

基于高 Q 值 SAW 谐振器的多点频微波频率源的研究

戴恩光

(北京大学电子学系区域光纤通信网国家重点实验室, 北京 100871)

摘要: 为实现雷达、数字微波通信、光纤通信、电子对抗、遥测和遥控等领域频率源的小型化和高稳定化, 研制成功了基于高 Q 值(有载 Q 值 15000; 无载 Q 值 18000)的表面波谐振器(SAWR)和小型高稳电路的多点频源, 并有下变频单元和独特的高稳频率监控单元, 该研究结果在研制射频稳频技术中具有应用的广泛性和通用性。

关键词: 频率综合器; 表面波; 表面波谐振器

中图分类号: TN929. 11 文献标识码: A 文章编号: 0372 2112 (2000) 05 0133-03

Research on the Microwave Frequency Synthesizer Based upon High Q-value SAW Resonators

DAI En guang

(National Laboratory of Local Area Optic-Fiber Communication Networks & Advanced Optical Communication Systems Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: For the miniaturization and high stability of frequency synthesizer used in the field of radar, digital microwave telecommunication, optic fiber communication, electronic countmeasure, telemetry and telecontrol, a novel frequency synthesizer based upon high Q-value (loaded Q value: 15000; unloaded Q value: 18000) surface acoustic wave resonators has been developed successfully. Besides, the system has frequency down converter unit and unique frequency monitor unit. The research results are universal for the technology of fabricating of RF source with high stability.

Key words: frequency synthesizer; SAW resonator

1 引言

相噪低、频谱纯、功耗低而且体积小的 SAW 振荡器是现代信息行业非常重要的射频稳频源。最新的 SAWR 实验结果是从 10MHz 到 15GHz(1997 年以前的实验结果是小于 3.3GHz), 可用频段十分宽广。采用同样的亚微米集成电路加工工艺, 速度可以比其它有源电子器件快一个数量级。通过合理设计 Q 值, 即可以研制压控振荡器(VCO), 又可以研制点频振荡器。

基于多点频的稳频源是雷达、电子对抗、微波通信、遥测、遥控等领域的重要器件。在光纤通信中, 是模式转换型光分插复用器的关键驱动器。对 SAW 稳频源的研究从现有的技术情报可以看到, 该方向是国际上研究的一个热点。与 VCO 不同, 多点频源往往需要定做, 国际上定做周期很长。考虑国内信息行业当前需大量使用多点频源, 研制高稳定的多点频源在当前具有十分重要的现实意义。

2 稳频点频振荡器

双端 SAW 谐振器的一对叉指换能器置于由一对反射栅组成的腔体中。振荡条件是环路的相移必须满足:

$$\varphi_R + \varphi_E = 2\pi n \quad (1)$$

其中 n 为整数, φ_E 为振荡电路中由于放大器和相移器引起的

附加相移, φ_R 为声表面波谐振器群延迟引起的相位移偏。

$$\text{谐振器的群延迟为: } \tau_g = Q_L / (\pi f_0) \quad (2)$$

Q_L 代表在反馈环路中声表面波的有载 Q 值

由定义可得到:

$$\Delta f_0 = (1/2\pi \tau_g) \Delta \varphi_E \quad (3)$$

由式(2)和(3)可得到振荡频率跟踪相位的变化关系:

$$\Delta f_0 = (f_0/2Q_L) \Delta \varphi_E \quad (4)$$

在谐振频率处, 插损达到最小值, 而相位斜率 $d\varphi/df$ 达到最大值。由式(4)可见, 当振荡电路发生相移时, 振荡电路的频率将发生改变。这也可以看出, 电路的相位噪声将影响频率稳定度。

高 Q 器件是保证振荡器具有良好相位噪声的最关键的因素。要提高 SAWR 的 Q 值, 需要使器件尽可能少地向谐振腔外耗散声能。图 1 为声表面波谐振器的反射栅条在扫描电镜下的

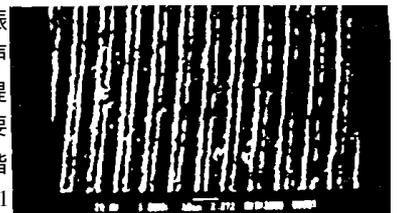


图 1 扫描电镜下的反射栅

图片, 可以看到, 反射栅条反射边缘并不是光滑的直线, 有很多缺陷, 这些缺陷将表面波向谐振腔外反射。所以要设计高 Q

器件, 需要设计合理的孔径. 采用沟槽结构能得到最高的 Q 值, 但工艺复杂. 文[1]报道了采用浅沟槽反射栅, 在 ST 石英上, 制成的 152MHz 的 SAW 谐振器的最高 Q 值为 15000, 这些年的研究也没有更高指标的报道, 采用金属反射栅的报道一般小于 10000. 采用金属反射栅具有成本低的优点, 本文采用金属反射栅.

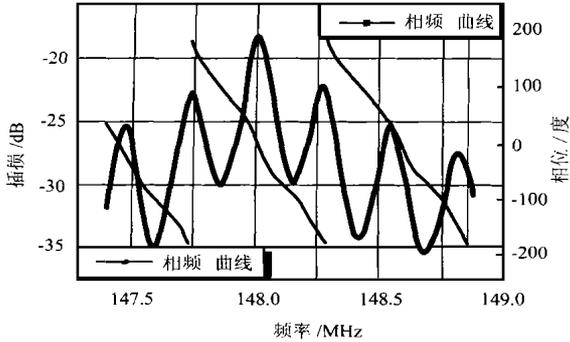


图 2 理论幅频和相频响应

设计高性能谐振器的有力工具是耦合模理论, 在该方法中加入一些二阶效应项可以非常精确地得到器件的性能曲线, 通过调整设计参数可以得到较好的实际器件性能. 图 2 为采用耦合模方法得到的理论 148MHz SAW 谐振器的幅频和相频理论响应曲线. 实际制成的 148MHz 双端谐振器的频率响应等器件参数由 HP8753B 网络分析仪测定, 图 3(a) 和 (b) 分别为 SAWR 的幅频和相频特性曲线.

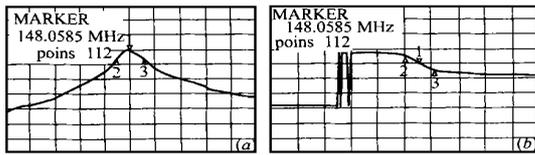


图 3 (a) 幅频特性曲线 (span: 0.1MHz),
(b) 相频特性曲线 (span: 0.1MHz)

表 1 列出了 SAWR 的电特性数据, 数据是器件未经匹配时的测量结果.

表 1 研制的 SAWR 的电特性

中心频率	有载 Q 值	无载 Q 值	插入损耗	电阻 (Ω)	电抗 (Ω)
148.0580	15000	18236	-15.018dB	85.5	-146.3

在主谐振峰-15dB 带宽内没有横向模式 (一般有横向模式), 主谐振峰的插损比第二谐振峰的插损高约 8dB, 器件具有很高 Q 值 (无载 Q 值 18236, 有载 Q 值 15000), 据掌握的资料, 现在尚没有采用金属反射栅结构, 在这个频率段达到该指标的报道^[1], 器件的综合性能指标很高.

3 多点频谐振技术及实验

影响电路相位噪声的关键器件是 SAWR, 移相器和环路放大器. 器件的相位噪声与谐振电路的相位噪声是不同的, 但是器件的相位噪声越小则电路的稳定性就越高, 所以这里测量了器件的相位噪声. 图 4 是器件的相位噪声测试连接图和曲线.

可以看到, 器件的相位噪声很低, 偏离载频 10Hz 处的单边带功率谱密度小于 -120dB. 这样, 只要保证振荡电路其它的调频元件的相位噪声足够低, 就可以使整个电路的噪声保持在很低的水平上.

与常规的微波振荡电路不同的是, 该种电路要考虑 SAWR 的等效电路, 也就是说要与换能器的插指电容的容抗相匹配. 本文通过精心地对原理图和版图的设计, 研制了一种采用 MMIC 小型高稳振荡器. 图 5(a) 是采用高稳采集系统连续采集 600 个点的频漂曲线. 纵坐标为某一个中频 (不是频率漂移), 横轴时间单位是秒. 从该图可以看到 10 分钟不超过 10Hz, 频率稳定度在 10^{-8} 到 10^{-7} 之间. 由于 SAW 采用 ST 石英, 该基片在室温时的延迟温度系数为零, 这就保证了器件有很好的温度稳定性. 图 5(b) 是采用多点频并有下变频要求时的结构, 有四个点频振荡器, 通过一个公共的本振 (图中最下一个器件为频控元件) 进行下变频. 为使结构紧凑, 研制了独特的圆形结构. 由于有下变频的要求, 并考虑抑制干扰的问题, 结构上将各单元进行了相互之间的屏蔽. 对不同的频率, 只要更换不同频率的 SAWR 即可, 调节元件只有一个, 所以通用性很强, 调试十分方便.

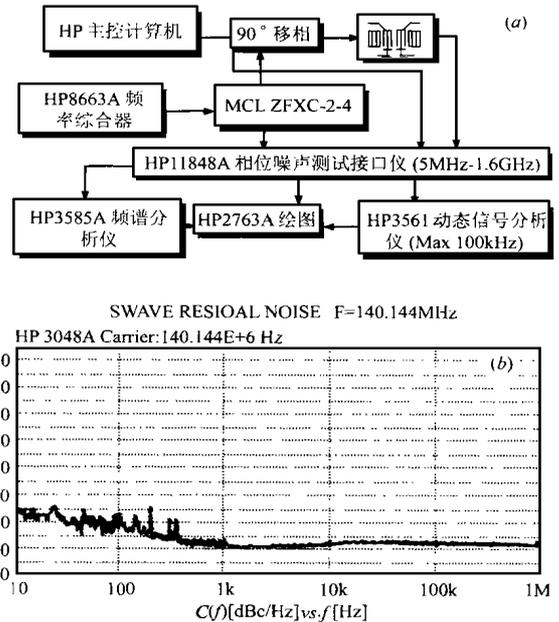


图 4 (a) SAWR 相位噪声测试仪
器连接图 (b) SAWR 的相位噪声

4 监控技术

对有些重要场合, 为保证多点频源工作的可靠性, 这里还采用了频率监控技术. 当前对频率信号采集系统 (硬件和软件) 十分缺乏, 多为模拟信号和数字信号采集系统, 这些采集系统没有实时测频的功能, 为此这里研制了频率信号采集系统, 可对多达 10 路的信号进行采集, 而且采样是同时采样, 最高采样频率达 8.5MHz (采集下变频后的信号), 频率分辨率可精确为 0.5Hz. 由于采用了独特的参考时钟互补技术, 使采集板本身的频率稳定性达到 10^{-9} (不采用时钟互补技术的稳定

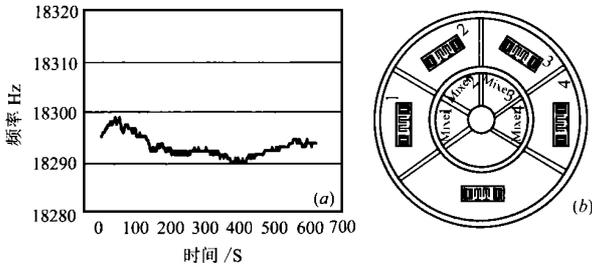


图5 (a) SAW 振荡电路时间稳定性实验;

(b) 多点频源以及下变频单元

性为 10^{-7}), 该采集系统可代替 10 个“同时使用”的频率计, (每个频率计还要单配与计算机之间的接口卡, 这种接口卡本身不能测频), 采集多路时用频率时成本高而且很不方便. 该类采集系统目前尚没有报道. 中频信号通过耦合器进入采集板, 可不间断、长期监控频率. 采集可以设定采样时间间隔, 可以一个微秒(μs)采集一个点, 也可以一个小时采集一个点. 采集的数据自动形成文件, 并方便地形成 10 条频率漂移曲线.

5 结论

通过恰当的设计, 采用工艺要求不高的金属反射栅结构, 解决了高 Q 值器件的关键技术问题, 并研制成功了基于高 Q 值 SAW 器件和小型高稳电路, 研制了多点频源, 有变频单元, 并有频率监控单元, 该研究结果无论是在军用还是民用具有明显的通用性, 相关的技术可参看文献[2~4]. 这里正在研制

的不采用任何可调元件, “即插即用”式的微型 SAW 振荡器将会进一步拓展振荡器的应用广度.

参考文献

- [1] William J. Tanski. Surface acoustic wave resonators on quartz. Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium, 1979: 93~104
- [2] Dai Enguang, Feng Guanping. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, March 1997: 44
- [3] Dai Enguang. A new research for low noise signal generator based upon surface acoustic wave resonators, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, to be published
- [4] Dai Enguang. IEEE MIT-S International Microwave and Optoelectronics Conference, Brazil 1997
- [5] Dai Enguang. A novel electro-optic oscillator, IEEE Frequency control symposium, 2000



戴恩光 1997 年获清华大学获博士学位, 现为北京大学电子学系副教授, 区域光纤通信网国家重点实验室博士后. 研究领域有光纤通信、微电子器件和微波技术. 已经完成或正在完成的国家自然科学基金资助的项目多项.