级压缩机诊断实例	47
2.7 立式螺杆泵诊断实例	51
2.8 附有监视仪表的齿轮联轴器诊断实例	56
2.9 齿轮联轴器诊断实例	62
2.10 平行轴齿轮轴瓦诊断实例	65

参考文献	70
------	----

第三章 旋转机械故障诊断(二)

3.1 变速电动机的脉动扭矩与振动	71
3.2 鼠笼式感应电动机转子导条故障诊断	81
3.3 滚动轴承故障诊断	89
3.4 旋转体的现场平衡	98
参考文献	112

第四章 切削状态诊断

4.1 切削阻力频谱分析	113
4.2 AE信号频谱分析	119
参考文献	126

第五章 噪声频率分析

5.1 频率分析目的	127
5.2 倍频程和 1/3 倍频程	128
5.3 分析系统	130
5.4 测量点的位置	131
5.5 本底噪声对特定噪声的影响	133
5.6 噪声计的校正和 FFT 的量级调整	136
5.7 噪声的频率分析方法	139
5.8 噪声频率分析实例	144
5.9 等效噪声级 L_{Aeq} 的求法	151
5.10 选装件 CF-036, A-weighting(计权)软件的使用方法	152
参考文献	154

第六章 音响设备分析

6.1 测试信号检验方法	155
--------------	-----

6.2	测试中提高信噪比的方法.....	172
6.3	失真率测试中的动态范围扩大法.....	182
6.4	音响设备失真抖动分析法.....	190
6.5	传递函数(增益和相位特性)的测试.....	204

附 录

GP-IB接口技术的使用——将分析结果传送给个人	
计算机的方法	214
1. 系统结构	214
2. 分析结果的读取	215
参考文献	225

第一章 快速傅里叶变换分析 技术基础知识

1.1 前 言

1965年 Cooley 和 Tukey 提出了简称 FFT 的快速傅里叶变换(fast Fourier transform)的算法。这一重要发现,使傅里叶变换在计算机上的计算时间减少到原来的几百分之一,因而使傅里叶变换能实际应用于波形分析等方面。目前广泛使用的 FFT 分析仪,是一种小型化的装置,该装置配备了 A/D 变换器和便于观察的显示器,并可连接绘图仪以便将计算结果画成图谱,使用时只要操作面板开关,就能方便地进行分析。

FFT 分析仪发展到今日,除了 FFT 算法本身以外,还得益于数字电子电路技术的进步,其中特别是因电子电路的大规模集成(LSI)化而带来的超小型化、轻量化以及高度的可靠性。此外,开发相关的软件,简化了 FFT 分析仪的使用,完善了分析仪的功能,并能适应其主要的用途;改进设计技巧和提高生产技术;降低了成本等,也都起了不可忽视的作用。

如今,各种类型的 FFT 分析仪纷纷涌现,这大大地方便了用户。利用 FFT 分析仪,不仅能高速地应用于波形分析,提高其精度,而且使许多以往不可能实现的事情一举而成为可能,可以说这是划时代的进步。

在 FFT 分析仪问世之前,也可以对所记录的模拟量数据进行 A/D 变换,然后再用通用计算机进行分析。但是,这种分析方法所需要的劳力和时间相当可观,简直可以说是上一个朝代的老古董。此外,在使用 FFT 分析仪之前,也曾制造过相关仪之类的仪器,并

在相当的范围内使用过。这种仪器,虽然也应用于波形分析,但与FFT分析仪在本质上完全不同。因此,数字相关仪现在已经完全停产,也几乎无人使用。

这样,FFT分析仪就成为分析音响和振动波形的有力工具,它的应用范围今后将越来越广。

然而,FFT分析仪也存在一些欠缺。例如,我们不能把经过巧妙设计,以致达到“黑箱”(black box)化的FFT分析仪,当作一种“数据制造机”,以为只要一按按钮,分析结果就会源源不断地产生出来。我们如不深入考察数据的含义,而只是一味不断地采集数据,则最后虽然可获得庞大的数据,但却可能百思不得其解,不能掌握其内含的规律;或者是囫圇吞枣,只抓住表面现象,以致得出错误的结论。这样还称得上是什么新型精密的仪器!对于这样复杂的装置,不可能也不应该要求用户完全掌握其中的“黑箱”奥秘,但却应该而且必需正确理解它们能做些什么。

从这个观点出发,本章试图从总的方面叙述FFT的基本原理。

1.2 傅里叶变换

设时间函数 $x(t)$ 定义于区域 $-T/2 \leq t \leq T/2$,则 $x(t)$ 可以用以正弦和余弦函数为基波的傅里叶级数表示,其中正弦和余弦函数以定义域为周期。即可展开成如下形式:

$$\begin{aligned} x(t) = & A_0 + A_1 \cos 2\pi \frac{1}{T} t \\ & + A_2 \cos 2\pi \frac{2}{T} t + \cdots + B_1 \sin 2\pi \frac{1}{T} t \\ & + B_2 \sin 2\pi \frac{2}{T} t + \cdots, \end{aligned} \quad (1.1)$$

式中系数 A_n 、 B_n 称为傅里叶系数,它们可根据沿整个定义域的积分来确定:

$$\left. \begin{aligned} A_0 &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt, \\ A_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos 2\pi \frac{n}{T} t dt, \\ B_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin 2\pi \frac{n}{T} t dt. \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

将式(1.1)的两边乘上 $\cos 2\pi \frac{n}{T} t$ 或 $\sin 2\pi \frac{n}{T} t$, 并沿 $-T/2 \sim T/2$ 进行积分, 也就不难理解可以应用式(1.2)确定 A_n, B_n 了。

例如

$$\begin{aligned} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos 2\pi \frac{n}{T} t dt &= A_0 \int_{-T/2}^{T/2} \cos 2\pi \frac{n}{T} t dt \\ &+ A_1 \int_{-T/2}^{T/2} \cos 2\pi \frac{1}{T} t \cos 2\pi \frac{n}{T} t dt + \dots \\ &+ A_n \int_{-T/2}^{T/2} \cos 2\pi \frac{n}{T} t \cos 2\pi \frac{n}{T} t dt + \dots \\ &+ B_1 \int_{-T/2}^{T/2} \sin 2\pi \frac{1}{T} t \cos 2\pi \frac{n}{T} t dt + \dots \\ &+ B_n \int_{-T/2}^{T/2} \sin 2\pi \frac{n}{T} t \cos 2\pi \frac{n}{T} t dt + \dots, \end{aligned} \quad (1.3)$$

式中由于

$$\begin{aligned} \int_{-T/2}^{T/2} \cos 2\pi \frac{n}{T} t dt &= \begin{cases} 0 & n \neq 0, \\ T & n = 0; \end{cases} \\ \int_{-T/2}^{T/2} \cos 2\pi \frac{m}{T} t \cos 2\pi \frac{n}{T} t dt &= \begin{cases} 0 & n \neq m, \\ T/2 & n = m \neq 0; \end{cases} \\ \int_{-T/2}^{T/2} \sin 2\pi \frac{m}{T} t \cos 2\pi \frac{n}{T} t dt &= 0 \\ \int_{-T/2}^{T/2} \sin 2\pi \frac{m}{T} t \sin 2\pi \frac{n}{T} t dt &= \begin{cases} 0 & n \neq m, \\ T/2 & n = m \neq 0. \end{cases} \end{aligned}$$

所以可得到式(1.2)。

式(1.1)使用正弦和余弦函数, 是由于其各频率分量具有相位差, 也即同 $\cos 2\pi f t$ 在时间轴上产生一定的偏移。显然, 式(1.1)

也可以按下述方式分别用 $\cos$ 或 $\sin$ 单独表示:

$$\begin{aligned} & A \cos 2\pi ft + B \sin 2\pi ft \\ &= \sqrt{A^2 + B^2} \left(\frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}} \cos 2\pi ft + \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}} \sin 2\pi ft \right). \end{aligned}$$

这里, 试观察图 1.1 所示的直角三角形. 设在该三角形中 A 与 $\sqrt{A^2 + B^2}$ 之间的夹角为 ϕ , 则根据三角形的定义:

$$\cos \phi = \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}, \quad \sin \phi = \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}},$$

可将上式改写成

$$\begin{aligned} & A \cos 2\pi ft + B \sin 2\pi ft \\ &= \sqrt{A^2 + B^2} (\cos \phi \cos 2\pi ft + \sin \phi \sin 2\pi ft) \\ &= \sqrt{A^2 + B^2} \cos(2\pi ft - \phi). \end{aligned}$$

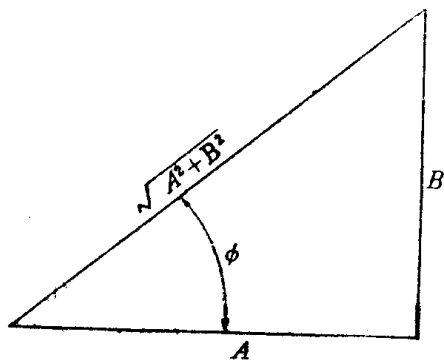


图 1.1 以 A 和 B 为直角边的直角三角形

因此, 式(1.1)可改用如下的表达式:

$$\begin{aligned} x(t) = \frac{1}{T} \bigg\{ & C_0 + C_1 \cos \left(2\pi \frac{1}{T} t - \phi_1 \right) \\ & + C_2 \cos \left(2\pi \frac{1}{T} t - \phi_2 \right) + \dots \\ & + C_n \cos \left(2\pi \frac{n}{T} t - \phi_n \right) + \dots \bigg\}, \end{aligned} \quad (1.4)$$

式中

$$C_0 = A_0 T,$$

$$C_n = T \sqrt{A_n^2 + B_n^2},$$

$$\phi_n = \tan^{-1} \frac{B_n}{A_n}.$$

如设 $\phi_0 = 0$, 则式(1.4)又可用下式表示:

$$x(t) = \frac{1}{T} \sum_{n=0}^{\infty} C_n \cos\left(2\pi \frac{n}{T} t - \phi_n\right). \quad (1.5)$$

这样, 定义于 $-T/2 \leq t \leq T/2$ 区域内的时间波形, 就可表示成具有各自振幅和相位的余弦函数之和。在式(1.5)中, 需要从 $n=0$ 到 $n=\infty$ 对无穷项求和。但在实际上, 不可能也无必要计算到无穷项。

在图1.2和图1.3的(a)与(b)中, 分别画出了按式(1.5)将锯齿形波和半正弦波展开成傅里叶级数时, 只由第1~第2阶谐波合成的波形和合成到第6阶谐波的波形。将它们与原来波形作比

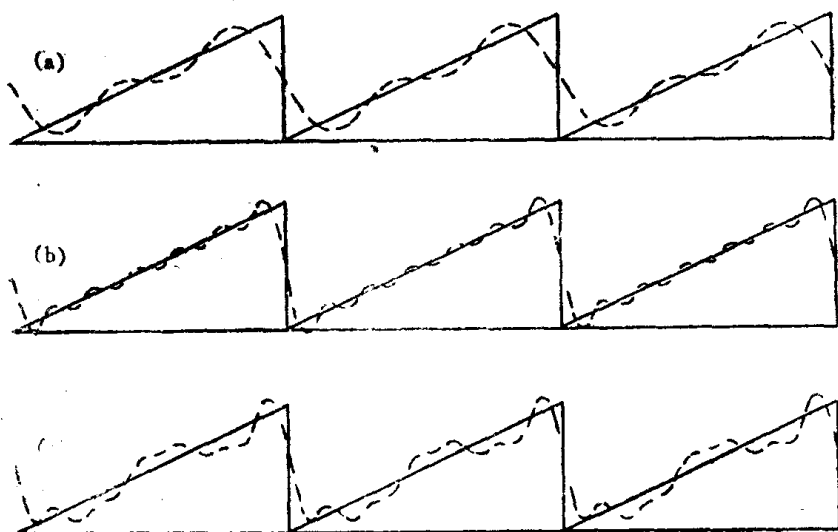


图 1.2 锯齿形波及其由谐波合成的近似波形

- (a) 合成到第2阶谐波的近似波形; (b) 合成到第6阶谐波的近似波形;
(c) 将第2阶谐波分量滞后 45° 的近似波形。

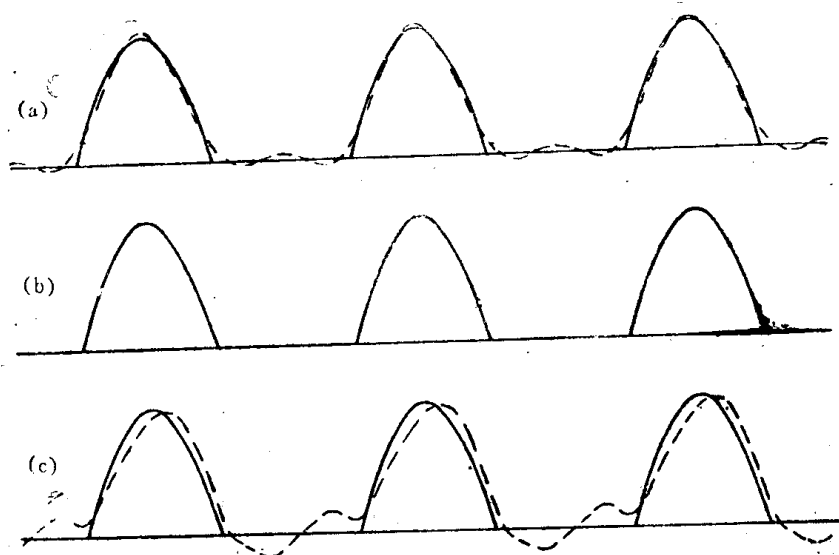


图 1.3 半正弦波及其由谐波合成的近似波形

- (a) 合成到第 2 阶谐波的近似波形；(b) 合成到第 6 阶谐波的近似波形；
(c) 将第 2 阶谐波分量滞后 45° 的近似波形。

较后可见,对于波形随时间变化迅速的锯齿波形,合成到第 2 阶谐波的波形的近似程度较差;而对于波形随时间变化缓慢的半正弦波,合成到第 2 阶谐波的波形已经相当近似了。

在以上两图的(c)中,画出了只将组成这些波形的第 2 阶谐波分量的相位滞后 $45^\circ (\pi/4)$,而其余分量保持原有相位不动时,合成到第 6 阶谐波的近似波形。由此可见,各谐波分量的相位关系对于波形的复原,起着重要的作用。

图 1.4 表示用傅里叶级数展开若干种波形时,系数 C_n 的计算结果, C_n 显示出各谐波分量的大小。在图 1.4 中,横坐标为频率,第 n 项频率分量就为 $n/T [\text{Hz}]$ 分量。这些频率分量分别用对应于 $n=0, 1, 2, \dots$ 的谱线表示,所以用 C_n 表示的频率结构就称为离散谱。频谱图是用离散谱表示的波形,设离散谱的间隔为 f_0 ,则波形只在 $T=1/f_0$ 长的时间区域(即 $-T/2 \sim T/2$)内有定义,超

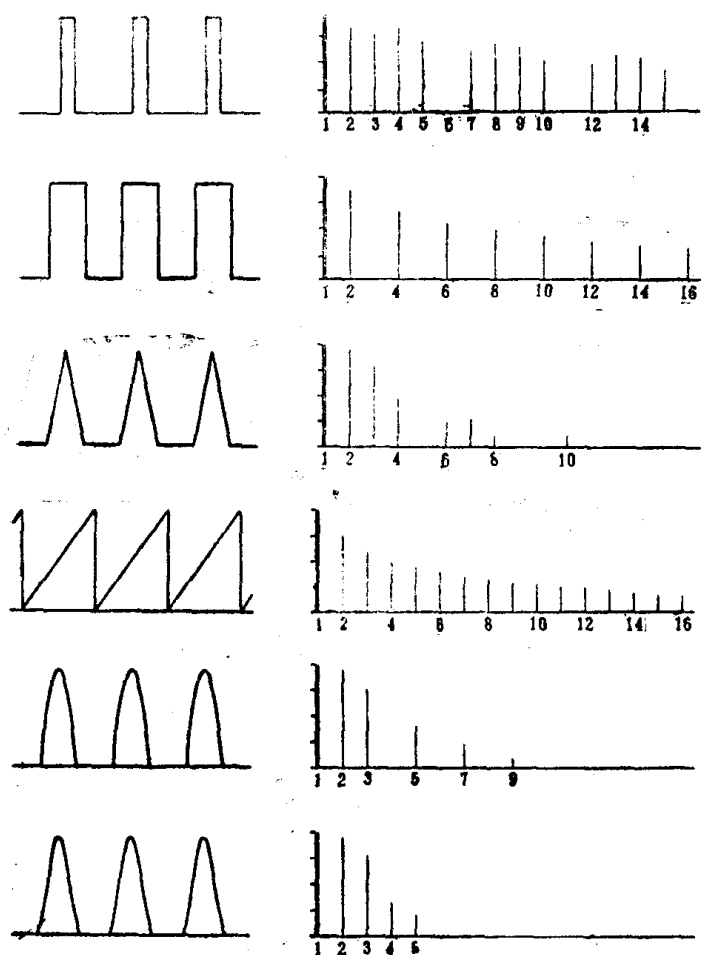


图 1.4 各种周期的方波、三角波、锯齿波、半正弦波以及余弦隆起波的离散谱

出这个时间范围，可根据三角函数的周期性，完全重复相同的波形。

由于在计算 A_n 和 B_n 时，定义波形的时间域 $-T/2 \sim T/2$ 可以任意扩展，所以当处理无周期性的波形时，在计算式(1.5)的系数 C_n 的公式中，可取极限 $T \rightarrow \infty$ 。这时，以 n/T 表示的频率分量在频率轴上就连续排列，这种频率结构称为连续谱。