Apr. 2022

文章编号:1004-2474(2022)02-0194-05

**DOI:** 10. 11977/j. issn. 1004-2474, 2022. 02. 006

# 基于声表面波色散延迟线的频谱探测系统

茹鹏磊<sup>1,2</sup>,刘梦伟<sup>1</sup>,官俊杰<sup>1</sup>,王 文<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 声学研究所,北京 100190; 2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:利用声表面波(SAW)技术设计的 Chirp 变换频谱仪(CTS)具有低功耗、高稳定性等优势,特别适用于深空探测领域。该文提出了一种大带宽的 CTS 系统。由数模转换器(DAC)和四倍频器产生 2 GHz 带宽的展宽线 Chirp 信号,其色散特性与 1 GHz 带宽的声表面波色散延迟线特性匹配。搭建了实时处理带宽为 1 GHz、频率分辨率为 100 kHz 的频谱分析仪,并对在大带宽下 CTS 出现的响应不均衡展开探讨。分析了系统各部分对 CTS 的影响,通过实验验证了响应不均衡出现的原因。测试结果表明,该文设计搭建的 1 GHz 带宽 CTS 系统的频率分辨率可达 115.512 kHz。

关键词:声表面波(SAW):色散延迟线;超大带宽;Chirp 变换;深空探测;频谱仪

中图分类号:TN65;TM931 文献标志码:A

# Research on Spectrum Detection System Based on SAW Dispersive Delay Line

RU Penglei<sup>1,2</sup>, LIU Mengwei<sup>1</sup>, GONG Junije<sup>1</sup>, WANG Wen<sup>1</sup>

- (1. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
  - 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Chirp transform spectrometer (CTS) designed using surface acoustic wave (SAW) technology has the advantages of low power consumption and high stability, and is especially suitable for the field of deep space exploration. This paper proposes a large bandwidth CTS system. A 2 GHz bandwidth Chirp signal is generated by DAC and frequency multiplier, and its dispersion characteristics match those of a 1 GHz SAW delay line. A spectrum analyzer with a real-time processing bandwidth of 1 GHz and a frequency resolution of 100 kHz is built, and the unbalanced response of the CTS under large bandwidth is discussed. The influence of each part of the system on the CTS system is analyzed, and the reasons for the unbalanced response are verified through experiments. The test results show that the designed and built CTS system with a bandwidth of 1 GHz can reach a frequency resolution of 115,512 kHz.

**Key words:** surface acoustic wave(SAW); dispersive delay line; wide bandwidth; Chirp transform; deep space exploration; spectrum analyzer

# 0 引言

随着航天事业的不断发展,国内外研究者越来越关注对深空星际物质及大气分子等的探测。深空探测对研究太阳系及宇宙的起源、演变和现状,进一步认识地球环境的形成和演变,以及认识空间现象和地球自然系统之间的关系提供了参考[1]。近年来,越来越多的研究需要对超精细谱线、微弱谱线和大带宽谱线进行观测。因此有必要研发一款超大带宽、高分辨率及大动态范围的太赫兹频谱探测仪[2]。

利用声表面波(SAW)技术设计的 Chirp 变换 太赫兹频谱探测器不仅可满足对超精细谱线、微弱 谱线和大带宽谱线的观测需求,同时还具有低功耗、 抗辐射和高稳定性等方面的优势,适用于深空探 测<sup>[3]</sup>。目前,国内的 Chirp 变换频谱探测器尚处于 起步阶段,此研究对我国建立完善的深空探测系统 具有重要意义<sup>[4]</sup>。

## 1 Chirp 变换谱测量原理

20 世纪 60 年代, Chirp 变换理论最早被提出用

收稿日期:2022-03-10

基金项目:国家自然科学基金联合重点项目(U1837209)

以证明脉冲压缩法可用于频谱分析,随后此技术广泛应用于对大气分子谱线的探测。Chirp 变换谱分析原理由傅里叶变换推导而来。被测信号先与一个Chirp 信号相乘,再和第二个Chirp 信号卷积,最后与第三个Chirp 信号相乘得到输入信号的傅里叶变换。由于只实现频谱分析功能,故第三个作用于相位的Chirp 信号可省去。通常把用于产生第一个Chirp 信号的器件称为展宽线,用于卷积的器件称为压缩线。

目前,在 Chirp 变换频谱仪(CTS)系统的设计中,系统设计电路以展宽线-压缩线方式连接,其原理如图 1 所示。近年来,CTS 的设计方案普遍采用数字电路作为压缩线,能产生更大带宽及可调节斜率的 Chirp 信号,以精确匹配压缩线,实现频谱测量功能。

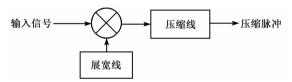


图 1 Chirp 变换谱分析原理图

本文 CTS 系统使用声表面波技术,其谱计算 (卷积)过程在声表面波色散延迟线中完成。与其他 太赫兹频谱仪相比,CTS 系统具有更低的功耗和更高的稳定性<sup>[5]</sup>。CTS 系统的性能与声表面波色散延迟线的性能参数直接相关,其色散时间、带宽及插入损耗直接影响 CTS 系统的频率分辨率、带宽和动态范围等参数。本文使用的声表面波色散延迟线的中心频率为1.6 GHz,带宽为1 GHz,色散时间为10 μs,调频斜率为100 MHz/μs<sup>[6]</sup>。

## 2 系统设计

#### 2.1 总体设计方案

本文设计采用数模转换器(DAC)加倍频的方法产生 2 GHz 带宽展宽线。图 2 为系统的设计结构。PC 端产生调频斜率为 25 MHz/μs、带宽为500 MHz的 Chirp 信号的二进制数据,现场可编程门阵列(FPGA)控制 DAC 读取数据,生成 Chirp 信号。倍频器使展宽线信号带宽达到2 GHz,调频斜率为100 MHz/μs。被测信号与展宽线混频后,通过压缩线——声表面波色散延迟线,生成被测信号的压缩脉冲谱。模数转换器(ADC)采集压缩脉冲谱,通过 FPGA 传输到 PC 端实现数据处理和分析。

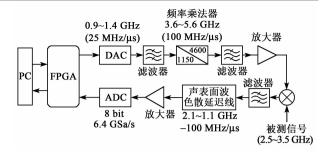


图 2 CTS 系统设计结构图

### 2.2 展宽线设计

展宽线产生的 Chirp 信号质量将直接影响 CTS 系统对被测信号频谱的测量。通常评估 Chirp 信号质量主要从小通带波纹、较高信噪比(SNR)、小相位偏差、群延迟和调频斜率等方面考虑[7]。

使用采集装置采集 DAC 产生的 Chirp 信号与输入到压缩线中的信号,使用 Matlab 计算信号质量,包括信号的幅频响应、在期望频率范围内的相位拟合函数、相位偏差曲线、均方根误差及调频斜率。图 3、4 分别为 500 MHz 带宽理想的 Chirp 信号和DAC 实际产生的 Chirp 信号分析结果。

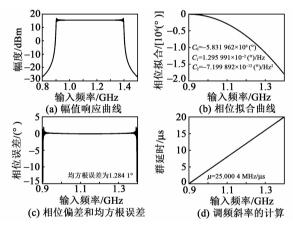


图 3 理想 Chirp 信号分析结果

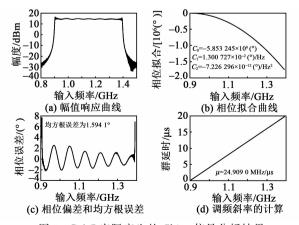


图 4 DAC 实际产生的 Chirp 信号分析结果

图 3,4 中, $C_0$ 、 $C_1$ 、 $C_2$  分别为二次相位拟合曲线的常数项、一次项及二次项的值。通过对比图 3、4 可知,DAC 产生的 Chirp 信号接近理论值。

## 2.3 压缩线设计

本文使用的声表面波色散延迟线,采用反射栅(RAC)阵列色散延迟线结构,可达到更高的中心频率和更大的时宽带宽积。其脉冲响应为 Chirp 信号,图 5 为 SAW 色散延迟线的分析结果。

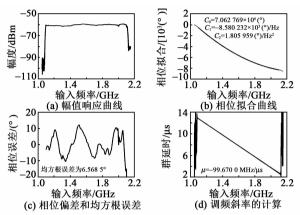
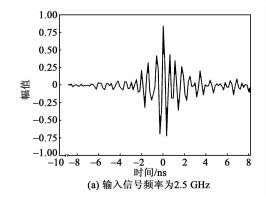


图 5 SAW 色散延迟线的分析结果

## 3 实验结果与分析

#### 3.1 脉冲压缩结果

本文设计了可分析 1 GHz 带宽 (2.5~3.5 GHz)信号的 CTS 谱分析系统,采集了 1 GHz 带宽内 3 个典型输入频率下被测信号的压缩结果 (见图 6),输入信号分别为 2.5 GHz、3 GHz 和 3.5 GHz。为了清晰展现压缩脉冲波形的主瓣及旁瓣参数,绘制了输入信号为 3 GHz 时 CTS 压缩脉冲结果的叠加图 (见图 7),图中将压缩波形中心设为时间轴的 0 时刻。CTS 压缩脉冲主瓣宽度和系统分辨率由声表面波色散延迟线的调频斜率及色散时间决定 [8]。根据本文设计声表面波色散延迟线色散时间为  $10~\mu s$ ,调频斜率为 $-100~MHz/\mu s$ ,则对应的理想压缩脉冲主瓣宽度为 2 ns。



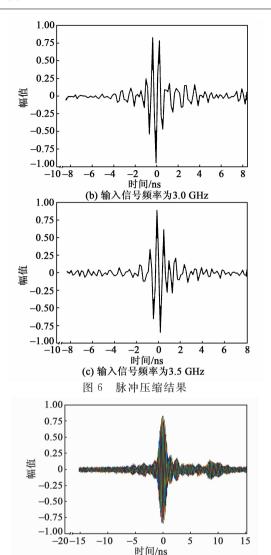


图 7 脉冲压缩结果叠加图

由图 6 可看出,与输入被测信号频率为 3 GHz 和3.5 GHz相比,输入被测信号频率为 2.5 GHz 时 压缩脉冲主瓣较宽。下面将进一步测试与分析,找 出影响 CTS 系统响应不均衡的原因。

### 3.2 频率分辨率

作为频谱分析仪,CTS 系统的频率分辨率和带宽较关键。系统的频率分辨率由压缩线的色散时间宽度决定<sup>[7]</sup>,理想频率分辨率为 100 kHz。本文使用半峰全宽法对系统的频率分辨率进行测量。系统动态范围用峰值旁瓣比进行表征,CTS 系统的峰值旁瓣比理论最大值为 13.26 dB<sup>[9]</sup>,测量结果如图 8 所示。系统在 1 GHz 带宽下,频率分辨率均值为115.512 kHz,接近理想频率分辨率。但在测量频带内,不同被测频率下分辨率波动较大。在测量频带内峰值旁瓣比起伏较大,最大值点与最小值点相差约 4.8 dB。在 1 GHz 频带内系统测试参数的波

动,是系统脉冲压缩结果在不同被测频率下响应不 一致的表现。

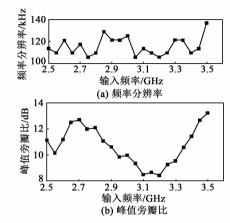


图 8 系统频率分辨率和峰值旁瓣比的测试结果

### 3.3 测试分析

展宽线与压缩线的匹配主要为调频斜率的一致性。调频斜率的微小偏差将严重影响 CTS 系统性能,造成频率分辨率降低,动态范围下降等。本设计使用了倍频器、混频器等影响 Chirp 信号时频特性的模拟器件<sup>[10]</sup>,且展宽线为超大带宽 2 GHz,易使Chirp 信号在带内调频斜率不一致,不同频段具有不同的调频斜率,形成整个被测频带内系统性能差异较大的现象。在整个频带内,展宽线与不同被测信号下变频后输入到压缩线中的 Chirp 信号调频斜率的变化,如图 9(a) 所示。

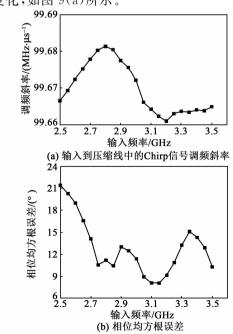


图 9 不同输入频率下,输入到压缩线中的 Chirp 信号调频 斜率及相位均方根误差变化曲线

由图 9(a)可看出,展宽线在 2 GHz 带宽内调频 斜率具有不均衡性,即调频斜率约 99.67 MHz/μ处 起伏较大,偏差为±0.01 MHz/μs。调频斜率在频 带内的波动,使 CTS 系统在不同被测频率下响应不 一致,形成频率分辨率和峰值旁瓣比在带内不均衡 现象(见图 8)。

相位均方根误差为 Chirp 信号相位与理想信号相位的偏差程度,反映了信号在固定调频斜率下,不同频率点相位偏差的平均值。相位均方根误差越大,Chirp 信号的相位误差在频带内波动越大,线性度越差。实验测试了在不同输入被测信号下,Chirp 信号的相位均方根误差如图 9(b)所示。输入信号在中心频率附近均方根误差较小,系统具有更高的稳定度。

## 4 结束语

本文基于 Chirp 变换谱分析原理,围绕 1 GHz 带宽的声表面波色散延迟线,结合数字与模拟技术设计了可用于深空探测的太赫兹频谱探测器后端设备——Chirp 变换频谱分析仪。其带宽可达1 GHz,频率分辨率为 115.512 kHz,达到实际应用需求。进一步讨论了通带内响应的不均衡,通过分析展宽线可知,系统在频带内不均衡主要是由展宽线调频斜率线性度变差导致。

#### 参考文献:

- [1] 王一然,刘晓川,罗开元. 国际深空探测技术的发展现状及展望(上)[J]. 中国航天,2002(10):31-34. WANG Yiran, LIU Xiaochuan, LUO Kaiyuan. Development status and prospect of international deep space exploration technology (Part 1)[J]. Chinese Spaceflight, 2002(10):31-34.
- [2] 范江涛,马冠一,万庆涛,等. Chirp 信号在天文观测中的应用[J]. 天文研究与技术,2017,14(4):443-451. FAN Jiangtao, MA Guanyi, WAN Qingtao, et al. Application of Chirp signal in astronomical observation [J]. Astronomical Research and Technology,2017,14 (4): 443-451.
- [3] 贺小琦,董晓龙,朱迪,等.一种用于深空探测的宽带低功耗频谱仪的设计与试验[J]. 电子设计工程,2019,27 (3):178-183.

HE Xiaoqi, DONG Xiaolong, ZHU Di, et al. Design and test of a low power consumption boardband spectrometer for deep space explorations [J]. Electronic Design Engineering, 2019, 27(3):178-183.

- [4] 王业欢. 用于深空探测的 Chirp 变换频谱仪关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心),2020.
- [5] 周海松,马骊群,刘梦伟,等. Chirp 变换频谱分析仪的设计及其数字部分的实现[J]. 计测技术,2019,39(5): 29-36.
  - ZHOU Haisong, MA Liqun, LIU Mengwei, et al. Design of Chirp transform spectrum analyzer and realization of its digital part[J]. Metrology & Measurement Technology, 2019, 39(5): 29-36.
- [6] GONG J,ZHANG Y,ZHOU X,et al. Wide Bandwidth SAW Chirp filters with improved magnitude response [C]//Vancouver,BC,Canada;Ultrasonics Symposium, 2006; 1895-1898.
- [7] RU Penglei, LIU Mengwei, GONG Junjie, et al. A spectrum analyzer system with wide bandwidth and

high frequency resolution based on Chirp transform [J]. Microw Opt Technol Lett, 2022,64: 458-463.

2022 年

- [8] VILLANUEVA G L, HARTOGH P, REINDL L M. A digital dispersive matching network for SAW devices in Chirp transform spectrometers [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54 (4):1415-1424.
- [9] 丁鹭飞,耿富录,陈建春.雷达原理 [M].5 版.北京:电子工业出版社,2014.
- [10] 樊孝明,葛礼春,王玫.基于 SAW 色散延迟线的 Chirp \_UWB 接收机设计[J]. 压电与声光, 2012, 34(6): 814-816.

FAN Xiaoming, GE Lichun, WANG Mei. Design of Chirp\_UWB receiver based on SAW dispersive delay line[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2012, 34(6): 814-816.

(上接第193页)

- [6] RUPPEL C. Acoustic wave filter technology-A review [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2017; 1390-1400.
- [7] MASON W P. Electromechanical transducers and wave filters [M]. 2nd ed. New Jersey: Nostrand Company Inc, 1964.
- [8] III J D , BRADLEY P D, WARTENBERG S, et al. Modified Butterworth-Van Dyke circuit for FBAR resonators and automated measurement system [C]// San Juan: Pro 2000 IEEE Ultrasonics Symposium, 2000:863-868.
- [9] 杜波,马晋毅,江洪敏,等. 微声薄膜耦合谐振滤波器有限元建模与仿真[J]. 压电与声光,2012,34(5):672-675.
  - DU B, MA J Y, JIANG H M, et al. Finite element sim-

- ulation and design of film bulk acoustic wave resonators[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2016, 38(4): 531-534.
- [10] 蒋平英,蒋世义,何西良,等. S 波段低插损 FBAR 陷波器的研制[J]. 压电与声光,2021,43(2):157-160.

  JIANG Pingying, JIANG Shiyi, HE Xiliang, et al. Development of S band FBAR notch filter with low insertion loss[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2021, 43 (2):157-160.
- [11] 刘娅,马晋毅,孙科,等. 基于裸芯片覆膜的薄膜体声波滤波器[J]. 压电与声光,2021,43(3):299-302.

  LIU Ya,MA Jinyi,SUN Ke,et al. An air-gap thin film bulk acoustic resonator filter with laminated film bare die[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2021, 43(3): 299-302.