声表面波 Chirp 滤波器及卷积器 组成的信号谱分析系统

吴连法 冯所椿 宗 健

(中国科学院 声学研究所) 1982,年3月5日收到

1902中5月5日收到

本文报告了两种声表面波(SAW)器件组成的频谱分析系统¹¹⁻²¹及其实验结果.使用 SAW Chirp 滤波器与 SAW 卷积器组成两种类似的实验系统,进行了连续波信号、调制脉冲信号、以及上述两种信号 同时输入的谱分析,还进行了信号加窄带干扰的谱分析.两种系统获得一致的结果.实验表明,这些 系统具有 8MHz 带宽,可分析 10 μs 时宽的信号,其等效滤波器数目等于 80.文内给出一些实验照片.

由 SAW 器件组成的谱分析系统是一种模拟信号处理系统. 它具有结构简单、实时、时带积大、体积小、重量轻及功耗低等优点,是七十年代发展起来的,颇受人们的重视. 我们在国内首次实现了由 SAW Chirp 滤波器或/和卷积器组成的两类系统.

一、谱分析系统原理

1. SAW Chirp 滤波器及卷积器

SAW 卷积器是利用声电非线性相互作用的特性实现的.图1给出了气隙式卷积器的结构. 当基体(压电单晶)表面有声表面波传播



图 1 SAW 气隙式卷积器结构

时,由于压电体的压电性将存在一个表面电场, 此电场与基体上方 ⁿ 型硅内的 载 流子相 互 作 用,从硅片顶电极输出的电信号为基体 两端 叉指换能器 输入信号 [$S_1(t)$ 、 $S_2(t)$]的卷积 [$S_3(t)$].这是一种简并式的卷积器,如图 1 所 示,对此,输入与输出信号之间的关系可表示为:

• 14 •





$$S_3(t) = \left| S_1(t) \cdot S_2(2t-\tau) d\tau \right|$$
 (1)

当 $S_1(t)$ 与 $S_2(t)$ 的中心频率相等 ($\omega_{01} = \omega_{02} = \omega_0$) 时,输出信号 $S_3(t)$ 的中心频率为 $2\omega_0$.

此类器件用于信号卷积或相关处理极为方便. 如果将 $S_1(t)$ 作为参考信号,被处理信号 $S_2(t)$ 与 $S_1(t)$ 同 时输入就可获得卷积或相关输出.

SAW Chirp 滤波器是雷达中常用的一种滤波器.图 2 给出了 Chirp 波形及几种滤波器结

1卷4期

构,其中(c)为本文采用的结构形式,称为双色 散结构. 它的特点是带宽大,但色散时延受到 基片尺寸限制,不可能很大;图 2(d)所示为沟 槽反射栅(RAC)结构,其特点是可获得较大的 色散时延,并具有良好的性能. 当 8 脉冲激励 Chirp 滤波器时,所得脉响波形如图 2(a),表示 为:

$$h(t) = A e^{i(\omega_0 t \pm \frac{1}{2}\mu t^2)}$$
(2)

式中 A 为幅度, 4 为色散斜率, 它与器 件 带 宽 (B) 及色散时延(T_o) 的关系为:

$$\mu = 2\sigma B/T_0 \tag{3}$$

Chirp 滤波器斜率有正负之分.

2. 由 SAW 器件组成的谱分析系统

众所周知,一个时间信号的谱为该信号的 傅里叶变换. 使用 SAW 器件 [Chirp 滤波器或 /和卷积器]可以很方便地实现信号的傅里叶变 换. 图 3 和图 4 分别示出合用 SAW 卷积器和 Chirp 滤波器以及单独用 Chirp 滤波器所组成的 信号谱分析系统^[1-2].



图 3 由 SAW 卷积器及 Chirp 滤波器组成的谱分析系统



图 4 由 SAW Chirp 滤波器组成的谱分析系统

如图 3 所示,当输入信号 S(t) 与 Chirp 信 号 $C_1(t)$ 相乘后再与参考 Chirp 信号 $C_2(t)$ 卷 积,卷积输出经相乘器与 $C_3(t)$ 相乘,令 $C_1(t)$ = $C_3(t)$,此过程的数学表示式为:

应用声学

$$S(2\mu t) = \left[\int S(t) \cdot C_{1}(\tau) \\ \cdot C_{2}(2t-\tau) d\tau \right] \cdot C_{3}(t) \quad (4)$$

式中

$$C_1(t) = C_3(t) = e^{-j\frac{1}{2}\mu^2}$$
 (5)

$$C_2(t) = e^{j\frac{1}{2}\mu t^2}$$
 (6)

为 Chirp 滤波器脉响. 将(5)和(6)式代人(4) 式,并化简,且令 ω = 2μt 则:

$$S(2\mu t) = \int S(\tau) e^{-j\omega \tau} d\tau = FT[S(\tau)] (7)$$

由此可见,系统输出的时间信号 S(2μt) 即为输 人信号 S(t) 的谱 S(ω).

图 4 示出单独由 Chirp 滤波器组成的频谱 分析系统基本结构形式. 其中 (a)称 M-C-M (相乘-卷积-相乘)结构, (b)称 C-M-C (卷积-相乘-卷积)结构. 两者相比, MCM 结构具有 较大的 S/N,而 CMC 结构则允许有较大的动 态范围. 用同样方法可以推导出这两种结构输 出与输入信号的关系,结果与(7)式完全一样.

二、实验用 SAW Chirp 变换 谱分析系统及其应用例

实验用 SAW Chirp 变换谱分析系统框图 与图 4(a) 基本相同,仅省略了后相乘器,见图 4(c).系统由一个相乘(混频)器及两个斜率相 反的 Chirp 滤波器组成.为了补偿 Chirp 滤波 器插入损耗,在系统中还加入两组放大器.实 验系统所采用的 Chirp 滤波器为图 2(c) 所示的 双色散型,其基体为石英单晶,性能如表 1 所 示.

表 1 SAW Chirp 滤波器主要参数

参数	Chirp I	Chirp II
中心频率 (f ₀)MHz	60	30
帯 宽(B)MHz	8	16
色散时延 (T₀)µs	10	20
斜 率 (B/T _o)MHz/µs	-0.8	+0.8

本系统所能处理的信号,其中心频率为 30 MHz、带宽 8MHz、时间长度小于 10 µs. 中心

+ 15 +



(a) 本实验系统输出谱线波形(水平刻度: 0.2µs/div)



(b) 本实验系统所得容带噪声谱(水平: 1.6MHz/div;
 垂直: 0.2V/div)



(c) 同(b),用 TF2370 所得的噪声谱(水平: 10MHz/div; 垂直: 10dB/div)

图 5 系统输出谱及与频谱仪分析结果比较

频率不在 30MHz 的信号,可经通道 Ⅱ 输入,混 频器将输入信号(高频或视频)混至 30MHz,但 信号的带宽与处理时宽与通道 I 无异,不能增 加.最后的分析结果对两个通道都是一样的.

由于本系统对被处理信号的时宽和带宽都 有一定限制,因此谱分析的结果不是无限窄的 理想谱线. 每条谱线都有一定宽度,且呈辛格 函数形状. 此外,因本实验系统中省略了后相

• 16 •



(a) 输入波形(两等幅正弦波,频率分别为 30.000 及
 30.125MHz) (水平: 5µs/div; 垂直: 0.2V/div)



(b) 波形(a) 的谱(水平: 0.8MHz/div;
 垂直: 0.1V/div)



(c)两正弦波输入的谱(左: 30.0MHz;右: 28.996MHz。
 水平: 1.6MHz/div;垂直: 0.5V/div)



⁽d) 两正弦波输入的谱 (左: 30.0MHz; 右: 26.011MHz。 水平: 1.6MHz/div; 垂直: 0.5V/div)

图6、输入的两正弦波波形及其输出谱

1卷4期



 (a) 方波调制信号为中心频率: 30.0MHz; 脉冲宽度:
 0.3µs; 重复频率: 303kHz (水平: 0.8MHz/div; 垂 直: 0.5V/div)



(b)方波调制信号为中心频率,脉冲宽度同(a) 重复频率: 500kHz(坐标同(a))



(c)方波调制信号为中心频率: 30.0MHz; 脉冲宽度:
 0.3µs;重复频率: 1008kHz,(水平: 0.8MHz/div; 垂直: 1V/div)



(d) 方波调制信号为中心频率,重复频率同(c)
 脉冲宽度: 1μs (坐标同(c))

图 7 方波调制信号的谱

应用声学

乘器和检波器,因而输出线谱内包括高频调制 及剩余 Chirp 相位,其形状如图 5(a) 所示。 图 5(b) 和 (c) 还给出本系统输出谱与 TF2370 频 谱分析仪所得谱图形的比较,这里的输入信号 是中心频率为 30MHz、带宽为 8MHz 的窄带嗓 声信号。 两者的差别是由于 Chirp 系统的输出 未经时间积累造成的。

谱线的宽度取决于时宽,同时影响了频率 分辨力^ω. 通常,用辛格函数零点来定义频率 分辨力,因而本系统的频率分辨力ΔF可写 成:

$$\Delta F = \frac{\Delta \omega}{2\pi} = 1/\min(T_{01}, T_{02}) \qquad (8)$$

因本系统所用色散时延分别为 $T_{01} = 10 \mu s$ 、 $T_{02} = 20 \mu s$,因此得 $\Delta F = 0.1 MHz$. 以同样 方式求出系统的时间分辨力 Δt 为:

$$\Delta t = 1/\min(B_1, B_2) \tag{9}$$

本实验系统 $\Delta t = 0.125 \mu s$. $\Delta F = \Delta t$ 之间的 关系可通过下式换算:

$$\Delta F = \mu \cdot \Delta t / 2 \sigma \tag{10}$$

这一系统所具有的最大处理能力 *M*,相当 于使用滤波器组作谱分析时的滤波器数,或数 字傳里叶变换的最小频率取样点数,因而*M*值 也称等效滤波器数或等效取样(变换)点数,表 示为:

 $M = B/\Delta F = \mu \cdot [\min(T_{01}, T_{02})]^2/2\pi$ (11) 对于本实验系统, M = 80.

图 6 给出了两正弦波同时输入的 输出 谱. 两正弦波频率相差 125kHz、幅度相等,波形见 图 6(a) 所示. 经本系统分析后得到如图 6(b) 所示谱线.由图可见,实际频率分辨力至少达到 0.125MHz,很接近理论值(0.1MHz).图 6(c) 与(d)分别表示当输入信号频率相差较大时的 谱线.

图 7 给出单频调制脉冲方波在不同重复频 率与脉宽时的谱.可以看出区别是明显的.如 重复频率不同,谱线密度将不同;脉宽不同,谱 线组成的辛格函数主瓣宽度也不同.系统所能 分析的调制脉冲信号重复频率不能低于 100

• 17 •



(a)输入波形
 调制脉冲(中心频率: 29.9996MHz;
 重复频率: 1009kHz; 脉宽: 0.3µs)
 连续波(频率: 29.9996MHz)
 (水平: 1µs/div; 垂直: 1V/div)



(c) 波形 (a) 及连续波频率为 30.125MHz 时的谱 (坐标同(b))



(b) 波形(a)的谱 (水平: 1.6MHz/div; 垂直0.5V/div)



(d) 波形 (a) 及连续波频率为 29.502MHz 时的谱 (坐标同(b))



kHz, 脉宽不能小于 0.125µs.

• 18 •

如将中心频率一致的调制脉冲与正弦波同 时输入时 [图 8(a)],则获得如图 8(b)所示的 谱.如果上述两信号的中心频率有偏差时,则 有如图 8(c)和(d)所示的谱.可以想见,如将 这时的正弦信号作为雷达或通信系统中引入的 窄带干扰,则接收信号经谱分析后,频域函数已 用时间函数表示.如果说用简单带通滤波器难 以消除窄带干扰的话,本系统将会为雷达与通 信设备抗干扰接收提供一种方便的手段.

三、实验用 SAW 卷积器—Chirp 滤波器谱分析系统及其应用例

系统框图与图 3 差不多一样,仅在 SAW 器

件后加入了补偿放大器. 本实验所用的 Chirp 滤波器性能与前一样,所用 SAW 卷积器的主要 性能如下:

中心频率 60(MHz); 输入带宽 11(MHz); 相互作用长度 8(µs); 卷积效率 - 50(dBm); 动态范围 >70(dB).

此外,还进行了信号加窄带干扰 [见图5 (b)]的谱分析实验.当信号-噪声比(*S/N*)为 1时[见图9(a)],所得的谱如图9(b)所示,这 里的信号是单频调制方波.可以看出,虽然输 入信号的信噪比等于1,但是输出谱中信号谱 线仍有明显峰起,即*S/N*>1. 如用时域的 一些手段(例如限幅)处理后,再将谱信号经 傅氏反变换回到时域,可望提高原有信号的 *S/N*值.

1卷4期



(a)输入信号
窄带噪声(中心频率: 30MHz;
带宽: 8MHz)
调制信号(重复频率: 500kHz;
中心频率: 30MHz; 脉宽: 0.3µs)
(水平: 1µs/div; 垂直: 0.5V/div)



(b) (a) 信号的谱
 (水平: 2µs/div; 垂直: 0.2V/div)
 图 9 窄带噪声及信号同时输入的谱

结束语

虽然本报告仅提供了两种 SAW 器件所组

(上接第48页)

又因这时 D 系统是通常半波长变幅器. 虽然如 文[2]所指出,从变幅观点, $\lambda/2$ 变幅器是一种 比较差的变幅器,但是它工作比较稳定,特别是 在较重负载下(参见文[2]§4和§6). 由文 [2]图6到图8可见,当*比1不很大时, A 在 $\lambda/2$ 处附近比较平坦,变化较小,而由文[2]式 (30)可知,其阻抗变化也较小(也可参见图9), 这就是说,此时 D 系统在负载下 Q 值较低,因而 能在相当宽的频带内工作.

因此,文[1]提供了一个在轻负载下,既能 有较高效率,又能在工具系统因磨损不断改变 固有频率下均能有效工作的超声振动系统。

我们认为,如果将磁致伸缩换能器换成电

应用声学

成谱分析系统的初步实验结果,但可以看出,这 种系统结构很简单,而且具有实时,大带宽的特 点.

该系统可直接用于测量未知信号的频率、 作谱分析;测量脉冲信号的重复频率、脉宽; 线 性调频信号的斜率测量等。还可与 CCD 器件 组合用于动目标显示及测量等等。

此外,系统的潜在应用还包括信号的抗干 扰接收,尤其有利于抗窄带干扰;还原失真信号 等.因此可以认为,这是一种具有较大应用潜 力的信号处理系统.不仅可用于雷达、通信、电 子对抗、导航中,而且与 CCD 器件组合后,还可 用于地震、机械振动、语言、声呐等系统中作谱 分析.

本项工作得到应崇福教授、汪承灏副研究 员的关心和讨论,本所魏玉兰、李丽岩、申庆凤、 许培兰、张桂云等同志为本项工作提供了实验 SAW 器件,作者谨此表示感谢.

作者还感谢空三所为本实验提供了窄带噪 声干扰组合.

参考文献

[1] O. W. Otto, Electron. Lett., 8 (1972), pp. 623-624.

[2] M. A. Jack, et al., Proc. IEEE, 68 (1980), pp. 450-468

损耗较低的压电夹心式换能器,它将能进一步 提高效率,这是因为压电换能器在最优匹配状 态下的等效辐射阻抗还可进一步提高的缘故.

以上的讨论虽然是较为粗糙的,但似乎可 说明,文[1]的实验和文[2]的理论在一些地方 可以相互映证。当然,深入的定量工作,正如文 [1]所说还有待进行。而此工作是很有意义的; 因为它在相当程度上将改变超声振动系统的传 统观念,而且使它的性能获得进一步改善。

参考文献

- 范国良,应崇福,林仲茂和彭翔,应用声学,1-1(1982), 2-7.
- [2] 汪承藻,声学学报,1(1980),12-27.

* 19 *