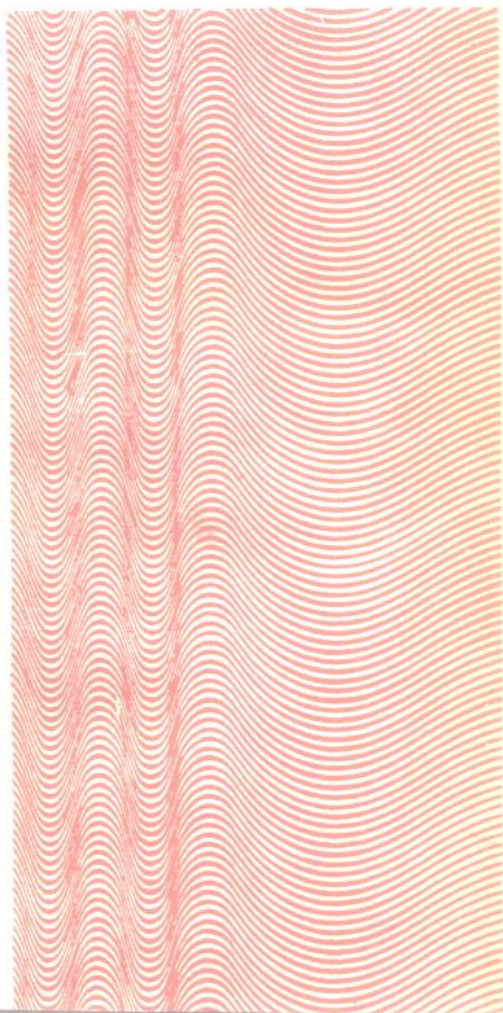


# 信息傳輸 的新方法

張其善 李植華 著



2

中航出版社

73.410  
122  
10

D657/25

# 信息传输的新方法

张其善 李植华 著

图书情报出版社

1014111

## 内 容 简 介

本书以非正弦正交函数理论作为信息传输的基础, 主要介绍多路信息传输的一种新方法。第一章介绍一些基本知识; 第二章论述沃尔什函数的复制理论; 第三章研究沃尔什函数在多路传输中的有关问题; 第四章重点讨论序率分割传输系统; 第五章探讨统一模型及其应用, 提出了一种新的正交函数——标函数。

本书可供从事通信、遥控、遥测和雷达工作的技术人员、科研人员以及高等院校的师生参考。

## 信息传输的新方法

张其善 李檀华 著

责任编辑: 宋 纯

\*

宇航出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

七〇七印刷厂印刷

\*

开本:  $787 \times 1092 \frac{1}{32}$  印张: 7.125 字数: 165千字

1989年12月第1版第1次印刷 印数: 1—2500册

ISBN 7-80034-251-4/TN·011 定价: 3.30 元

# 序

本书是一本研究沃尔什函数及其在通信中应用的著作。包括著者多年来关于沃尔什函数理论和应用的研究成果。

沃尔什函数的起源可以追溯到 20 世纪初期。当时有人提出了取“+”、“-”二值的跃变非正弦型的正交函数系。到了 20 年代初，数学家沃尔什等人发展了这种函数的数学理论，得到了一个完备正交函数系，取名为沃尔什函数。但此后数十年间，沃尔什函数并未引起人们的注意，因而，研究和应用方面的进展不大。60 年代以来，由于数字技术和电子数字计算机技术的飞跃发展，以及跃变函数的“+”、“-”二值和计算机的 0、1 码有着形式上的自然相似，人们对沃尔什函数重新感到兴趣。半导体、集成电路的发展为在工程上产生和运用沃尔什函数提供了理想的器件。通过理论上的深入论证和在应用上的探索，使沃尔什函数得到了新的发展。

在此基础上，~~本书~~著者对沃尔什函数进行了理论与实际相结合的深入研究。

在理论上，著者从研究沃尔什函数的编号开始，揭示了沃尔什函数的本质，~~按一定的信息~~以一定的方式复制成的函数序列。从而提出了一类新的沃尔什函数的编号。它和国外提出的沃尔什、佩利、哈达玛三种编号并列而构成一个完整体系。其后，在沃尔什复制的基础上，著者提出了一种新的三位“-1”、“0”、“+1”的非正弦型正交函数系，并

命名为桥函数。桥函数不仅包括了常用的沃尔什正交函数系和矩形脉冲正交函数系，而且也包括了许多介于沃尔什函数和矩形脉冲函数之间的非正弦的三值正交函数系。因此，可以把桥函数看成是联系沃尔什函数和矩形脉冲函数的一种中介函数。正如其名的含义，它起到了两种函数之间的桥梁作用。

在实践中，著者以序率复用理论为根据，研制成了沃尔什分割制多路遥测系统。在研制过程中，解决了系统设计和设备的许多理论与实际问题，如沃尔什副载波的选择方法，沃尔什函数系相关函数的计算方法等，取得了多项国际上领先的成果。

上述这些在理论上和实践中创新的成果构成了本书的主体内容。该书不仅突出地体现了理论结合实际的特点，同时也显示出其内容的新颖性，从而提高了它的学术水平和实用价值，为在这个领域中今后的研究和发展奠定了很好的基础。

我深信在未来的岁月中，在本书著者和广大读者相互切磋和通力合作下，这门学术不久将会取得新的飞跃性的进展。最后，我愿向本书著者致以由衷的敬意和对广大读者寄予深厚的期望。

航空航天部遥测研究所研究员 吴德雨

1988年3月

# 前 言

本书的特点在于提出一种信息传输的新方法。所谓信息传输的新方法，是指基于沃尔什函数的序率分割体制 (SDM)，而不是传统的频分多路体制 (FDM) 或者时分多路体制 (TDM)。因此，本书将围绕着如何把沃尔什函数应用到信息传输中去这一核心问题，逐步展开论述。

从结构上，本书共分为五章：第一章介绍背景和基本知识；第二章则较详细地论述沃尔什函数的复制理论；第三章的任务是研究在多路传输中应用沃尔什函数的有关问题；第四章重点讨论如何在工程上实现序率分割体制；第五章将探讨统一模型及其应用，提出了一种新的正交函数——桥函数。

本书的理论部分，是以我同清华大学副教授李植华同志几年来共同发表的有关论文为基础的。其实践部分，则是以航空航天大学课题组和兄弟单位在电路、样机和工程系统等方面所进行的研究工作为基础。可以说，在一定程度上，本书体现了理论与实践的统一。

本书得以完成，首先应感谢副教授张鸣瑞、郑铭等诸位同行的大力支持，同时也是与参加此项研究的研究生们的创造性辛勤工作分不开的。在书稿整理阶段，南京航空学院研究员谢求成同志和中国人民解放军国防科工委测量通信总体研究所高级工程师刘蕴才同志，对本书的润色加工和进一步完善给予了很大的帮助，在此一并致谢。

最后特别值得一提的是，承蒙航空航天部遥测研究所研究员吴德雨先生费心作序，使本书大为增色，作者不胜感谢。

愿本书能起到抛砖引玉之作用，欢迎读者不吝赐教。

张其善

1988年6月5日于北京

# 目 录

|                       |       |
|-----------------------|-------|
| <b>第一章 绪论</b>         | (1)   |
| 1.1 引言                | (1)   |
| 1.2 在通信中的圆和圆函数        | (4)   |
| 1.3 正弦波在无线电传输中的起源     | (6)   |
| 1.4 理想化网络的响应特性        | (10)  |
| 1.5 非正弦波的特点           | (18)  |
| 1.6 国内外研究非正弦正交函数简况    | (22)  |
| 1.7 正交性与线性独立          | (25)  |
| 1.8 数的二进制表示           | (32)  |
| 1.9 格雷码               | (35)  |
| 1.10 模 2 加            | (38)  |
| 1.11 拉德梅克函数           | (41)  |
| 参考文献                  | (45)  |
| <b>第二章 沃尔什函数的复制理论</b> | (46)  |
| 2.1 引言                | (46)  |
| 2.2 沃尔什函数的发展过程        | (46)  |
| 2.3 沃尔什函数的定义与编号       | (49)  |
| 2.4 沃尔什函数的复制理论        | (62)  |
| 2.5 沃尔什函数的统一定义        | (77)  |
| 2.6 沃尔什函数的基本特性        | (87)  |
| 2.7 小结                | (99)  |
| 2.8 附录                | (99)  |
| 参考文献                  | (103) |
| <b>第三章 沃尔什函数的相关函数</b> | (105) |

|            |                               |              |
|------------|-------------------------------|--------------|
| 3.1        | 引言 .....                      | (105)        |
| 3.2        | 信号的正交分割原理 .....               | (105)        |
| 3.3        | 只考虑波形畸变的沃尔什函数的相关函数 .....      | (110)        |
| 3.4        | 既有波形畸变又有时间位移的沃尔什函数的相关函数 ..... | (128)        |
| 3.5        | 小结 .....                      | (140)        |
|            | 参考文献 .....                    | (141)        |
| <b>第四章</b> | <b>序率分割信息传输系统 .....</b>       | <b>(143)</b> |
| 4.1        | 引言 .....                      | (143)        |
| 4.2        | 序率分割多路传输系统方案简述 .....          | (151)        |
| 4.3        | 基本电路 .....                    | (162)        |
| 4.4        | 贝斯利施沃尔什函数发生器的设计 .....         | (168)        |
| 4.5        | 误差分析 .....                    | (182)        |
|            | 参考文献 .....                    | (191)        |
| <b>第五章</b> | <b>统一模型及其应用 .....</b>         | <b>(193)</b> |
| 5.1        | 统一模型 .....                    | (193)        |
| 5.2        | 信号分割方法 .....                  | (196)        |
| 5.3        | 哈尔函数及以它为基础的遥测系统 .....         | (203)        |
| 5.4        | 桥函数和以它为基础的遥测系统 .....          | (208)        |
|            | 参考文献 .....                    | (219)        |

# 第一章 绪 论

## 1.1 引言

正交函数是电子工程特别是通信工程的数学基础之一。长期以来，在通信工程理论中一直以讲正弦余弦函数为主，因为这种正交函数在通信领域内占统治地位。理论与实践都表明正弦余弦正交函数具有良好的数学特性，利用它和由它导出的一系列数学公式，可以解决通信及其他领域中的许多问题。但是，它也不是完美无缺的。随着电子技术的发展，特别是集成电路的发展，人们开始寻求更加适合于这种工艺的理论基础和应用基础。本世纪 60 年代末期，对以沃尔什函数为代表的非正弦正交函数的研究，开拓了一条寻求新理论的道路。从 1969 年以来，对于沃尔什函数的研究，尤其是对应用研究，取得了很大的进展，目前正在稳步前进。

正交函数可以粗分为两大类：一是正弦正交函数，二是非正弦正交函数。本书将着重介绍以沃尔什函数为代表的非正弦正交函数在理论与应用研究方面的进展情况。

首先可能会遇到这样的问题：为什么要研究非正弦正交函数？非正弦正交函数为什么以沃尔什函数为代表？

为了说明上述问题，让我们回顾一下历史。迄今为止，通信理论基本上以正弦、余弦正交函数作为它的数学基础。一般说来，在通信中使用正弦函数，是与线性时不变的电路元件做成实际可用的形式密切相联系的。然而如果每件事物

在时间上都是不变的，那么就不能传输任何信息。报务员的电键，话筒和调幅器都是线性的，但又是时变的器件，不打电话，不对话筒发话或者不把时变调制电压馈送到调制器，传输信息也就停止了。对于信息传输来说，保持时间变化这个条件是一个非常基本的要求。随着问题的复杂程度的增加，就迫使我们用变系数方程来描述系统。正、余弦函数不适用于描述时变系统。

正、余弦函数在通信中的应用成功使人们的注意力集中于时间信号。在已出版的有关滤波器的书籍中，讲述的几乎都是有关时间信号的问题。然而，在自然界中存在着大量的空间信号问题，例如黑白照片就是具有两个变量的空间信号。照片上各处的灰度可以表示为笛卡尔坐标中的  $X$  和  $Y$  的函数，或者表示为极坐标中的  $r$  和  $\varphi$  的函数。电视信号是一种具有两维空间变量和一维时间变量的时-空信号。可见有许多信息并不是仅由时间变量组成的。

正弦、余弦函数最重要的特点之一是：大多数用于通信中的时间信号，都可以表示为正弦和余弦函数的叠加，傅里叶分析就是进行这种分析的数学工具，它将时间函数变换成频率函数。这一点常被许多人看成是必然的事，以致于把话筒和电传发报机的输出电压，主观上认为仅仅是许多正弦和余弦函数的叠加。实际上，用正弦和余弦函数表示时间函数，只是许多函数表示法中的一种。任何一个完备的正交函数系，一般都能用来进行相当于傅里叶分析中的级数展开和用来进行与傅里叶变换相当的变换。因此，可以认为：话筒的输出电压或是沃尔什函数，或是勒让德多项式，或是抛物圆柱函数等等的叠加。

在傅里叶分析中，任何一个时间有限的信号要占有无限的频带，而任何频带有限的信号又要占有无限的时间。所以任一有限信号都占据时间——频率域的无限段。

在理想化网络的响应特性分析中，滤波器在未加入电压之前就产生输出电压。事实上显然是不可能的。

以上几点都说明正、余弦函数虽然可以解决通信中的许多问题。但是，它仍然是不够完善的。

从历史发展的角度看，在科学发展的道路上，往往是某项技术获得突破，与此有关的理论及其应用就获得迅速发展。19世纪初，通信技术中使用的最重要的函数是方块形脉冲，到19世纪末，由于制成了可供使用的电容器，正弦函数第一次获得了实际应用。但是由于所制成的电容器容量很小，而且物理结构也不方便，因此，正、余弦函数的应用仍受相当的限制。直到19世纪末20世纪初制成了用来分离不同频率正弦波的实际谐振电路，1915年又做成了用电感和电容器组成的低通和带通滤波器后，才开始了广泛应用正、余弦函数的新时代。

从技术发展的角度看，通信技术经历了电子管、晶体管时代，现在进入了集成电路时代。集成电路和数字电路的进展，数字计算机的普遍使用，促进了通信系统的数字化，这为沃尔什函数和其他非正弦函数的应用提供了物质基础。

有人指出，非正弦载波信号的产生以及对它的调制当然处于现代技术的范围之内。然而从评论员的观点来看，在辐射和接收这些信号时，可能会产生很多困难，对保证接收和传输所需波形的天线系统的设计，如果不是不可能的话，看来也是很困难的。

问题提得非常正确，研制实际的辐射器和接收机是一个很困难的任务，而且还有许多问题有待解决。哈尔姆斯曾介绍了由恰普曼所创造的辐射器。制造这种辐射器时，需要不寻常地把理论知识，实验技巧和个人毅力三者结合起来。凡是尝试过制造这种辐射器的人都会很容易地证实这点。用1975年的技术和测量设备来进行非正弦波的实验，其困难程度大约和1900年用正弦波作实验一样，大多数人都会发现。不同电子管和示波器，而用莱顿瓶作电容器，用铅笔芯作电阻，用象牙或琥珀作为绝缘体来研制正弦波发射机和接收机，如果说不是不可能的话，那么也是相当困难的。

正弦正交函数、非正弦正交函数都有它各自的优点，可以相信，在科学发展的历史长河中，它们必将发挥各自的长处，作出各自的贡献。

## 1.2 在通信中的圆和圆函数

在天文学中，天文学家托勒密曾经用圆代替球体来描述行星的运动。它把五大行星，太阳和月亮看成是，沿着称之为中心轨迹圆的主圆，围绕地球运动。叠加在中心轨迹圆上的是副圆，称为周转圆（如图1-1所示），另一个周转圆就叠加在第一个周转圆上，如此继续下去。说得确切一些，就是用圆的叠加来表示行星的轨迹。托勒密用36个圆来表示太阳、月亮和五大行星的轨道，但这样做还不能与所观测到的数据完全符合，于是就提出用更多的圆以便更好地表示行星轨道的方法。哥白尼把宇宙运动的中心，从地球的附近移到了太阳的附近，但是他仍然局限于用圆的叠加来表示行星

的轨道。对于水星的轨道要用 11 个圆来描述，金星和地球各用 9 个圆，月亮用 4 个圆，其余的行星每个用 5 个圆。这样加起来共用了 48 个圆。

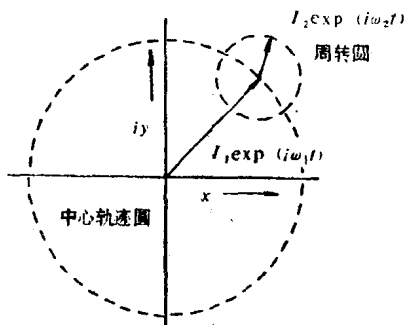


图1-1 天文学和电气通信中圆的叠加

1609年，开普勒终止了这种用圆的叠加来描述行星轨道的方法，在他所写的“天体中的行星”一书中，提出了用椭圆来描述行星的轨道。这样就能更好地与观测到的数据相符合，而且方法更为简单。

一般人都以为是开普勒终止了圆周运动学说的应用，但情况并非如此。圆周运动学说从天文学中消失了，却在其它的科学领域内又以另一种面目重新出现。在电气工程和物理学的一个重要组成部分中，又遇到了这个过去的老相识，而赋予了新的名称——指数函数  $e^{i\omega t}$  或复数平面内的单位圆。凡是具有一般电气通信知识的人，一定不会把图（1-1）看成是一个中心轨迹圆和一个周转圆的叠加，而只会理解为使用复数符号的两个正弦振荡函数  $I_1 \exp\{i\omega_1 t\}$  和  $I_2 \exp(i\omega_2 t)$  的叠加。的确，图（1-1）是一幅用正弦信号对正弦波进行单边调制的标准示意图。说得通俗些，是把托勒密和哥白尼的圆的叠加，变成了用复数表示的傅里叶级数的展开。

实数拓扑群的特征群表示式，看起来似乎与圆周运动无关，但是它的数学符号  $\{e^{ixy}\}$  却能揭示出本质。这个特征群

意味着空间-时间的连续拓扑，而这个拓扑又使得把微分运算用于空间和时间的函数成为可能。考虑到微分运算在物理中的普遍应用，我们不得不怀疑，圆周运动学说对今天物理学的影响，是否会象它当年对天文学所造成的影响一样大。

探索和研究圆周运动学说的隐迹是沃尔什函数复制理论的一个任务。重新回顾一下上述天文学方面的某些问题是值得的。一个椭圆轨道可以用圆的叠加来表示，而不会产生收敛或可微分的问题。过去关于周转圆的概念是对的，只是造成不必要的复杂。根据以太阳位于一个焦点的各个椭圆来表示各行星的轨道的简化方法，终于导致万有引力定理。

### 1.3 正弦波在无线电传输中的起源

正弦波在无线电通信中的广泛应用，使人们觉察不到这个事实：它并非一向如此。海里希·赫芝（1893年）在其实验中运用火花放电产生了电磁波。这种波今天称之为有色噪声。在赫芝的这一实验后的20年间，碳电极之间的电弧以及火花隙放电便是当时产生电波的主要方法，无线电信号就由所迸发出来的或长或短的有色噪声组成。旋转式高频发生器和电子管的研制成功才最终导致了正弦电流及正弦电波的产生。

需要在几部发射机同时工作的情况下，有选择地接收信号，是促使正弦波得到广泛应用的强大动力。马克斯韦尔<sup>①</sup>曾研究了由线圈和电容器组成的电路的一种现象，这种现象

---

① “电容器的静电电容和线圈的电磁自感的组合”，1891。

现在称之为谐振。许多人曾致力于这种现象的理论和实现方法的研究,但是,是否只有正弦波才具有谐振现象呢?显然,还没有什么人曾认真地提出过这一问题。因此,传统的发射机和接收机的研制都是以正弦波为基础的。

下面讨论谐振现象的数学基础。齐次微分方程

$$(d^2v/dt^2) + \omega_0^2 v = 0 \quad (1-1)$$

的通解为

$$v(t) = V_1 \sin \omega_0 t + V_2 \cos \omega_0 t \quad (1-2)$$

用外力函数<sup>①</sup>  $\omega_0^2 v_f(t)$  代换方程 (1-1) 右面的零得

$$(d^2v/dt^2) + \omega_0^2 v = \omega_0^2 v_f(t) \quad (1-3)$$

该非齐次方程的通解由式 (1-2) 给出的齐次方程的通解加上非齐次方程的一个特解组成。寻求这一特解的传统方法是系数变换法,即拉氏变换法。然而,在简单情况下往往通过猜测一个特解来简化求解过程。

令  $v_f(t)$  为正弦函数:

$$v_f(t) = V \sin \omega t \quad (1-4)$$

猜出式 (1-3) 的一个特解如下:

$$v_p(t) = V_0 \sin \omega t \quad (1-5)$$

用  $v_p(t)$  代换  $v$ , 用式 (1-4) 的力函数代换式 (1-3) 中的  $v_f(t)$  就得到  $V_0$ :

$$V_0 = \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} V,$$

---

①  $t$  为时间单位,  $\omega_0$  以时间的倒数为单位, 运用  $\omega_0^2 v_f(t)$  而不是  $v_f(t)$ , 就能保证  $v_f(t)$  具有电压单位。

$$v_p(t) = \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} V \sin \omega t \quad (1-6)$$

显然，猜出的这一特解除了 $\omega = \omega_0$ ，即所谓谐振状态以外，对 $\omega$ 的其他值均成立。对于谐振状态，只好另猜一个解：

$$v_p(t) = V_0 \omega_0 t \cos \omega_0 t + V_1 \omega_0 t \sin \omega_0 t \quad (1-7)$$

在式(1-3)中，用 $v_p(t)$ 代换 $v$ ，用 $V \sin \omega_0 t$ 代换 $v_f(t)$ 就求得 $V_0$ 和 $V_1$ ：

$$V_0 = -\frac{1}{2}V, \quad V_1 = 0 \quad (1-8)$$

因此谐振时方程的特解为

$$v_p(t) = -\frac{1}{2}V \omega_0 t \cos \omega_0 t \quad (1-9)$$

将谐振的纯数学概念与简单电路的谐振联系起来。图

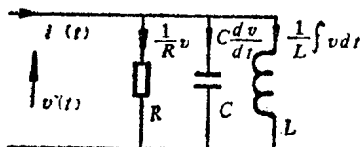


图1-2 并联谐振电路

(1-2) 是一个由电感 $L$ 、电容 $C$ 和电阻 $R$ 组成的并联谐振电路。流入电路的电流 $i(t)$ 和电路两端的电压 $v(t)$ 之间的关系用下列微分方程表示：

$$\frac{1}{R}v + \frac{1}{L} \int v dt + C \frac{dv}{dt} = i(t) \quad (1-10)$$

对上式求导并整理可得