

存贮相关卷积器理论及在通信中的应用

何世平

著

存贮相关 卷积器

理论

及

在通信中应用

东南大学出版社

TN 65

H 35

337112

存贮相关卷积器

理论及在通信中应用

·

何世平 著

国家自然科学基金

资助项目

国家博士后科学基金



东南大学出版社

(苏)新登字第102号

存贮相关卷积器

理论及在通信中应用

何世平 著

东南大学出版社出版

南京四牌楼2号

江苏省新华书店发行 南京人民印刷厂印刷

开本787×1092毫米 1/32 印张5.5625 字数130,000字

1991年9月第1版 1991年9月第1次印刷

印数: 1—1000册

ISBN 7—81023—409—9

TN·41

定价: 3.95元

2009/05

内 容 简 介

本书为声表面波存贮相关卷积器及其在扩频通信中应用的专著，系作者多年从事这方面研究的成果。书中全面系统地论述了声表面波存贮相关卷积器及其在扩频通信中应用的工作模式、工艺条件、分析理论、方法以及建立数学模型和物理模型的原理。全书共七章，第一章介绍声表面波存贮相关卷积器及应用沿革；第二、三章研究器件的工作原理和基本理论；第四、五章讨论器件的关键技术、工艺条件、亚系统及测试方法；第六章研究声表面波存贮相关卷积器空域处理模式和时域处理模式的扩频系统，分析两种模式扩频系统的抗干扰性能；第七章讨论声表面波存贮相关卷积器在谱相关扩频系统中的应用。

本书可作为声学、通信与电子系统、电子对抗及无线电电子学等专业研究生的教学参考书，亦可供有关学科的科技人员阅读参考。

序 言

扩展频谱(扩频)通信在军事通信中的C³I, JITDS等系统及电子对抗中占据着极为重要的地位,而声表面波(SAW)存贮相关卷积器又以其功能强、性能好、功耗小、体积小等优点,在扩频通信中的跳频(FH)体制、直扩(DS)体制和混合(FH/DS)体制中起着核心作用,超过了所有其它方法,使军事通信向小型化、高保密性和高抗干扰性推进了一大步。由于军事通信的需要,作者和合作者对SAW存贮相关卷积器及其在扩频系统中应用进行了较全面的研究,提出了SAW存贮相关卷积器的空域处理模型和时域处理模型,简化了扩频通信的同步系统,提高了系统的处理增益。作者提出的谱相关扩频系统,可以大大提高系统的抗干扰能力。本书内容主要根据我们研究的成果和发表的论文撰写而成。该研究项目得到国家自然科学基金和国家博士后科学基金的资助。

本书共七章,重点讲述SAW存贮相关卷积器的理论、工艺、工作模式及其在扩频通信中应用。本书既是一本专著,又可作为超声电子学、通信和电子对抗专业研究生的参考书,也可供科技工作者阅读。

本书中的研究内容始终得到作者博士后导师水永安教授、博士导师吴伯修教授和刘光廷副教授的精心指导,洪海涛博士、印建华博士和博士生蒋智亮、沈强、洪亮硕士、曹广军硕士、钟诚硕士和覃林硕士,周子新高工、杨龙其高工、母开明

高工、李有志工程师等技术人员的精心合作，国家自然科学基金会、国家博士后管理委员会、解放军电子工程学院、东南大学、南京大学、二十六所的领导和同仁的关心和支持。国防科工委学部委员陈芳允教授、东南大学童勤义教授、北方交通大学李承恕、四十四所杨家德教授、总参五十四所姬国良总工、解放军通信工程学院谢希仁教授、史世平教授、二十六所蔡起善教授等24位专家仔细阅读了原稿，指出了不妥之处，并提出了改进的建议。此外，作者的妻子胡爱红帮助打印了全文和描绘插图，在此一并致以衷心的感谢！

由于作者的水平有限和时间仓促，书中必然存在许多缺点和错误，恳切希望读者给予指正。

何世平

1991. 5.

目 录

第一章 结 论

- § 1-1 非线性SAW器件沿革…………… (1)
- § 1-2 SAW单片式存贮相关卷积器…………… (3)
- § 1-3 研究SAW存贮相关卷积器的意义…………… (5)
- § 1-4 SAW模拟-数字信号处理系统 …… (7)
- § 1-5 采用非线性SAW器件的扩频系统…………… (9)
- § 1-6 本书主要内容 …… (11)

第二章 SAW存贮相关卷积器工作原理及电路模型

- § 2-1 引言 …… (13)
- § 2-2 SAW存贮相关卷积器结构…………… (14)
- § 2-3 存贮机理 …… (16)
- § 2-4 SAW存贮相关卷积器工作原理…………… (19)
- § 2-5 电路模型 …… (27)

第三章 SAW存贮相关卷积器的理论分析

- § 3-1 引言 …… (33)
- § 3-2 瞬态模式写入过程 …… (34)
- § 3-3 参量模式写入过程 …… (41)
- § 3-4 读出过程…………… (45)
- § 3-5 色散效应的分析 …… (50)
- § 3-6 相关效率 …… (53)
- § 3-7 实验结果与讨论 …… (55)

第四章 SAW存贮相关卷积器的工艺实现和关键技术

- § 4-1 引言 (58)
- § 4-2 工艺流程 (58)
- § 4-3 ZnO薄膜性能分析 (61)
- § 4-4 聚能单向换能器分析 (69)
- § 4-5 匹配网络和封装结构 (74)

第五章 SAW存贮相关卷积器性能测试及亚系统研制

- § 5-1 引言 (79)
- § 5-2 性能测试 (79)
- § 5-3 亚系统逻辑控制性能要求 (86)
- § 5-4 亚系统的实现 (89)
- § 5-5 写信号电路 (92)
- § 5-6 亚系统存贮相关实验 (94)

第六章 SAW存贮相关卷积器扩频系统

- § 6-1 引言 (97)
- § 6-2 空域处理扩频系统模型 (97)
- § 6-3 空域处理扩频系统性能分析 (102)
- § 6-4 时域处理扩频系统模型 (115)
- § 6-5 时域处理扩频系统性能分析 (117)
- § 6-6 系统内部噪声分析 (122)

第七章 谱相关技术的扩频系统

- § 7-1 引言 (126)
- § 7-2 谱相关技术原理 (126)
- § 7-3 谱相关扩频接收机模型 (130)

§ 7-4 谱相关扩频接收机实验·····	(140)
附录 ·····	(143)
参考文献 ·····	(153)

第一章 绪 论

§ 1-1 非线性SAW器件沿革

声表面波器件自诞生以来，一直是一个十分活跃的研究领域。由于声表面波(SAW)传播速度比电磁波慢得多，且在传播过程中容易取样和进行处理，因此用SAW去模拟电子学的各种功能，能使电子器件实现超小型化和多功能化。同时，由于SAW器件在VHF和UHF频段内以十分简单的方式提供了用其它方法不易得到的信号处理功能，因此，SAW技术在雷达、通信和电子对抗中得到了广泛的应用。

SAW器件分成线性器件和非线性器件两大类，线性SAW器件利用SAW可线性叠加的性质，将叉指换能器当作声源或声接收器，指长按不同的振幅加权，指间距按不同的相位加权设计，就可以得到各种不同性能的线性器件。应用于通信系统的线性器件有带通滤波器、振荡器、抽头延迟线等。非线性SAW器件利用压电晶体的非线性相互作用或二极管的非线性产生和频及差频信号，从而制出卷积器、相关器和存贮相关器等。线性器件的脉冲响应在制成时，相应的图形已变成金属膜光刻在器件上，不能实现可编程。对非线性器件来说，这个脉冲响应是作为一个输入信号，这个输入信号显然是可以随时改变的。因此非线性器件具有可编程性能。

非线性SAW器件的主要应用背景是扩展频谱(扩频)通信、雷达和电子对抗的需要。现代扩频通信、雷达和电子对抗设备等都需要有功能很强的可编程模拟和数字信号处理器。例如：宽带直接序列或跳频信号的扩频通信系统，通常需要用高速相

关器来实现最佳检测和相关解扩^[1~4]，以便从强的背景噪声和干扰中提取微弱扩频信号；先进雷达系统要求有大动态范围匹配滤波器来检出宽带斜率可变的FM(chirp)信号或直接序列编码的脉冲信号^[5~7]；而电子对抗设备为了检测敌方信号，应具备快速谱分析的功能。所有这些系统都要求在大的动态范围内可编程的实时处理宽带信号。这些因素促进人们去开发性能优良的非线性SAW器件。

非线性SAW器件的研究在最近几年迅速发展，其实验和理论研究虽可追溯到很早^[8~10]，但成效显著的进展是在近几年，也就是当人们发现，用这种非线性效应能进行可编程信号处理时才开始的^[11~16]。非线性SAW器件最重要的信号处理功能可归纳为两大类：可编程匹配滤波和有源相关。由于这两种优异的信号处理功能，以致在第一个SAW卷积器问世后，很快就用于扩频通信系统，显示出广泛地应用前景^[17]。早在1978年Bell^[18]和Moor^[19]应用SAW抽头延迟线来解扩PSK扩频信号，但因这种延迟线的抽头是固定的，无法实现可编程，故难以实现高保密度的通信。直至1974年可编程抽头延迟线研制成功后^[20]才能对PSK扩频信号实现可编程处理，但它对其它格式的扩频信号(MSK, AWQSK……)却无能为力，1978年，美国国防部制定了发展非线性SAW器件的规划，美军装备部提供资助，由德克萨斯仪器公司和麻省理工学院林肯实验室联合研究制成功气隙式SAW卷积器^[21]，并在车载扩频电台中实地试验，效果显著，它对多址干扰的抑制能力明显优于其它器件。此后，一些技术先进的国家(如美国、苏联、英国、法国、日本、奥地利等)都投入力量研制用在扩频通信中的非线性SAW器件^[22~29]。

1980年，美国国防部资助斯坦福大学金斯登实验室研究单

片式SAW存贮相关器^[80~83]。此器件的卷积效率为-64dB,在实验室得到的相关信号时宽积为30000。1985年普渡大学博士后研究人员施瓦茨与冈赛教授等人得到美国空军科研处资助,研究出注入隔离SAW单片MZOS式存贮相关器^[40~42]。为了改善传输效率和消除衍射效应,采用了喇叭波束压缩技术,从而在340MHz频率下获得相互作用时间10 μ s器件。单片式器件是近来研究较多的结构形式,无论是在结构上还是在性能上,都比气隙式器件优越,而且有体积小、成本低、伪噪声小等优点,因此,目前被普遍采用。

§1-2 SAW单片式存贮相关卷积器

SAW单片式存贮相关卷积器是基于压电体与半导体之间非线性声电效应的信号处理器件,作为非线性SAW技术的一个分支,它具有其它同类器件所不具备的信号记忆功能。它将参考信号先存贮于存贮单元中,然后与接收信号进行实时处理,故有广阔应用前景,得到人们重视。

SAW单片式存贮相关卷积器的结构示如图1-1,首先在硅

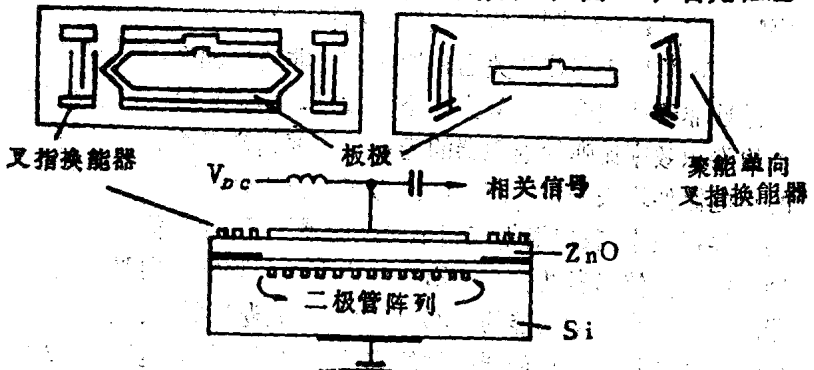


图 1-1 SAW存贮相关卷积器结构图

片上制作大规模二极管阵列，再氧化一层二氧化硅，二氧化硅层上淀积一层ZnO薄膜，在其上淀积一层金属膜作为电极。器件的两个输入共有10对叉指，工作时，参考信号加到一个输入叉指上，叉指将电信号转换成声信号，当声信号沿板极传播时，二极管阵列不断对声表面波的伴随电场取样，此时只需对板极加上一个窄脉冲，就能把声表面波的图形存贮在二极管阵列中。因此当接收信号从叉指换能器输入后，就会在板极上输出相关信号或卷积信号。

可以证明，板极输出信号电压 V_{op} 、波束宽度 W 和非线性耦合因子 M 有如下关系式：

$$V_{op} = \frac{M}{W} (P_{e1} \cdot P_{e2})^{\frac{1}{2}} \quad (1.1)$$

式中 P_{e1} 、 P_{e2} 分别为两输入端的输入功率。由此可见，要提高输出信号电压，必须增大 M 和减小 W 。对于弹性相关器和卷积器，当压电基片材料一经选定后，其非线性耦合因子 M 就成为常数，因此只有减小波束宽度 W 才能提高卷积效率。目前波束压缩器件的结构主要有三种：（1）不对称的多条耦合器；（2）喇叭形波导；（3）圆弧状的聚能叉指换能器^[43~47]。

SAW单片式存贮相关卷积器的声电非线性耦合因子 M (Si)比弹性非线性耦合因子 M 大一个数量级，所以SAW相关卷积器的卷积效率比弹性卷积器的卷积效率要提高得多，国外研制的声电器件均未采用波束压缩。为了提高SAW存贮相关卷积器的卷积效率，我们根据三相单向换能器^[48~50]和聚能叉指换能器的原理，使二者结合，在ZnO基片上研制聚能单向叉指换能器。具有波束压缩功能的ZnO/Si存贮相关卷积器，其优点为：（1）有和三相单向换能器一样的高效率和低伪信号电平；（2）有和聚能叉指换能器一样的可任意选择波束压缩率。

衡量声电器件性能的主要指标为：(1)卷积效率；(2)时带积；(3)动态范围；(4)伪信号电平。瑞利模 $ZnO-Si$ 存贮相关卷积器的机电耦合系统数较小，器件的时带积做不高，西沙瓦模的耦合系数比瑞利模大得多，采用西沙瓦模可得接近与 $LiNbO_3$ 器件相对带宽的理论值。为此我们曾试探性地研制了西沙瓦模 $ZnO-Si$ 存贮相关卷积器，并将周期性排列的二极管阵列改为随机排列的二极管阵列以减小伪信号。

§ 1-3 研究SAW存贮相关卷积器的意义

相关器和卷积器是典型的信号处理器。两个信号 $f(t)$ 和 $g(t)$ 的互相关可以表示为如下两种形式：

$$Y_{12}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau)g(\tau-t)d\tau \quad (1.2)$$

和

$$R_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)g(t-\tau)dt \quad (1.3)$$

在式(1.2)中，相关变量是时间 t ，积分变量是延时 τ ($\tau = z/v$)，积分是在空间上进行，故称为空域积分相关器，弹性或声电SAW相关器属于此类型。而式(1.3)中，相关变量是延时 τ ，积分变量是时间，故为时域积分相关器，存贮相关卷积器属于此类型。它可利用二极管结电容充电进行积分，时间积分相关卷积器在处理长持续周期、大带宽信号时显得非常重要。因为由先进的调制技术产生的调制信号，要求很大的处理增益(时带积)，这是一般空域积分器件无法获得的。如SAW卷积器的相互作用区长度把积分时延限定在 $50\mu s$ 以下(一般只有几微秒)，而存贮相关卷积器的积分时间可以是载流子的存贮时间(存贮时

间为秒级)，故它的时带积可大到 10^9 。时域积分器件除具有类似空间积分器件的处理功能外，还具有对信号进行存贮和时间反演等功能，因此，在一些大时带积的系统中，只有用时间积分器件。

在雷达接收机中，若采用空域积分相关器，就必须随时为相关器产生一个参考信号，这需要雷达信号返回时间的某些先验知识。而采用存贮相关器，不论雷达信号何时返回，都可获得信号的相关输出。在扩频系统中，如采用卷积器解扩，需要参考信号与接收信号首先建立同步。其同步系统较复杂，采用存贮相关器就无需复杂的同步系统，它可以自同步（这点在§1-5中还要讨论）。

将两种器件进行比较，SAW存贮相关卷积器除具备SAW卷积器所共有的优点外，还有如下优点：（1）参考信号存贮于器件之中，为静态的，故无需知道待处理信号何时到达，并且信号可随时处理，因此不存在“同步”问题；（2）参考信号存贮在该器件中已自动地形成为时间反转信号，所以可直接用它进行相关处理而不必再采取时间反转的措施，这时，输出信号则是真实的相关或卷积，而不是和频；（3）电信号和光信号均可存贮、卷积和相关，“写入”和“读出”信号较为灵活，且可随时将信号抹掉；（4）能实现无畸变全息（包括幅度和相位）存贮，故可在接收过程中可多次重复使用；（5）“写入”时间响应快（可短到 0.1ns ）；（6）带宽大（可大到几百兆，甚至更高）；（7）存贮时间长（从几毫秒至几天，甚至更长）；（8）可进行空域积分处理，也可进行时域积分，对持续时间很长的信号进行处理等等。

§1-4 SAW模拟-数字信号处理系统

科学技术的发展要求数字系统、模拟系统及更新的非线性 SAW 器件能实现性能更高,更复杂的信号处理器。在数字技术占有优势的今天,由于具有记忆功能的非线性 SAW 器件出现而产生的一些竞争因素^[51~56],如SAW存贮相关卷积器能在中频上分别或同时完成信号延时、加减、存贮、相关和卷积等5种处理过程,使得模拟技术的优势又突出起来。

非线性SAW器件具有处理模拟和数字信号的功能,作为模拟信号处理器时,在一定意义上说,这种非线性SAW器件是可编程的,因为输入信号 $f(t)$ 可与另一个任意格式的参考信号 $g(t)$ 卷积或相关。根据定义, $f(t)$ 与 $g(t)$ 的卷积由下式给出:

$$h(t) = f(t) * g(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau)g(t-\tau)d\tau \quad (1.4)$$

二个函数 $f(t)\exp\{j(\omega_0 - t\beta)t\}$ 和 $\exp\{j(\omega_0 - t\beta)t\}$ 分别加入卷积器,其输出可以得到 $f(t)$ 的傅里叶变换^[57~58]。若采用两个卷积器就可以进行函数的菲涅耳变换,而采用存贮相关卷积器只需要一个就可以进行菲涅耳变换^[59]。采用SAW相关卷积器作 $f(t)$ 的一般变换可用下式表示:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)g(t)h(\omega)k(\omega-t)dt \quad (1.5)$$

这样,傅里叶变换就可用图1-2所示的结构来实现。

扩频系统中的变换域滤波接收机^[60~63]由傅里叶变换器、乘法器,傅里叶逆变换器和匹配滤波器组成,其结构如图1-3所示。实质上,滤波器传递函数 $H(\omega)$ 由频域中的简单相乘来获得。

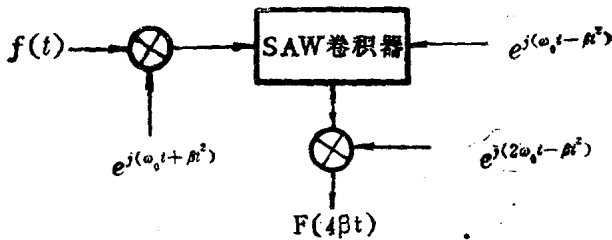


图 1-2 傅里叶变换器

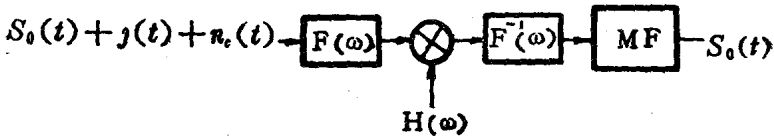


图 1-3 变换域滤波器接收机

作为数字信号处理器时，时域信号被量化成离散信号，离散信号的卷积为：

$$h_K = \sum_{l=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} f_l g_{l-k} \quad (1.6)$$

N 是所处理的点数，如将 f_l 和 g_{l-k} 表示为 $(N+1) \cdot 1$ 和 $(N+1) \cdot 1$ 矩阵，则上面的方程式可改写如下矩阵形式：

$$\begin{pmatrix} h_0 \\ h_1 \\ \vdots \\ h_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_0 & & & 0 \\ g_1 & g_0 & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ g_m & g_{m-1} & \cdots & g_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_0 \\ f_1 \\ \vdots \\ f_N \end{pmatrix} \quad (1.7)$$