

无线通信用 SAW 滤波器的分析与设计*

肖尚辉** 徐继麟

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】 针对声表面波滤波器基本理论及其频域传输函数,应用电网络分析与综合理论作出等效电路,并对梯型结构声表面波滤波器中单端对谐振器的特性进行了分析。根据理论分析设计出单端对谐振器,运用该结构设计了无线通信系统中移动电话用声表面波滤波器,并给出了设计结果。

关键词 声表面波; 声表面波滤波器; 单端对声表面波谐振器; 无线通信
中图分类号 TN713⁺.1

Analysis and Design of SAW Applied to Wireless Communication

Xiao Shanghui Xu Jilin

(College of Electronic Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract The paper simply introduces the architecture and foundational principle of SAW (Surface Acoustic Wave) Filter, then by the theory of electronic network analyses and synthesis, puts emphasis on the analyses and design about one-port SAW resonator and SAW Filter applied to the RF (Radio Frequency) part of wireless mobile communication system.

Key words surface acoustic wave; SAW filter; one-port SAW resonator; wireless communication

随着无线移动通信技术的发展,人们对移动电话的需求直线上升。为规范移动通信市场,国际上建立了几种公用通信系统标准,如美国移动通信系统(AMPS)、扩展总路线通信系统(ETACS)、全球移动系统(GSM)等。以上各通信系统所使用的频率范围均不相同,但为扩大通信容量,与传统的通信系统相比,它们的射频频率都较高,使用带宽较宽,且发射端和接收端的间隔较窄。因此,各系统对关键器件即滤波器的滤波频率性能都有严格的要求。声表面波(Surface Acoustic Wave, SAW)滤波器是一种新型的信号处理器件,可以实现任意精度的频率特性,这是其他射频滤波器难以实现的,故 SAW 滤波器在电子信息领域,特别在通信中得到了越来越广泛的应用。随着 SAW 滤波器朝着小型片式化、高频宽带化、低插损、高可靠性和表面贴装等方向的发展,更将使 SAW 滤波器技术在各种信号处理、通信等领域越来越具有吸引力。

1 SAW 滤波器基本理论

SAW 是在压电基片材料表面产生并传播,且振幅随着深入基片材料的深度增加而迅速减少的

2002年5月23日收稿

* 国防科技重点实验室基金资助项目

** 男 28岁 博士生

一种弹性波。SAW 滤波器的基本结构是在具有压电特性的基片材料抛光面上制作两个声电换能器 - 叉指换能器(Interdigital Transducer, IDT)，分别用作发射换能器和接收换能器，如图1所示^[1, 2]。

发射换能器将 RF 信号转换为声表面波，在基片表面上传播，经过一定的延迟后，接收换能器将声信号转换为电信号输出。滤波过程是在电到声和声到电的转换中实现，所以可以将 SAW 滤波器等效为一个两端口的无源网络，如图2所示。图中 $H_1(\omega)$ 是发射(或输入)叉指换能器 IDT₁ 的频率响应， $H_2(\omega)$ 是接收(或输出)叉指换能器 IDT₂ 的频率响应， $H_3(\omega)$ 是 SAW 在两叉指换能器间的传输特性。设声表面波的波速是 V_s ，由于 V_s 是非色散性的，显然 $H_3(\omega)$ 可等效为一个具有一定延时 t_0 的全通时延网络。若输入和输出叉指换能器中心间的距离为 L ，则有

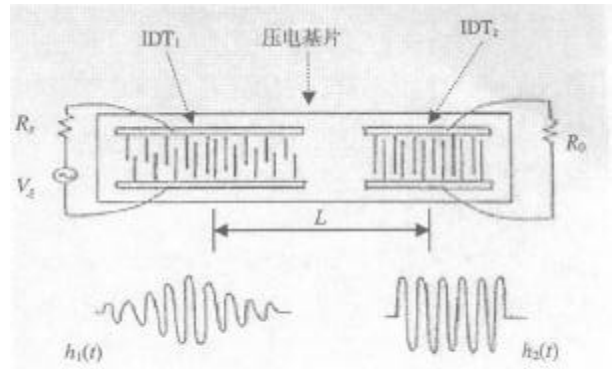


图1 SAW 滤波器结构图

$$t_0 = L/V_s \tag{1}$$

$$H_3(\omega) = A_3 \exp(-j\omega L_0 / V_s) \tag{2}$$

式中 A_3 为常数，一般记为1。于是，SAW 滤波器总的传输函数(或频率响应)是

$$H(\omega) = H_1(\omega)H_3(\omega)H_2(\omega) \tag{3}$$

应用傅里叶变换特性，在分析中考虑 $|H_3(\omega)| \approx 1$ ，因此，可以不计入 $H_3(\omega)$ 。声表面波滤波器的频率响应为 $H(\omega) = H_1(\omega)H_2(\omega)$ ，相应的脉冲响应 $h(t)$ 为 $h(t) = h_1(t) * h_2(t)$ 。

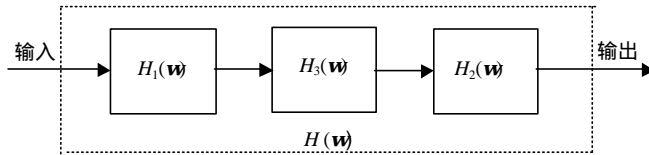


图2 SAW 滤波器的等效图

2 无线通信中用 SAW 滤波器的研究

在移动通信系统中，无论是数字式还是模拟式，其发射和接收信号的功能模块电路结构基本相同，如图3所示。在 T_x 端，在载波上对信号进行调制，通过放大电路将功率放大，然后经过 SAW 滤波器滤波后由天线将信号发出，本通道要求滤波器损耗低，可承受大功率；在 R_x 端通道，天线接收到的微弱信号经 SAW 滤波器过滤后，进行放大解调，最终获得所要的信息，要求滤波器损耗低，阻带抑制高。

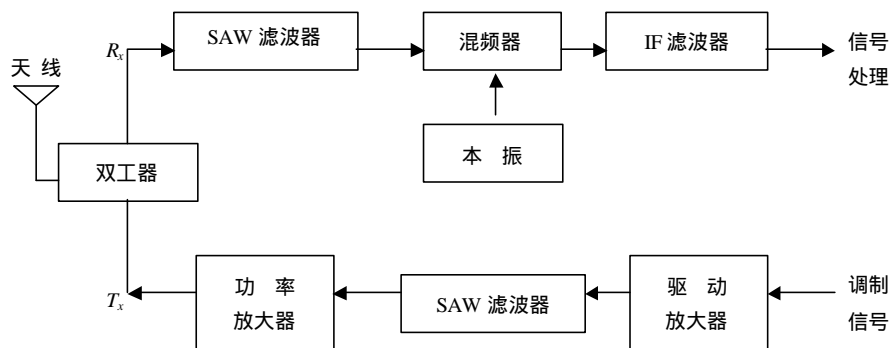


图3 GSM 系统的发射和接收模块

传统的介质滤波器一般具有损耗低、大带宽以及较高的功率承受能力等特点。但其致命的弱点是体积太大,难以适应移动电话向微型化方向发展的趋势。而 SAW 滤波器具有体积小,适合于微型封、一致性好、无须调整的优点。本文以无线通信系统中移动电话用 SAW 滤波器(其技术要求为: T_x 端中心频率 f_0 为 902.5 MHz, 带宽为 25 MHz; R_x 端 f_0 为 947.5 MHz, 带宽为 25 MHz) 为例, 介绍梯型结构 SAW 滤波器的等效电路分析, 并给出设计结果。

2.1 等效电路分析

采用网络分析与综合理论, 将梯型结构的 SAW 滤波器由单端对 SAW 谐振器来代替网络中的各个单元。此结构具有电感电容(LC)滤波器低损耗的优点, 而且可承受大功率, 体积较小。这种结构一般用来设计射频滤波器, 工作频率范围为 300 ~ 2400 MHz, 相对带宽为 2% ~ 6%, 插入损耗小于 5 dB, SAW 谐振器及其等效电路如图 4 所示。

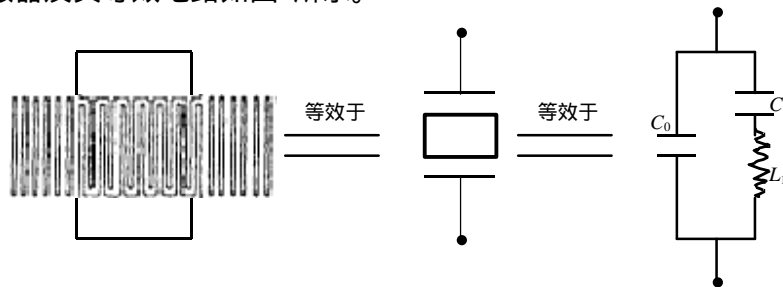


图4 SAW 谐振器及其等效电路图

图4中 C_0 为静电容, C_1 、 L_1 分别为动态电容、动态电感, 等效电路忽略了动态电阻。梯型 SAW 滤波器基本结构如图 5 所示。

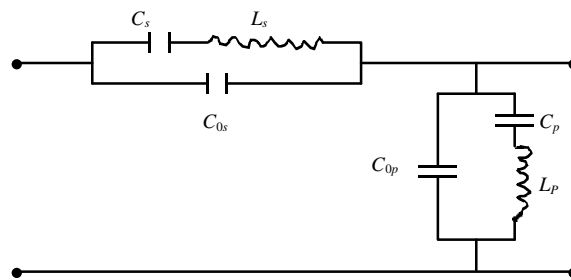


图5 梯形滤波器结构

设计单端对谐振器时, 使并臂谐振器的反谐振频率与串臂谐振器的谐振频率相同。其中 f_{rp} 、 f_{ap} 、 f_{rs} 、 f_{as} 分别为并臂、串臂谐振器的谐振频率和反谐振频率。根据梯型滤波器传输函数截止条件可知, 串臂谐振器阻抗 Z_s 和并臂谐振器阻抗 Z_p 性质相同时, 形成阻带; Z_s 、 Z_p 性质相反, 且 $Z_s/Z_p > -1$ 时, 形成通带; $Z_s/Z_p < -1$ 时, 形成过渡带; $Z_s/Z_p = -1$ 时的频率点为截止频率。

2.2 滤波器的设计

设计梯型结构滤波器^[3, 4], 主要是对单端谐振器的设计, 并协调好串臂和并臂谐振器的相互关系。谐振器的阻抗可用其谐振频率 f_r 和反谐振频率 f_a 来表示, 即

$$Z_s = \frac{\omega^2 - \omega_{rs}^2}{j\omega C_{os}(\omega^2 - \omega_{as}^2)} \quad (4)$$

$$Z_p = \frac{\omega^2 - \omega_{rp}^2}{j\omega C_{op}(\omega^2 - \omega_{ap}^2)} \quad (5)$$

式中 $\omega_{rs}=2\pi f_{rs}$, $\omega_{rp}=2\pi f_{rp}$ 分别为串臂、并臂谐振角频率; $\omega_{ra}=2\pi f_{ra}$, $\omega_{ap}=2\pi f_{ap}$ 分别为串臂、并臂反谐振角频率;为使梯型滤波器的匹配阻抗为线性阻抗 R_p , 串、并臂阻抗应满足

$$Z_s Z_p = R_0^2 \quad (6)$$

谐振器的频率关系为 $f_{ap} \approx f_{rs}$, $f_0 = f_{rp} = f_{as} - f_0$ 。在通带频率范围内, $\Delta f = (f_{as} - f_{rp})/2$, 将式(4)、(5)代入式(6), 可化为

$$R_0^2 = \frac{1}{4\pi^2 f_{0s}^2 C_{0p}} \quad (7)$$

式中 R_0 一般取为 50Ω 。单端对谐振器的静电容可由下式获得

$$C_0 = N(e_r + e_0)W \quad (8)$$

式中 N 为 IDT 电极对数; W 为 IDT 有效孔径; e_r 为基片材料的有效介电常数。由上述 C_{0p}/C_{0s} 的取值范围, 根据式(7)、(8)取 C_{0p} 、 C_{0s} 的最优值, 从而确定串、并臂谐振器的孔径和指条对数。根据电网络理论分析和 SAW 滤波器的传输函数, 设计出了无线通信系统中移动电话用射频滤波器, 基片采用具有高机电耦合系数的 LiNbO_3 晶片。为提高滤波器阻带抑制特性, 采用了多节串联的方法, 并对各单端对谐振器进行了优化设计, 其基本电路结构如图6所示。

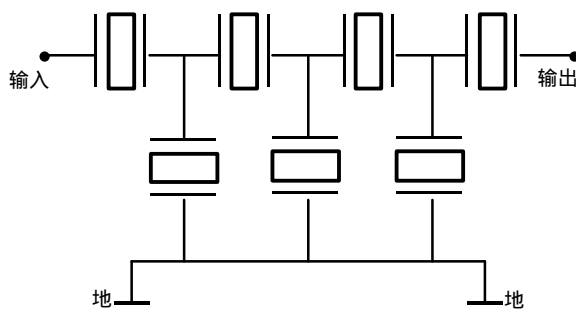


图6 梯型 SAW 滤波器电路结构示意图

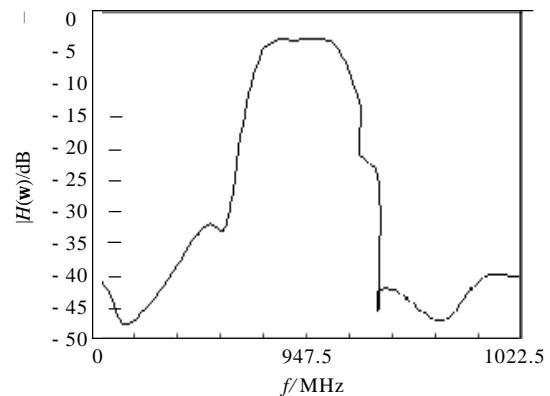


图7 梯型 SAW 滤波器频率特性

设计得到的 SAW 滤波器频率特性如图7所示, 其中心频率为 947.5 MHz , 3 dB 带宽 $> 30 \text{ MHz}$, 插损 4.0 dB , $SS > 30 \text{ dB}$, 匹配阻抗为 50Ω , 取得了较为满意的结果。

3 结束语

根据电网络分析与综合理论并结合 SAW 滤波器的传输函数, 本文从理论上分析并设计了梯型结构 SAW 滤波器中的单端对谐振器, 同时采用该结构设计了无线通信系统移动电话用的 SAW 滤波器, 取得了较为理想的结果, 且滤波器无需外加匹配电路, 满足了无线通信系统的技术要求。

参 考 文 献

- 1 Khamies El-Shennawy. New design criterion for improving the performance of SAW bandpass digital signal processing in communication system. IEEE Trans. Instrum. Meas. 2001, 50 (6): 1 796-1 800
- 2 徐继麟, 周先敏. 特种固态模拟器件原理及应用. 北京: 电子工业出版社, 1995
- 3 Hashimoto K, Ueda M, Kawachi O, et al. Development of ladder type SAW filter with high shape factor. IEEE Ultrasonics Symposium, 1995, 113-116
- 4 黄香馥, 陈天麒, 李西平. 网路分析与综合导论. 北京: 中国铁道出版社, 1989