

耿富录 编著

# 现代模拟信号处理技术 及其应用



国防工业出版社

# 现代模拟信号处理技术 及其应用

耿富录 编著

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书从工程应用角度出发,讨论了现代模拟信号处理的基本理论、工作原理、系统组成、方案设计和性能分析,并较全面地介绍了现代模拟信号处理在雷达、通讯、声纳、电子对抗等系统中的应用实践。为便于读者阅读和掌握本书的主要内容,对现代模拟信号处理的关键器件——声表面波器件(SAWD)和电荷耦合器件(CCD)也作了介绍。

本书较全面地反映了70年代末至80年代中期国内外现代信号处理的发展水平、应用实践和最新科研成果。因此,本书特别适合于从事雷达、通讯、声纳、电子对抗、宇航和遥测遥控信号处理的科技人员作技术参考书,也可供有关大专院校教师、研究生和高年级学生作教学参考书。

### 现代模拟信号处理技术及其应用

耿富录 编著

国防工业出版社出版、发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码100044)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

787×1092 1/16 印张19<sup>5</sup>/<sub>8</sub> 52千字

1990年5月第一版 1990年5月第一次印刷 印数: 00,001—2,300册

ISBN 7-118-00374-3/TN·75 定价10.80元

## 致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分，又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展，加强社会主义物质文明和精神文明建设，培养优秀科技人才，确保国防科技优秀图书的出版，国防科工委于1988年初决定每年拨出专款，设立国防科技图书出版基金，成立评审委员会，扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是

1. 学术水平高，内容有创见，在学科上居领先地位的基础科学理论图书；在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖，内容明确、具体、有突出创见，对国防科技发展具有较大推动作用的专著；密切结合科学技术现代化和国防现代化需要的高科技内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值，密切结合科学技术现代化和国防现代化需要的新技术、新工艺内容的科技图书。

4. 填补目前我国科学技术领域空白的薄弱学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展评审工作，职责是：负责掌握出版基金的使用方向；评审受理的图书选题，决定资助的图书选题和资助金额，以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书，由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就，积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下，国防科工委率先设立出版基金，扶持出版科技图书，这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版，随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物，是对出版工作的一项改革。因而，评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进，这样才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授，以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来，为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗！

国防科技图书出版基金

评审委员会

**国防科技图书出版基金**  
**第一届评审委员会组成人员**

**主任委员：**邓佑生

**副主任委员：**金朱德 太史瑞

**委 员：**尤子平 朵英贤 刘琯德  
(按姓氏笔画排列)

何庆芝 何国伟 张汝果

范学虹 金 兰 柯有安

侯 迁 高景德 莫梧生

曾 铎

**秘 书 长：**刘琯德

## 前 言

现代信号处理主要分为数字信号处理和模拟信号处理两大部分。模拟信号处理包括常规模拟信号处理和现代模拟信号处理。最近 10 多年来发展起来的现代模拟信号处理是以声表面波器件 (SAWD) 和电荷耦合器件 (CCD) 为基础的。现代模拟信号处理具有中等处理精度, 主要特点是设备简单、结构紧凑、高速实时处理、成本低廉、功耗较小、性能稳定。现代模拟信号处理的许多独特信号处理功能是目前数字处理技术难以实现的。10 多年来, 现代模拟信号处理得到迅速发展, 已经从实验研究走向实用阶段, 并在雷达、通讯、声纳、电子对抗、人造卫星、导弹、宇航和遥测遥控等信号处理系统和民用电子技术中得到广泛应用。

10 多年来, 国外发表了很多有关现代模拟信号处理的论文, 但多见于各种杂志和专业会议录, 缺乏比较系统全面的资料, 国内有关现代模拟信号处理的系统资料和论著也甚少。为了满足从事这一领域研究的科技人员和大专院校的研究生及高年级学生的需要, 编者总结了多年来教学和科研中的经验体会, 并比较全面地归纳了最近几年在国内外杂志和专业会议录上发表的论文, 编写了这本《现代模拟信号处理技术及其应用》, 力图反映 70 年代末至 80 年代中期的现代模拟信号处理的基本理论、应用实践和发展水平。

本书在编写过程中, 注意到将现代模拟信号处理的基本理论和应用实践紧密结合。内容侧重于现代模拟信号处理在雷达、通信、声纳和电子对抗中的应用。并着重讨论这些应用的基本理论、工作原理、系统组成、方案设计、性能分析和典型应用实例。第 1 章为绪论, 主要介绍现代模拟信号处理的发展概况和特点; 第 2 章介绍 SAWD 和 CCD 的基础知识; 第 3 章至第 7 章的内容为现代模拟信号处理的应用, 主要包括: Chirp 傅里叶变换和卷积/相关处理; 横向滤波器和线性变换; 在脉冲压缩雷达和扩谱通信中的应用; 在多卜勒信号处理中的应用; 在电子对抗中的应用。可以看出, 本书在保持一定的系统性和逻辑性的前提下, 尽量照顾到各章内容的相对独立性。

在编写本书过程中, 得到戴树荪教授、丁鹭飞教授多方面的支持、指导和帮助; 林茂庸教授、谢沅清教授认真地审阅了本书的初稿, 并提出了许多十分宝贵的意见; 张平副教授、张守宏副教授、朱以南高级工程师、杨家德高级工程师和李跃堂高级工程师在器件应用、系统设计和技术实践等方面给予了很多具体的帮助和支持。编者谨对他们表示衷心的感谢。

由于篇幅所限, 书末只列出了主要的参考文献。编者在此向所有参考文献的作者表示衷心感谢。

限于作者水平, 书中缺点和错误之处在所难免, 敬请读者批评指正。

作 者

# 目 录

|                                                         |     |                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------|-----|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>第 1 章 绪论</b> .....                                   | 1   | <b>第 4 章 横向滤波器和线性变换</b> .....                                             | 114 |
| § 1.1 声表面波技术概述 .....                                    | 1   | § 4.1 横向滤波器 .....                                                         | 114 |
| § 1.2 CCD的发展概况和<br>特点 .....                             | 3   | § 4.2 离散傅里叶变换<br>(DFT) .....                                              | 119 |
| § 1.3 现代模拟信号处理<br>概述 .....                              | 6   | § 4.3 线性调频 Z 变换<br>(CZT) .....                                            | 122 |
| § 1.4 现代模拟信号处理的<br>应用 .....                             | 9   | § 4.4 滑动 CZT 及其应用 .....                                                   | 130 |
| <b>第 2 章 CCD 和 SAWD 基础</b> .....                        | 12  | § 4.5 素数变换 (PT) .....                                                     | 135 |
| § 2.1 CCD 的基本结构和工<br>作原理 .....                          | 12  | § 4.6 CCD 自适应滤波器 .....                                                    | 138 |
| § 2.2 CCD 的信号输入和输<br>出方法 .....                          | 19  | <b>第 5 章 SAW 技术和 CCD 在脉冲<br/>        压缩雷达和扩谱通信中<br/>        的应用</b> ..... | 150 |
| § 2.3 CCD 的主要性能参数<br>和分类 .....                          | 24  | § 5.1 概述 .....                                                            | 150 |
| § 2.4 声表面波叉指换能器 .....                                   | 35  | § 5.2 SAW 线性调频脉冲压<br>缩技术 .....                                            | 151 |
| § 2.5 声表面波信号处理<br>器件 .....                              | 46  | § 5.3 SAW 非线性调频脉冲<br>压缩技术 .....                                           | 159 |
| <b>第 3 章 SAW-Chirp 傅里叶变换和<br/>        卷积/相关处理</b> ..... | 65  | § 5.4 用 CCD 产生和处理线<br>性调频信号 .....                                         | 166 |
| § 3.1 Chirp 变换理论 .....                                  | 65  | § 5.5 相位编码脉冲压缩<br>技术 .....                                                | 172 |
| § 3.2 SAW Chirp 变换处理<br>器的性能分析 .....                    | 70  | § 5.6 SAW 扩谱通信技术 .....                                                    | 188 |
| § 3.3 SAW Chirp 变换处理<br>器的应用 .....                      | 77  | § 5.7 SAW 频率合成器 .....                                                     | 203 |
| § 3.4 组合式 SAW Chirp<br>变换处理器的应用 .....                   | 84  | <b>第 6 章 在雷达多卜勒信号处理中<br/>        的应用</b> .....                            | 214 |
| § 3.5 SAW 卷积/相关处理 .....                                 | 92  | § 6.1 CCD 动目标显示相<br>消器 .....                                              | 214 |
| § 3.6 SAW-数字式甚高速<br>信号处理 .....                          | 104 | § 6.2 CCD-MTI 自适应<br>处理 .....                                             | 232 |
|                                                         |     | § 6.3 外相参动目标显示 .....                                                      | 247 |

|                                |                               |     |            |                        |     |
|--------------------------------|-------------------------------|-----|------------|------------------------|-----|
| § 6.4                          | CCD动目标检测 .....                | 251 | § 7.1      | 概述 .....               | 285 |
| § 6.5                          | 用CCD实现的脉冲多<br>卜勒信号处理 .....    | 264 | § 7.2      | SAW信道化接收机 .....        | 286 |
| § 6.6                          | CCD/SAW脉冲多卜<br>勒雷达信号处理器 ..... | 278 | § 7.3      | SAW压缩式接收机 .....        | 290 |
|                                |                               |     | § 7.4      | 在ESM干扰系统中<br>的应用 ..... | 298 |
| 第 7 章 SAW技术在电子对抗中<br>的应用 ..... |                               |     | 参考文献 ..... |                        | 304 |
|                                |                               |     |            |                        |     |

# 第 1 章 绪 论

数字集成电路 (Digital Integrated Circuits, 简称DIC)、电荷耦合器件 (Charge Coupled Devices, 简称 CCD) 和声表面波器件 (Surface Acoustic Wave Devices, 简称SAWD) 是60年代末、70年代初发展起来的现代信号处理器件, 它们是现代信号处理系统的主要组成部分。DIC是纯数字信号处理器件, 发展最快, 应用最广泛。CCD是采样-模拟信号处理器件, SAWD是纯模拟信号处理器件, 这两类器件虽然不及DIC应用广泛, 但它们各自具有许多独特的信号处理功能, 而且某些信号处理功能是目前数字信号处理技术难以实现的。

SAWD是60年代末期发展起来的一种新颖的现代模拟信号处理器件。SAW 技术是声学 and 电子学相结合的一门边缘学科。SAWD具有大带宽、小时宽的特点。由于 SAW 的传播速度只有电磁波的约十万分之一, 而且在 SAW 的传播途径上很容易进行采样和处理, 因此SAWD具有超小型化的优点, 并能高速、实时完成各种信号处理功能。CCD是70年代初期发展起来的采样-模拟信号处理器件, 它是自发展金属-氧化物-半导体技术以后半导体技术最大的突破。CCD是一种大时宽、小带宽的信号处理器件, 兼有数字和模拟信号处理的优点, 无需A/D变换。采用SAWD和CCD构成的信号处理系统, 具有功能集成度高、结构简单、高速实时处理信号、低成本、低功耗、高可靠性等优点, 其处理精度中等。特别在系统结构简单、实时处理信号和低成本等方面, 是一般数字信号处理技术所不能相比的, 而且还有不少信号处理功能也是目前的数字技术难以实现的。因此, 在很多现代信号处理系统中采用CCD和SAWD完成各种复杂的信号处理功能, 在雷达、通讯、声纳、电子对抗、人造卫星、导弹、宇航和遥测遥控等系统中得到越来越多的应用。近年来在民用电子技术中, CCD和SAWD也得到迅速推广应用 (例如, CCD摄像器和电视中的各种SAW滤波器)。

80年代初期以来, 超大规模数字集成电路也在高速发展, 并且在功能集成度、处理速率等方面已接近SAWD和CCD。目前的发展趋势是将SAWD、CCD和DIC三类现代信号处理器件配合使用, 取长补短, 充分发挥各自的特点, 构成更加完善的信号处理系统。

## § 1.1 声表面波技术概述

### 1.1.1 发展概况

声表面波是一种沿着各向同性固体表面传播的弹性波。早在大约一百年前, 人们就对此种波进行了研究。1885年, 瑞利在对地震波的研究中, 从理论上阐明了各向同性固体表面上弹性波的特点。但是, 由于受到当时科学技术水平的限制, 这种弹性表面波一直没有得到实际应用。直到60年代, 由于半导体平面工艺以及激光技术的发展, 出现了大量人造压电单晶, 才为声表面波技术的发展提供了必要的技术条件和物质基础。1949

年,美国贝尔电话实验室发现了铌酸锂 ( $\text{LiNbO}_3$ ) 单晶。1964年该公司又公布了激发弹性表面波的平面结构的换能器专利。特别引人注意的是,1965年怀特 (R. M. White) 和沃尔特默 (F. W. Voltmer) 二位学者在应用物理杂志上发表了题为“一种新型的 表面波的声-电换能器——叉指换能器”的论文。这一关键性的技术突破,为声表面波技术的发展打下了牢固的基础。但是,最初并未引起足够重视,在1966年美国电气与电子工程协会 (IEEE) 的超声会议上,有关声表面波的文章只有二篇。直到1967年,国外才开始对声表面波技术进行有意识的、认真的开发和研究。在这一年的美国IEEE超声会议上,第一次成立了一个单独的声表面波分组会,并且提出七篇论文,内容主要涉及声表面波的基础理论。与此同时,英国伦敦大学的埃立克·阿斯 (E. A. Ash) 提出了把声表面波器件作为无源器件应用于电子技术的倡议。1968年的IEEE超声会议上成立了一个特邀分会,提出了微声器件-微波电磁器件的声学模拟概念,介绍了一些新的SAWD,并对它们的应用前景作出了明确的估价,从而开辟了声学 with 电子学相结合的声表面技术领域。此外,这一年在技术实现上还取得了重大突破:美国斯坦福大学的研究小组,在 $\text{LiNbO}_3$ 上用怀特和沃尔特默提出的叉指换能器结构,在相对带宽20%的范围内取得了仅有4dB的声电变换损耗,使人们更清楚地看到了声表面波实用的光明前景,并大大加速了声表面波技术的研究工作。因此人们普遍认为,1968年是声表面波技术的一个重要转折点和里程碑。自此以后,声表面波技术就走上了迅速发展的道路。

到了1972年,IEEE超声会议上有关声表面波的论文就增加到95篇,占会议论文总数的62%,1975年IEEE超声会议的论文又增加到107篇。60年代末期,欧美各国从事声表面波研究的人数还不足一百人。时至今日,从事声表面波技术研究的人员已经遍及欧、美和亚洲的各著名大学、重要研究机构和有关的公司。在短短的十几年时间内,不断研制出各种新的SAWD,并开始从实验研究进入实用和系列化生产阶段,已经在雷达、通讯、声纳、电子对抗、宇航系统和民用电子技术等方面产生了重大影响。

70年代中期,利用压电体的非线性效应研制成弹性卷积器,随后又利用声表面波场对邻近半导体的表面势之间的非线性关系和二极管阵列的存贮效应研究出了声表面波卷积器和存贮相关器等。它们都具有自适应的信号处理功能。它们所具有的优异性能用目前的数字信号处理技术是很难实现的。

在国内,声表面波技术是从1970年以后开始研究的,发展也很迅速。1979年10月、1980年4月和1984年11月相继召开了全国第一届、第二届和第三届声表面波学术会议。在科学院、某些重要的高等学院和很多专业研究所都成立了专门的声表面波研究机构。已经研制出很多新的SAWD,并从实验试制阶段走向实用和系列化生产阶段。

### 1.1.2 SAW技术的特点

从1965年发明SAW叉指换能器以后,SAWD的研制蓬勃开展,到70年代初期已进入实用阶段。一方面由于信号处理技术迅速发展的需要,另一方面由于半导体平面工艺的不断改进,使SAWD的频率从100MHz量级迅速扩展到GHz量级。SAWD的基本结构如图1.1所示。在压电基片上蒸发2000埃的金属薄膜,一般为铝膜,经过光刻形成叉指形换能器。叉指电极指条宽度 $a$ 与电极间距 $b$ 一般都相等。假设叉指换能器的声同步频率为 $f_0$ ,声表面波波长为 $\lambda$ ,声表面波的传播速度为 $V_s$ , $\lambda = V_s/f_0$ ,则通常取 $a = b$

$=\lambda/4$ 。对于一对正、负叉指, 周期长度  $L=\lambda$ , 见图 1.1。以 ST 切割的石英基片为例,  $V_s \approx 3200\text{m/s}$ , 如果声同步频率  $f_0=100\text{MHz}$ , 则指宽  $a$  和指间距  $b$  只有  $8\mu\text{m}$ 。

当电信号加到输入叉指换能器, 若信号频率与叉指换能器的声同步频率相等, 通过逆压电效应, 将输入电信号转换成声信号, 并沿着基片的表面传播, 最后由基片右边的输出叉指换能器将声信号转换成电信号输出。对沿基片表面传播的声波进行采样和变换, 并使叉指换能器指条重迭长度或指间距离按一定函数规律进行“加权”, 就可以得到要求的传递函数, 并能完成各种信号处理功能。

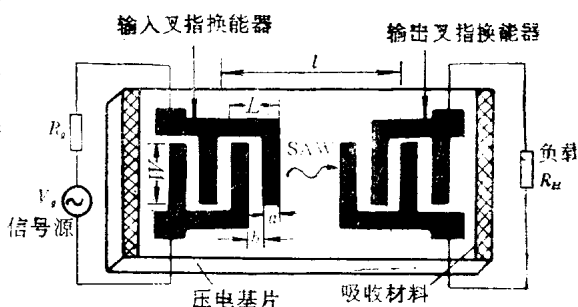


图1.1 SAWD的基本结构

SAW技术的主要特点如下:

(1) 尺寸小、重量轻、结构紧凑 SAW的传播速度比电磁波速度约低 $10^5$ 量级。一般来说, 信号处理所用的电磁器件的尺寸是与波长相比拟的。同理, SAWD是电磁器件的声学模拟, 它的尺寸则与信号的声波波长相比拟。因此SAWD的尺寸和重量比相同频率相同功能的电磁器件要小得多, 例如, 传输路径约为1cm的SAW延迟线的延迟时间, 与大约1km长的微波电缆传输线的延迟时间相当。由此表明, SAWD具有结构紧凑、重量轻和超小型化的优点。

(2) 设计灵活、能实现复杂的信号处理功能 由于SAW沿着压电晶体表面传播, 因而在输入和输出端之间很容易对信号进行采样和变换。这就使SAWD的设计很灵活, 可以用非常简单的方式实现其它器件难以完成的各种复杂的信号处理功能, 例如完成Chirp傅里叶变换、信号的卷积或相关, 以及在脉冲压缩雷达、扩谱通信系统和电子对抗中的各种复杂的信号处理功能。

(3) 频率范围宽、时宽带宽乘积大 SAWD是大带宽、小时宽器件, 工作频率范围从高频、甚高频一直到 $2\sim 3\text{GHz}$ 数量级, 器件的带宽在理论上可达100%, 时宽带宽乘积可高达 $10^4$ 数量级。

(4) 抗辐射能力强、动态范围大 因为SAWD的工作是利用晶体表面的弹性波, 不涉及电子的迁移过程, 所以抗辐射能力强, 动态范围也很大, 可达100dB。

(5) SAWD是一种无源器件, 当使用某些单晶材料(例如ST石英基片)或复合材料时, 器件具有极高的温度稳定性。此外, 由于SAWD是在单晶材料上用半导体平面工艺制作的, 所以它的一致性和重复性好, 易于大量生产。

## § 1.2 CCD的发展概况和特点

### 1.2.1 发展概况

电荷耦合器件CCD是大规模半导体集成电路的一支后起之秀。在CCD问世之前, 半导体表面理论, 特别是关于硅-二氧化硅界面的理论研究不断取得新成就; 金属-氧化物

-半导体 (MOS) 集成电路工艺日趋成熟。因此人们对半导体表面的认识和控制能力有了很大提高。1970年, 波依里 (W. S. Boyle) 和史密斯 (G. E. Smith) 在探讨磁泡器件的电模拟过程中构思出了电荷耦合器件的概念, 并迅速经过实验得到了验证, 演示了第一个CCD的模型。在此之前, 荷兰飞利浦公司于1969年发表了斗链器件 (简称BBD) 的论文, 随后美国通用电气公司又发表了技术相类似的表面电荷晶体管 (简称SCT)。这三种器件通常统称为电荷转移器件, 简称为CTD。它们都是利用电荷包沿着半导体表面转移而传输信息的模-数相结合的新颖器件, 其中发展最快、应用最广的是电荷耦合器件CCD。

CCD技术的问世, 被认为是自发展金属-氧化物-半导体技术以后半导体技术的最大突破, 并将在它的各个应用领域中产生重大影响。因此从CCD出现开始, 各国都很重视, 并相继投入相当多的人力和物力进行研究, 发展很快。虽然CCD的出现只有十多年时间, 就已经显示出这种模-数相结合的新型器件在性能上的独特优点和应用上的广阔前景。CCD的迅速发展和广泛应用主要是基于制造和功能方面的优点: 集成度高、功耗小、成本低; 在制作上和MOS工艺兼容, 不需要增加新的复杂设备; 是模-数相结合的器件, 既能处理模拟信号, 又能处理数字信号; 具有时间延迟、存贮和光电变换等功能。

CCD主要有三个方面的应用: (1) 在摄像技术方面有独特的优点; (2) 大容量的CCD存贮器能满足计算机技术应用; (3) 在最近几年, 在现代模拟信号处理这一领域中, CCD正在产生很大的影响, 并得到日益广泛的应用。十多年来, 通过大量的实验验证、理论分析和对器件结构的不断改进, CCD的性能有了很大进展。电荷转移效率和电荷转移级数是CCD的重要技术性能, 电荷转移效率已经从最初的99%数量级提高到99.9999%, 电荷转移的级数也可以达到2000。国内是从1975年前后开始研制和生产CCD的, 发展也很迅速。在摄像技术方面, 国内已研制出转移单元从256至2048的系列化CCD摄像器件, 并已开始在空中摄像、红外夜视设备和其它有关电子技术中得到应用。在现代模拟信号处理方面, 已经研制和生产出几十种系列化的CCD延迟线、CCD抽头延迟线、CCD横向滤波器、CCD匹配滤波器等等, 并且已经开始在雷达系统、通信系统、声纳系统、电子对抗和语音信号处理等方面得到应用。

### 1.2.2 基本原理和技术特点

电荷耦合器件的雏形是在P型或n型硅单晶衬底上生长一层厚度约为1000~1500埃的优质二氧化硅层, 然后再在二氧化硅层上蒸发一层间距很小的并排铝电极, 形成金属-氧化物-半导体结构, 再加上适当的输入端和输出端, 就构成了CCD的基本组成部分, 如图1.2所示。

最简单的三相CCD是用三个相位相差三分之一个时钟脉冲周期的时钟脉冲来驱动的。电极1、4、7...与第一相时钟脉冲 $\phi_1$ 相接, 电极2、

5、8...与 $\phi_2$ 相接, 电极3、6、9...与 $\phi_3$ 相接, 如图1.3所示, 图中只画出CCD一位的三个电

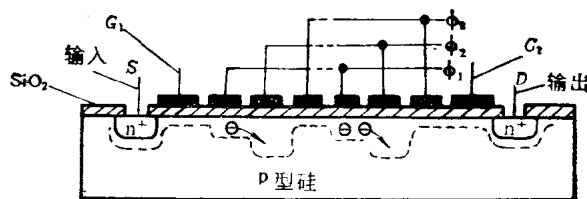


图1.2 CCD的结构示意图

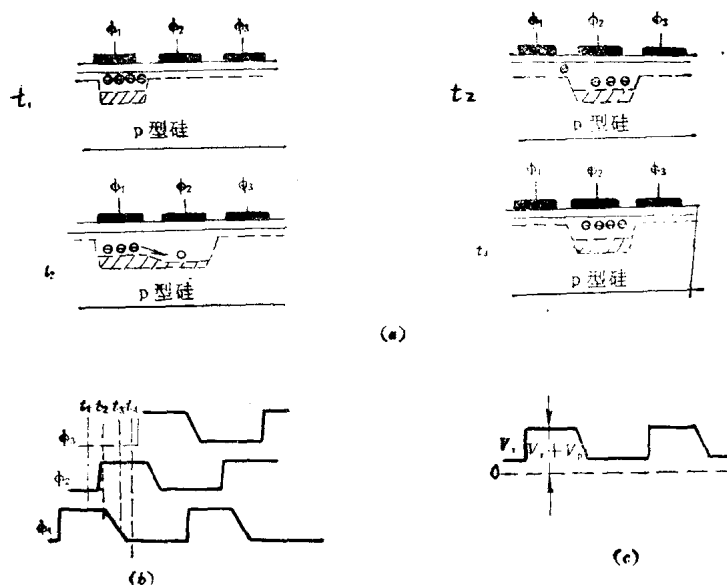


图1.3 三相 CCD电荷转移过程和时钟波形

(a) 电荷转移过程; (b) 和 (c) 时钟波形。

极1、2、3。当在某一电极加上时钟脉冲电压 $V_c$ 时,该电极下的半导体处于深度耗尽状态,耗尽区又称为势阱,势阱深度也称为表面势,与 $V_c$ 成正比。控制这些电极上时钟脉冲有规律地变化,可以相应地控制各电极下势阱的变化,使存储在势阱中的少数载流子作定向转移。图1.3示出用p型硅作衬底的三相一位CCD的电荷转移机理。对于p型硅衬底的n沟道CCD而言,加在金属电极上的时钟脉冲电压 $V_c$ 是正值,它在 $V_1$  ( $V_1 > 0$ )和 $V_1 + V_2$ 之间变化, $V_1$ 为时钟脉冲的幅度,如图1.3(c)所示。如果对于n型衬底的p沟道CCD, $V_c$ 则是负的。通过 $V_c$ 随时间的变化,可在不同的电极下形成势阱。在 $t_1$ 时刻, $\phi_1$ 有最大值,电极1下面的势阱最深。当有少数载流子注入后,势阱逐渐变浅。在时间 $t_2$ , $\phi_2$ 上升,但 $\phi_1$ 尚未开始下降,由于势阱1下面有电荷,势阱较浅,因而可使电荷从电极1下面的势阱逐步向电极2下面的深势阱转移。到 $t_3$ 时刻, $\phi_1$ 下降,电极1下面的势阱更浅,有更多的电荷转移到电极2下面的势阱之中。在时间 $t_4$ , $t_4 = t_1 + T/3$ , $T$ 为时钟脉冲周期,所有的电荷都转移到电极2下面的势阱中。依此类推,在时间 $t = t_1 + T$ 时,注入的电荷从电极1经过电极2、3全部转移到电极4下的势阱中,即完成了数字信号一位的转移。这就是三相CCD电荷转移的过程。关于CCD工作原理的详细讨论以及CCD的结构和分类,将在第2章中进行。

CCD作为信号处理器件,最重要的参数是电荷转移效率和转移速率。假设第 $n$ 个电极下的信号电荷为 $Q_n$ ,转移到下一个电极时电荷为 $Q_{n+1}$ ,损失的电荷量为 $Q_n - Q_{n+1}$ ,则电荷转移损失率为:

$$\varepsilon = \frac{Q_n - Q_{n+1}}{Q_n} \quad (1.2.1)$$

电荷转移效率 $\eta$ 为:

$$\eta = 1 - \varepsilon = \frac{Q_{n+1}}{Q_n} \times 100\% \quad (1.2.2)$$

设输入电荷量为 $Q_0$ ，电荷转移 $N$ 次后输出电荷为 $Q_N$ ，当 $\varepsilon$ 很小时，CCD总的转移效率为：

$$\eta^N = \frac{Q_N}{Q_0} = (1 - \varepsilon)^N \approx 1 - N\varepsilon \quad (1.2.3)$$

由此可知，如果要求转移次数 $N$ 较大，则必须要求 $\varepsilon$ 很小。若 $N\varepsilon=0.1$ ，总的转移损失为10%。那么对于三相CCD，当转移级数为330(电荷转移次数为 $330 \times 3$ 次)，则要求 $\varepsilon \leq 10^{-4}$ ，或者 $\eta \geq 99.99\%$ 。

CCD的时钟频率控制信号采样和转移效率。时钟频率越高，势阱中的电荷因来不及转移而损失较大；时钟频率过低，深耗尽状态将受热效应产生的暗电流噪声而向平衡状态过渡。电荷转移效率和转移速率还与CCD的结构有关。图1.3所示的CCD结构称为表面沟道CCD，简称为SCCD。理论分析和实验结果表明：采用长 $10\mu\text{m}$ 的转移电极，在 $5 \sim 10\text{MHz}$ 频率下能有效地工作；而 $7.5\mu\text{m}$ 的转移电极的实验型SCCD，则可在 $20\text{MHz}$ 频率下工作，转移效率为 $10^{-3}$ 。1972年以后，又发展了一种埋沟型电荷耦合器件(Buried Channel CCD)，简称为BCCD。与SCCD相比，BCCD的转移效率更高，转移速度也很高，时钟频率可达 $100\text{MHz}$ 以上，但线性动态范围一般来讲不及SCCD。

在信号处理中使用的CCD，主要有如下特点：

(1) CCD是一种采样-模拟器件 在时间上按数字时钟周期对信号进行采样；在幅度上不需要对信号进行数字分层，而是将采样的模拟量以“电荷包”形式在器件中转移，这就可以省去成本昂贵而且体积较大的模-数(A/D)变换器和数-模(D/A)变换器。

(2) 设计灵活、具有多种信号处理功能 由于CCD的设计比较灵活，根据信号处理功能的需要，已经研制出各种不同功能的专用CCD：串入-串出(SI/SO)CCD延迟线、递归或非递归滤波器；串-并-串(S-P-S)型CCD多路延时积分器；并入-串出(PI/SO)和串入-并出(SI/PO)CCD，对各单元进行非破坏性抽头加权，可以做成抽头延迟线、横向滤波器、CZT处理器、相关器等，采用外部加权和计算机程控还可以实现自适应信号处理。此外，还有一种结构新颖的串-并-横-串CCD，它可以完成数据重排和时间压缩，特别适合于脉冲多卜勒雷达信号处理。

(3) 工艺上和MOS半导体结构相容，便于系列化生产、成本较低、功耗较小。在CCD和数字技术相结合的系统中，具有更大的灵活性。

(4) 动态范围可达60dB，时宽带宽乘积大于 $10^3$ 量级。

(5) 体积小、重量轻、耗电省、成本低。

### § 1.3 现代模拟信号处理概述

前面已经提到，用SAWD和CCD构成的现代模拟信号处理系统，具有很多独特的优点，而且某些信号处理功能是一般数字技术很难实现的。在这里，我们从信号处理增益；处理速率和处理效率；处理精度、动态范围和灵活性；可靠性、稳定性，抗干扰和抗辐射能力；工艺性和系列化等几方面介绍现代模拟信号处理的功能和特点，并与数字技术进行比较。

### 1.3.1 信号处理增益

在现代信号处理中，通常用可以处理的信号的时宽（ $T$ ）和带宽（ $B$ ）的乘积表示信号处理增益。时宽 $T$ 代表可以处理的信号时间长度（即信号的持续时间或信号的存储时间）；带宽 $B$ 表示可以处理的信号频率范围。信号处理增益  $G_{SP}$  定义为

$$G_{SP} = 10 \log(TB) \text{ dB} \quad (1.3.1)$$

图 1.4 示出 DIC、SAWD 和 CCD 的时宽、带宽范围，可以看出，SAWD 具有大带宽特性，带宽  $B$  在  $1\text{MHz} \sim 1\text{GHz}$  之间，时宽带宽乘积  $TB$  可达  $10^4$  量级。但是 SAWD 的时宽是有限的，一般在  $100\mu\text{s}$  以下，级联使用可达  $200\mu\text{s}$ 。对于数字集成电路：常用的 CMOS 器件的带宽为  $10\text{MHz}$ ；速度更高的 HCMOS 器件的最大工作带宽可达  $100\text{MHz}$ 。对于常用的  $n$  沟道 SCCD<sub>i</sub>，带宽上限为  $10\text{MHz}$ ，时宽为毫秒量级，而埋沟型 CCD 的带宽则可达  $100\text{MHz}$  以上。注意上述三种器件都有共同覆盖区域，这就为三种器件的混合使用时提供了基础。

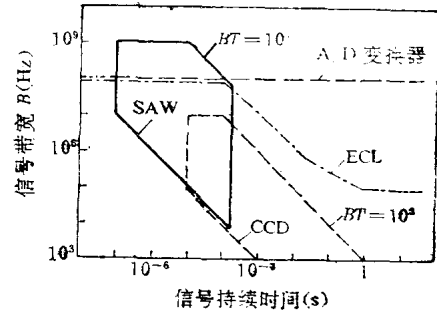


图1.4 DIC、SAWD和CCD的时宽、带宽范围

### 1.3.2 处理速率和处理效率

在雷达、扩谱通信、声纳、电子对抗等信号处理中，都要求具有高速、实时的处理能力。就此而论，目前一般的数字处理技术远比不上 SAWD 和 CCD。以各种傅里叶变换处理器为例，目前的数字式 FFT 的处理速率比用 SAWD 和 CCD 实现的傅里叶变换的处理速率相差  $10^2 \sim 10^4$  量级。

表 1.1 仅列出几种属于“相同量级”的傅里叶变换处理器的性能比较。显然，用计算机实现的 FFT 的处理速率还可以大大提高，但是设备量也随之急剧增加，而且成本更加昂贵。因此为了得到更加简明的比较，还可以用单元投资（元）与每秒的乘积所对应的处理点数（点/元·秒）来说明系统的处理效率。一般来说，数字式 FFT 的处理效率比采用 SAWD 和 CCD 实现的傅里叶变换的处理效率要差  $10^2 \sim 10^5$  量级。

表1.1 各种傅里叶变换处理器性能比较

| 处理器类型            | 特 性            | 处理速率<br>点/秒       | 估计成本<br>(元) | 处理效率<br>点/元·秒 |
|------------------|----------------|-------------------|-------------|---------------|
| 微处理机FFT          | 变换1024点需 250ms | $4 \times 10^3$   | 10,000      | 0.4           |
| 硬件FFT            | 变换1024点需20ms   | $50 \times 10^3$  | 20,000      | 2.5           |
| CCD-DFT          | 变换1024点需 1 ms  | $1 \times 10^6$   | 8,000       | 125           |
| SAW(IDT)-Chirp变换 | 变换 100点需20μs   | $4 \times 10^6$   | 10,000      | 400           |
| SAW(RAC)-Chirp变换 | 变换3600点需60μs   | $60 \times 10^6$  | 40,000      | 1,500         |
| SAW卷积器/相关器       | 变换4000点需20μs   | $200 \times 10^6$ | 15,000      | 14,000        |

### 1.3.3 处理精度、动态范围和灵活性

数字信号处理的精度和动态范围是用比特率来衡量的。一般来讲, A/D 变换器的最大比特率是速度的反函数。对于工作速度为 10~20MHz 的典型 A/D 变换器, 比特数可达 12~14, 相当于动态范围为 70~90dB。对于 SAWD 和 CCD, 可以用一个所谓等效比特数来描述它们的相对处理精度和动态范围, 一般每一比特数对应于 6dB。

在处理精度和灵活性方面, 数字处理技术占有明显优势。SAWD 和 CCD 的相对精度一般约为 1%, 即 40dB, 可近似等效为 6 比特。影响 SAWD 精度的主要因素是制作工艺(例如叉指电极几何尺寸的精度等)和它特有的一些“二次效应”所引起的杂波干扰等。CCD 的精度主要取决于电荷转移效率、线性动态范围、热噪声以及加工精度等与制作工艺有关的因素。

图 1.5 对 SAWD、CCD 和 DIC 的相对处理精度和动态范围进行了比较。SAWD 和 CCD 的动态范围可达 60~80dB, 等效为 10~13 比特。

CCD 是用数字时钟控制的采样-模拟器件。可以和数字技术兼容, 在由 CCD 和 DIC 构成的混合信号处理系统中, CCD 可以发挥更大的灵活性。对于 SAWD, 非色散延迟线、色散延迟线和固定加权的横向滤波器等灵活性较差。最新研制的 SAW 卷积器/相关器, 理论上可以自适应处理各种信号波形, 并已开始雷达、扩谱通信和宇航技术等方面得到应用。

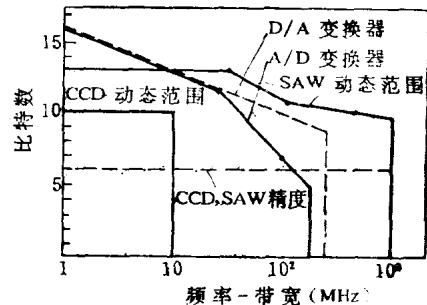


图 1.5 DIC、SAWD 和 CCD 的相对处理精度和动态范围

### 1.3.4 可靠性、稳定性、抗干扰能力

对一般信号处理系统而言, 外部电路越复杂、体积越大、功耗也增加, 因此可靠性下降。在这几个方面, SAWD 的性能最佳。由于 SAWD 本身是无源器件, 用它实现的信号处理系统功耗小、功能集成度高, 所以可靠性高, 它的温度稳定性仅与压电基片的温度系数有关。由于 SAWD 是通过声表面波的传播工作的, 因此抗电磁干扰能力较弱。

在抗辐射能力方面, 由于 CCD 是靠电荷转移工作的, 因而容易受电磁辐射影响而“软失效”。数字集成电路抗辐射能力稍好, SAWD 则受辐射影响最小。

### 1.3.5 工艺性和系列化

上述分析表明, SAWD 和 CCD 的处理速度、处理效率和功能集成度比一般 DIC 要高得多, 而精度和灵活性则有限, 三者各有长处。但是近 10 多年的发展情况表明, SAWD 和 CCD 的发展速度远不及 DIC 快, 实际应用也不如 DIC 那样广泛。其主要原因是工艺性和系列化问题。对于一种器件, 虽然具有优异的性能, 但没有工艺性和系列化的优势, 则它在工程应用上的发展速度必将受到一定的限制。

虽然 SAWD、CCD 和 DIC 都属于半导体平面工艺范围, 但却各有特殊性。如前所述, 由于 SAWD 的叉指电极的加工工艺要求较高, 因此在几百 MHz 以上就不能采用一般的集成电路工艺设备。CCD 的工艺和 MOS 集成电路基本一致, 所以起步快, 发展

迅速,成本也较低,并且易与 DIC 兼容,这些都是有利的发展条件。

在现代模拟信号处理中,根据不同的用途往往对器件的要求各不相同。而且要求的数量也不太多。对于某些特殊应用,还需要设计制作专用器件。上述这些因素给系列化和通用性带来一定困难。进入 80 年代以来,已经生产出各种 SAWD 和 CCD 的系列化产品:彩色电视机和通信设备中的 SAW 带通滤波器的系列化产品发展最快;SAW 延迟线、SAW 抽头延迟线、SAW 色散延迟线、CCD 延迟线、CCD 横向滤波器等等在系列化产品方面也得到很大发展。

### § 1.4 现代模拟信号处理的应用

十多年来,SAWD 和 CCD 无论在基本理论、设计水平、生产工艺以及系列化产品等方面都得到迅速发展。迄今为止,已经研制和生成了几十种具有各种信号处理功能的 SAWD 和 CCD 的系列化产品。并且还出现了不少 CCD-SAWD 组合部件、CCD-DIC 混合集成片,以及 GaAs 兼容 CCD 和 SAWD 的混合集成电路。SAWD 和 CCD 的应用领域并不限于信号处理,在摄像技术和数字技术中也有广泛的应用前景。一般来说,SAWD 和 CCD 适用于要求小型化、高可靠性、实时处理而具有中等精度的信号处理系统中:在大带宽和小带宽的场合通常采用 SAWD;而在大带宽和小带宽的场合则优先考虑 CCD;若将 SAWD、CCD 和 DIC 结合起来构成混合组件,互相取长补短,充分发挥各自的长处,则可以得到更加完善的现代信号处理系统。

用 SAWD 和 CCD 实现的傅里叶变换和卷积器/相关器,在信号处理中占有极为重要的地位。表 1.1 列出各种傅里叶变换处理器性能的比较:用 CCD 实现的 DFT,在 1ms 时间内可以完成 1024 点变换;用叉指换能器(IDT)的 SAW 色散延迟线实现的 Chirp 傅里叶变换,在 20 $\mu$ s 时间内可以完成 100 点变换;另一种用反射栅(RAC)结构的 SAW 色散滤波器实现的 Chirp 傅里叶变换,完成 3600 点变换只需要 60 $\mu$ s 时间;一个典型的单片式 SAW 弹性卷积器,仅在 20 $\mu$ s 时间内就能完成 4000 点变换,其处理速率是  $200 \times 10^6$  点/s,或者 5ns/点。一般来说,用 SAWD 和 CCD 完成的傅里叶变换,其处理速率比数字技术快  $10^3 \sim 10^5$  量级。

SAWD 和 CCD 正在越来越多地应用于雷达、通讯、声纳、电子对抗、卫星、导弹、宇航和遥测遥控系统的信号处理中。一种用 CCD 和 SAWD 组合构成的脉冲多卜勒信号处理器:采用 CCD 完成信号的时间压缩和采样数据重排;用 SAW 线性调频滤波器完成 Chirp 傅里叶变换,使长达毫秒量级的采样信号在数十微秒时间内完成频谱分析,以便实现对多个距离通道的信号处理。这种导弹使用的脉冲多卜勒信号处理器,在 50 $\mu$ s 内可以完成 1024 点变换,体积不超过 4500cm<sup>3</sup>、功耗 12W。体积只有相同性能的数字处理器的三分之一,功耗约小一个数量级。

现代雷达和扩谱通信系统,要求高的处理增益(例如  $G_{sp} > 30$ dB)和自适应信号处理能力。采用最新研制的 SAW 卷积器/相关器能完成这种功能。例如,一种单片式 SAW 弹性卷积器,可将 20 $\mu$ s 的伪随机码序列压缩为 5ns 的相关脉冲。整个信号处理系统的处理增益约为 32dB,而处理速率则等效为一台每秒完成  $2 \times 10^{11}$  次复数乘法和加法运算的 10 比特数字处理器。