

深空探测Chirp变换频谱仪高精度脉冲积累设计与实现

胡白帆^{1,2}, 刘梦伟¹, 茹鹏磊^{1,2}, 王文¹

(1. 中国科学院声学研究所超声学实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对1 GHz带宽Chirp变换频谱仪时间分辨率高、脉冲宽度窄的特点以及对微弱信号的检测需求, 提出一种实时、高精度的CTS (Chirp Transform Spectrometer) 系统后端时序同步与脉冲积累方案, 其同时具有积分时间可调的优点。通过系统时钟设计与现场可编程门阵列 (Field-Programmable Gate Array, FPGA) 算法设计, 实现了1 GHz带宽CTS系统不同模块间的时钟同步及后端窄脉冲的精准积累, 以确保系统达到较高的频率分辨率。通过该同步方案, 积累后系统带内平均脉冲宽度达到了1.013 6 ns, 对应的频率分辨率101.36 kHz, 与欧洲航天局 (European Space Agency, ESA) 木星冰月探测器 (Jupiter Icy moons Explorer, JUICE) 搭载的CTS分辨率相当, 为中国深空探测任务高精度频谱分析提供了有效的解决途径。

关键词: 深空探测; Chirp变换频谱仪; 脉冲积累; 时序控制; 高频率分辨率

中图分类号: TN98; TN781

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2024)06-0578-09

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230166

引用格式: 胡白帆, 刘梦伟, 茹鹏磊, 等. 深空探测Chirp变换频谱仪高精度脉冲积累设计与实现[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(6): 578-586.

Reference format: HU B F, LIU M W, RU P L, et al. Design and implementation of high-precision pulse accumulation for deep space exploration Chirp transform spectrometer[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(6): 578-586.

引言

随着航天技术的高速发展, 深空探测领域展现出强大的活力与影响力^[1]。通过对深空环境的原子、分子和离子的辐射和吸收谱线进行频谱分析可了解到相关物质的成分信息。对探索宇宙起源及外星生命等都具有重要的意义。依据热辐射理论, 太赫兹频段的能量几乎占到宇宙背景辐射总能量的80%^[2]。因此, 太赫兹谱仪成为深空探测领域的重要工具, 它可以分为3个部分, 辐射计前端、中频处理单元及频谱分析后端, 其结构框图如图1所示。

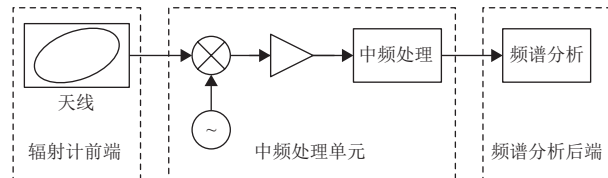


图1 太赫兹谱仪结构框图

Fig. 1 Block diagram of terahertz spectrometer

太赫兹谱仪后端采用的频谱分析技术包括滤波器组谱仪^[3]、声光谱仪^[4]、自相关谱仪^[5]、快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 谱仪^[6-7]、Chirp变换谱仪 (Chirp Transform Spectrometer,

CTS)^[8]等。其中滤波器组与声光谱仪在满足大带宽与高频率分辨率的条件下结构相对复杂, 不利于集成。自相关谱仪与快速傅里叶变换谱仪可实现较大带宽, 但由于其高功耗, 在深空探测的应用受到了限制。而Chirp变换谱仪凭借高性能的无源声表面波 (Surface Acoustic Wave, SAW) 模拟器件在兼顾大带宽与高频率分辨率的同时拥有低功耗和抗辐照等特点, 在有复杂辐射的深空环境具有一定优势, 得到了应用。

2004年, 欧洲航天局 (European Space Agency, ESA) “罗塞塔号” (Rosetta) 彗星探测器上搭载的带宽为180 MHz的Chirp变换谱仪, 对CO、CH₃OH、NH₃等物质进行了探测^[9]。2010年, 美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 与德国宇航中心 (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR) 的平流层红外天文台 (Stratospheric Observatory For Infrared Astronomy, SOFIA) 搭载了带宽为215 MHz的Chirp变换谱仪, 用于观测大气的频谱特征^[10]。2023年, ESA的木星冰卫星探测器 (Jupiter Icy Moons Explorer, JUICE) 搭载的Chirp变换谱仪带宽达到了1 GHz, 对SO₂、NaCl、SO等物质进行了精细的频谱探测^[11]。

收稿日期: 2023-11-10 修回日期: 2024-06-05

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFB1506205); 国家自然科学基金 (U1837209, 11774381, 52072184)

中国对Chirp变换谱仪的研究始于20世纪八九十年代。陈东培等^[12]在1993年开发了一台用于观测毫米波射电星际分子谱线的Chirp变换频谱仪。1999年, 乌鲁木齐25 m射电望远镜搭载的Chirp变换频谱仪具有1024个通道、39.06 kHz的频率分辨率^[13]。2018年, 中国科学院声学研究所与国家空间科学中心合作设计并搭建了一个400 MHz带宽, 频率分辨率可达100 kHz的Chirp变换谱仪^[14-16]。此外, 声学所还设计搭建了带宽为1 GHz的Chirp变换频谱仪^[17-18]。这些研究成果为中国的深空探测领域Chirp变换频谱仪应用提供了有益支持。

由于深空环境存在背景噪声高、信号强度弱等特点, 为提高对弱信号的检测能力, CTS常使用脉冲积累^[19]的方式提高信噪比, 增强信号特征^[20]。脉冲积累的同步性, 影响着频谱分辨率等衡量Chirp变换频谱仪系统性能的关键指标。与以往的CTS系统脉冲积累方案^[21]相比, 1 GHz的大带宽给CTS系统带来了更大的数据处理量以及更窄的脉冲宽度, 这对数据处理的实时性及脉冲积累的同步性都提出了更高的要求。本文提出了一种针对1 GHz大带宽CTS系统的实时、高时序精度的时钟同步与脉冲积累方案, 以实现系统后端窄脉冲的精准积累, 进而在深空探测任务实现大带宽、高精度的频谱分析。

1 CTS系统

Chirp信号是指频率随时间线性变化的信号, 即线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)信号, 其表达式为

$$s(t) = e^{-j\pi(\frac{1}{2}\mu t^2 + f_0 t)} \quad (1)$$

其中: f_0 为 $t=0$ 时刻的初始频率; μ 为调频斜率, 表征了信号频率随时间增大或减小的速率。

对于一个时域信号 $f(t)$, 其傅里叶变换的基本形式为

$$F(\Omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\Omega t} dt, \quad \Omega = 2\pi f \quad (2)$$

傅里叶变换可将信号从时域变换到频域, 其中 Ω 为角频率。考虑到Chirp信号频率与时间的线性关系, 将 $f = \frac{1}{2}\mu\tau$ 代入式(2)得

$$F(\Omega) = F(\pi\mu t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\pi\mu t^2} dt \quad (3)$$

利用等价代换关系式

$$-\tau t = \frac{1}{2}(t-\tau)^2 - \frac{1}{2}t^2 - \frac{1}{2}\tau^2 \quad (4)$$

代入傅里叶变换式整理后得到

$$F(\mu t) = e^{-j\frac{1}{2}\mu t^2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau)e^{-j\frac{1}{2}\mu\tau^2} e^{j\frac{1}{2}\mu(t-\tau)^2} d\tau \quad (5)$$

由式(5)可知, 输入信号 $f(\tau)$ 先与一个调频斜率为 μ 的Chirp信号相乘, 再与一个调频斜率为 $-\mu$ 的Chirp信号卷积, 最后再与一个调频斜率为 μ 的Chirp信号相乘即可得到输入信号的傅里叶变换。其中, 最后一步相乘运算用于校正信号的相位, 本文设计的频谱仪系统只分析被测信号的功率谱, 因此可省略最后一步的相乘运算。通常将产生用于混频Chirp信号的器件被称为展宽线, 产生用于卷积Chirp信号的器件被称为压缩线。由此绘制出Chirp变换原理图如图2所示。

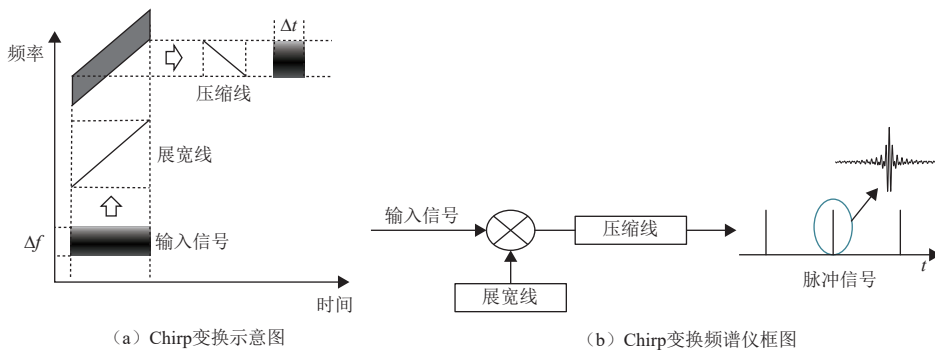


图2 Chirp变换图

Fig. 2 Chirp transform schematic

输入信号与展宽线产生的Chirp信号混频, 得到有频率偏移的Chirp信号。随后进入压缩线, 实现信号的卷积运算, 输出带有一定延迟时间的脉冲信号。不同频率的输入信号在输出时具有不同的延迟时间。Chirp变换频谱仪可将信号频率的测量转换为对时延信号的测量^[21]。

2 1 GHz带宽CTS系统设计

2.1 系统整体设计

依据Chirp变换原理, 给出一种1 GHz带宽的变换频谱仪系统的设计框图, 如图3所示。其中, 展宽线利用数字频率合成技术(Direct Digital Synthesis, DDS)

生成带宽为2 GHz的Chirp信号。中频信号与其混频后，然后通过压缩线——带宽1 GHz，色散延迟10 μs的声表面波线性调频色散延迟线^[22]。进行脉冲压缩，将1 GHz带宽的频域信息映射到一个10 μs的时间

间隔上。由于Chirp变换的特性，当展宽线的带宽为压缩线带宽的2倍时，系统单分支占比为50%。利用多路复用器使系统双分支交替工作，可实现100%的工作效率。

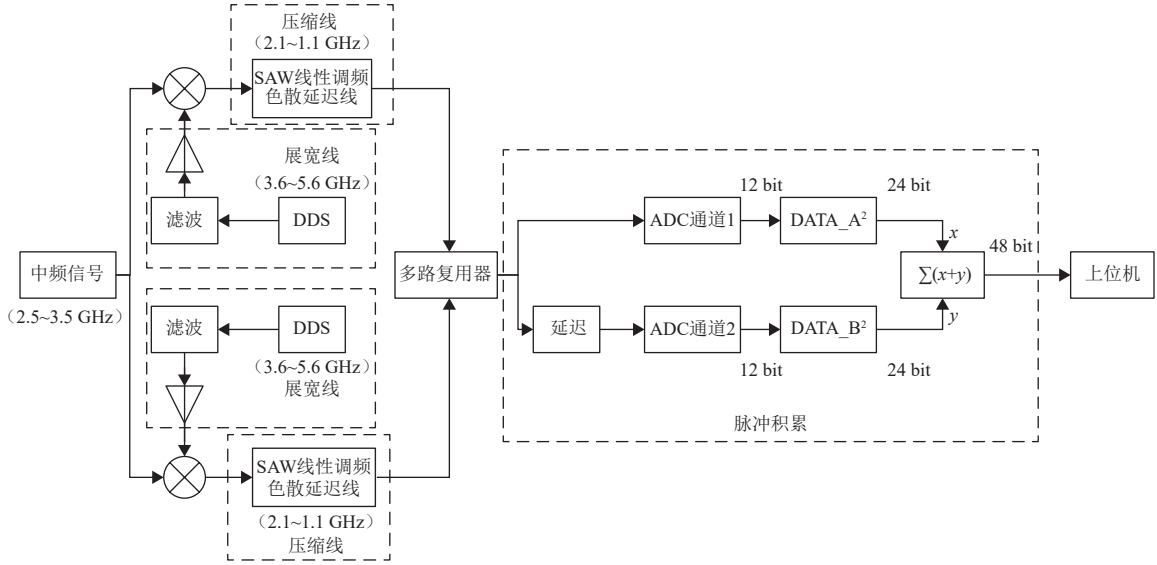


图3 CTS系统设计框图

Fig. 3 Block diagram of CTS system design

为提高系统对微弱信号的检测能力，脉冲压缩后的信号分两路通过模数转换器（Analog-to-Digital Converter, ADC）完成数字化后进行积累。其中一路直接进入ADC通道1，另一路依据载波频率1.6 GHz，利用延迟器实现90°相移后进入ADC通道2。两路信号经过功率谱计算，去除载频的同时保留脉冲包络。由于带宽和脉冲宽度的倒数关系，大带宽Chirp变换频谱仪必然给脉冲压缩后的信号带来较窄的脉冲宽度。在系统带宽为1 GHz的情况下，理论所得的脉冲宽度仅为1 ns，这对脉冲积累的时序精度提出了更高的要求。若脉冲积累时序不同步，会导致相同频率的脉冲信号在积累时发生偏移，不仅会使脉冲波形发生畸变，也会增大脉冲宽度，进而使频率分辨率恶化。

2.2 1 GHz带宽CTS后端高精度时序设计

2.2.1 时序同步

CTS系统各个器件之间具有高度的时序同步性，是实现脉冲高精度积累的必要条件。只有每一组频率信息与Chirp信号调频时间严格对应，才能保证不同频率信息之间不会发生混叠，相同频率信息精准叠加。与以FFT频谱仪为代表的具有固定点数的数字频谱仪相比，Chirp变换频谱仪不仅要求数字部分的时钟同步，还需考虑模拟信号模块与数字信号模块之间时钟的一致性和协调性。这对CTS系统时钟的复杂度及各模块之间的时钟同步精度提出了更高的要求。CTS系统脉冲积累时序控制关键信号线及结构框图如图4所示。

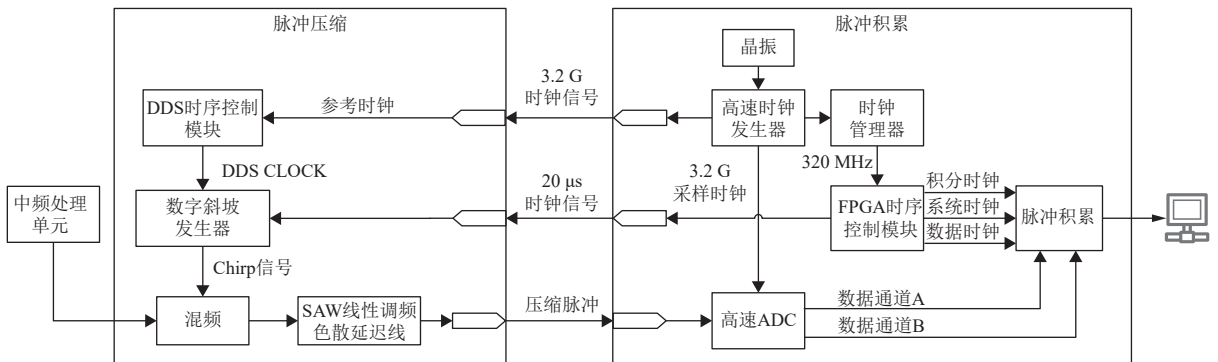


图4 CTS系统脉冲积累时序控制关键信号线及结构框图

Fig. 4 Block diagram of key signal lines and structure for pulse accumulation timing control of CTS system

CTS系统时序控制主要依靠高速时钟产生模块与FPGA时序控制模块。高速时钟产生模块利用具有低噪声、低抖动性能的LMX2582芯片生成频率3.2 GHz的高速时钟源, 其一方面为ADC提供采样时钟, 另一方面为DDS时钟模块提供参考时钟。高频率的时钟源保证了系统的时序精度, 也可降低由于各器件之间时钟相位偏差带来的脉冲偏移误差。FPGA时序控制模块不仅用于同步ADC采样后的时钟与数据, 同时为CTS系统展宽线的生成及功率谱计算与脉冲积累提供时序参考。

CTS系统时序控制流程如图5所示。一个系统时钟的周期是CTS系统双分支各完成一次Chirp变换的时间。该时钟一方面用于控制DDS的数字斜坡发生器生成周期性的Chirp信号, 另一方面为脉冲积累模块提供参考时钟, 以实现CTS系统模拟的脉冲压缩前端与数字的脉冲积累后端时序同步。此外, ADC与FPGA之间可通过JESD204B高速传输协议建立同步链接, 实现高速的数据同步传输, 以此来保证后端数据处理的实时性。

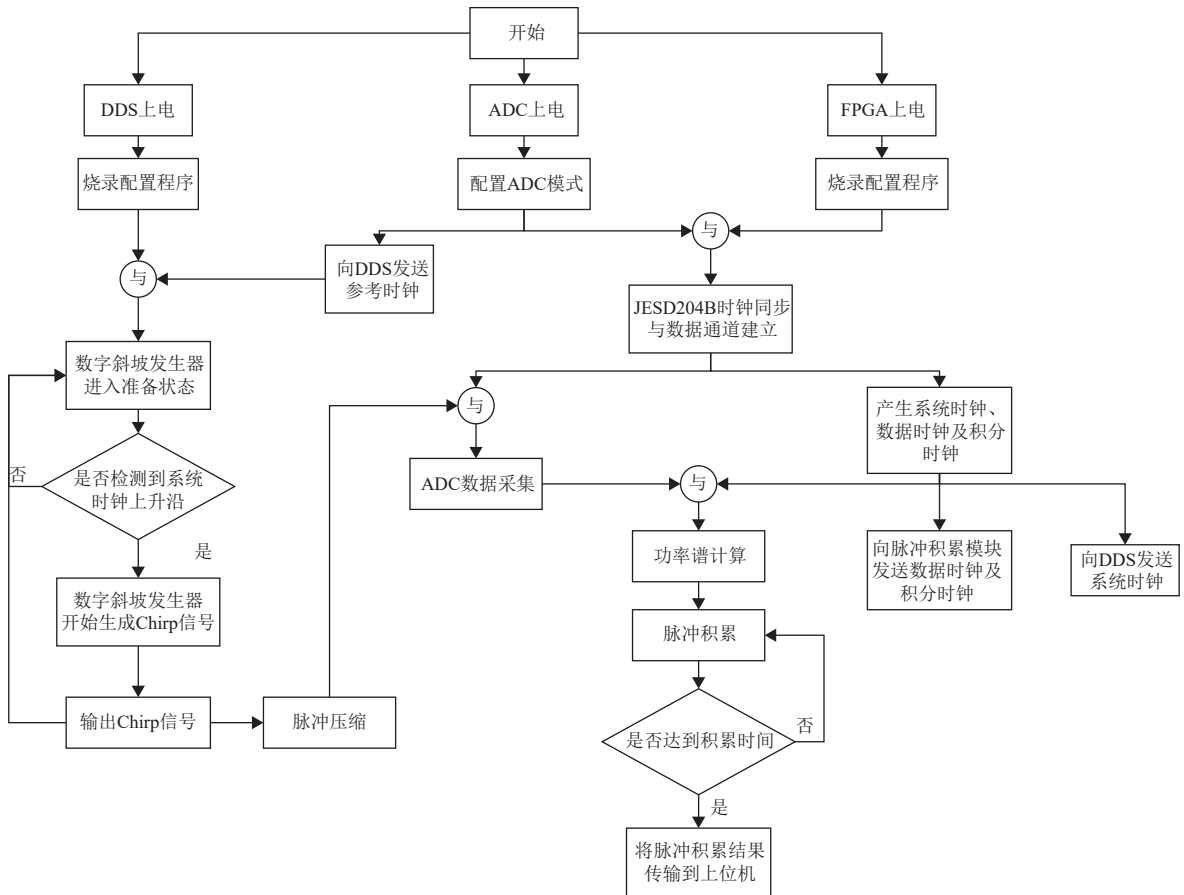


图5 CTS系统时序控制流程图

Fig. 5 Flowchart of CTS system timing control

高速时钟产生模块与FPGA时序控制模块的共同协作, 为系统提供了高精度的时钟源和精确的触发机制, 使得系统各模块间能够依据给定的时序同步工作。这可有效确保相同频率的中频信号经过脉冲压缩后具有相同的时间延迟, 避免不同频率信号间发生频谱混叠, 便于后续进行精准的脉冲积累。

2.2.2 FPGA算法设计

脉冲积累算法是实现CTS系统高精度脉冲积累的核心部分。通过合理的时钟分配及算法设计, 使得每

一帧频谱的相同频率点能够被准确地叠加, 避免脉冲波形发生畸变甚至增大脉冲信号宽度, 进而使频率分辨率恶化。CTS系统脉冲积累算法流程图如图6所示。

为保证每一帧频谱的精准叠加, FPGA接收到来自时钟管理器的320 MHz时钟后, 利用FPGA内部的锁相环模块产生与采样数据同步的320 MHz数据时钟, 及用于160 MHz的积分时钟, 并通过分频产生周期为10 μ s的帧时钟作为脉冲积累时钟参考。其中帧时钟与系统时钟具有相同的周期。

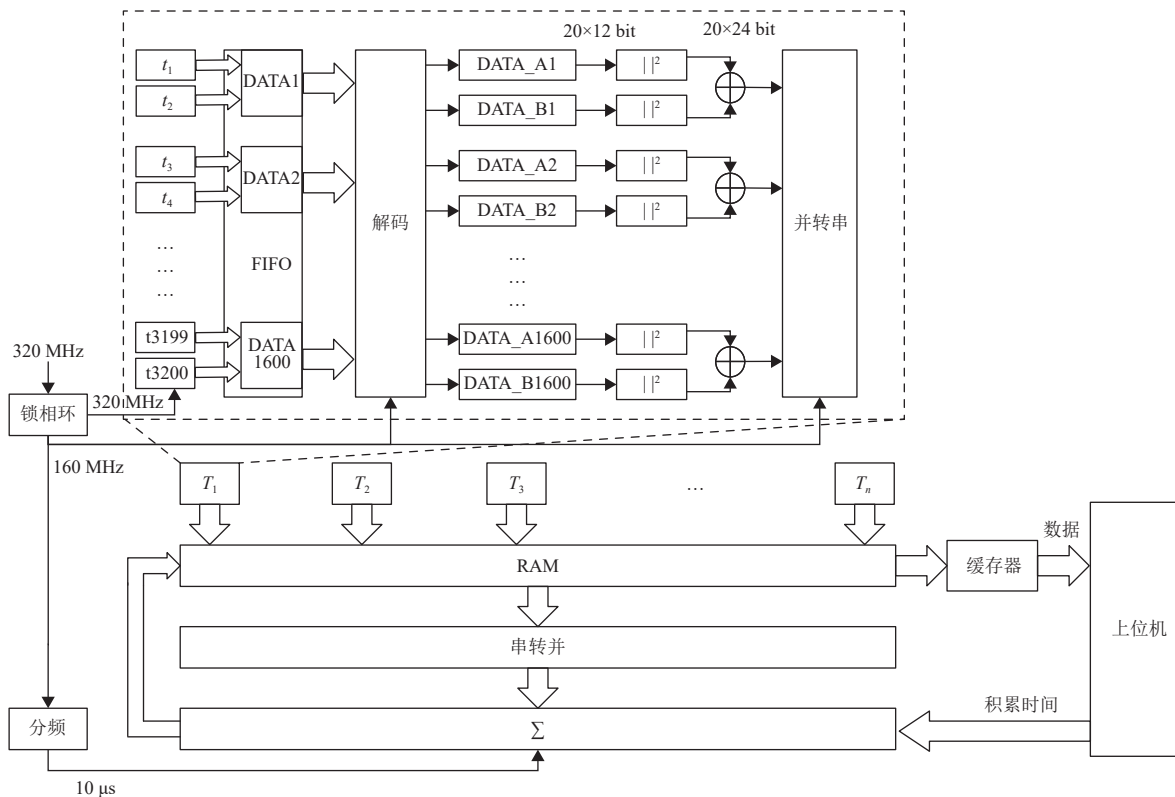


图 6 CTS系统脉冲积累算法流程图
Fig. 6 Flowchart of pulse accumulation algorithm for CTS system

FPGA脉冲积累算法采用流水线方式进行数据处理，并采用多路数据并行处理、串行储存的方式来保证数据流处理与缓存之间的同步性。确保不丢失每一帧频谱信息。由于过高的数据处理速度不仅会带来高功耗，还可能导致数据进入亚稳态，进而影响数据的准确性，致使积累后的脉冲发生畸变。因此在脉冲积累前，需要通过先进先出（First In First Out, FIFO）模块对进入FPGA的数据流进行降速处理。数据在FIFO模块中缓存两个数据时钟周期后被提取，在时钟速率降低一半的同时保证FIFO两端的数据吞吐量相同。

采样数据依据JESD204B传输协议解码，解码后分为A、B两个分路，其分别对应ADC通道1与通道2的采样结果。两路信号间存在90°相位差。利用乘法器与加法器对两路信号进行功率谱计算，随后依照帧时钟进行周期积累。积累过程的中间数据经过并串转换后储存在RAM的不同地址位，待新的积分周期到来时读取RAM的数据并经过串并转换后与新一轮周期的数据对应累加。当达到给定的积分时间后，积累结果存储在缓存区域，并最终传输到上位机进行显示与储存。

这种数据处理和存储的流程保证了CTS系统脉冲积累的实时性与准确性。在确保连续处理信号频谱信息的同时，实现了脉冲信号的精准积累。

3 系统平台构建与测试

3.1 系统平台构建

CTS系统主要由用于生成Chirp信号的DDS，用于混频、放大的模拟电路、用于进行卷积运算的SAW线性调频色散延迟线，以及用于脉冲积累的ADC与FPGA共同组成，CTS系统实物如图7所示。

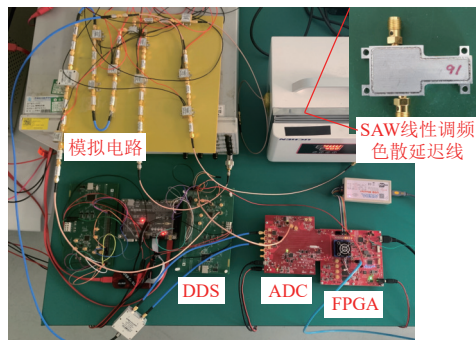


图 7 CTS系统实物图
Fig. 7 Physical drawing of CTS system

中频信号经过滤波、放大，并与DDS产生的Chirp信号混频后进入SAW线性调频色散延迟线，得到脉冲压缩后的信号。由于SAW线性调频色散延迟线的色散

时间对温度十分敏感, 因此需要将其放置在恒温箱以保持稳定的工作条件。高速ADC对脉冲压缩后的信号进行实时、高速采集, 随后交由FPGA进行功率谱计算与脉冲积累。积累后的数据将被传输到上位机进行进一步的处理和分析。

3.2 测试结果与分析

3.2.1 脉冲宽度与CTS系统频率分辨率

为验证CTS系统时序控制与脉冲积累方案的有效性及其准确性, 向系统输入频率2.7 GHz的正弦波信号, 分别观察信号在不同积累脉冲数下的脉冲宽度。积累脉冲数分别为 $N = 1$ 、 $N = 10$ 和 $N = 100$ 时的脉冲放大视野如图8所示。

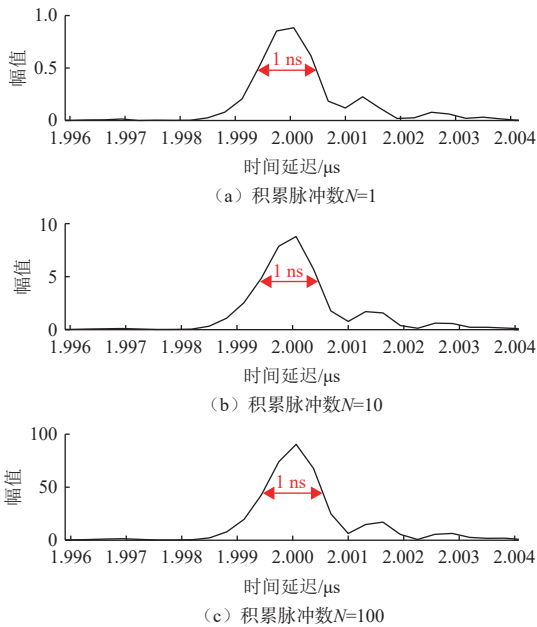


图 8 不同积累次数下脉冲放大视野
Fig. 8 Pulse plots with different accumulation times

图8中0~10 μs 时间延迟分别对应2.5~3.5 GHz的频率信息。观察不同积累脉冲数下脉冲信号的放大视野, 可以看出积累前后脉冲主瓣的3 dB宽度均约为1 ns, 与理论所得的脉冲宽度相当。因此, 本文设计的针对1 GHz大带宽CTS系统的同步方案及积累算法能够实现模拟与数字部分的周期性同步并完成对后端1 ns宽度窄脉冲的精准积累。

以0.5GHz的频率间隔向系统输入2.5~3.5 GHz的正弦波信号, 每个频率点积累5 s后得到整个频带内的积分结果。利用半宽高法(Full Width at Half Maximum, FWHM)取半峰值点对应的脉冲宽度, 得到每一个测试频率点的主瓣3 dB脉冲宽, 结果如图9所示。

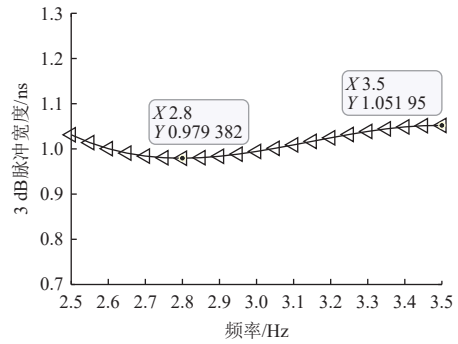


图 9 系统频带内不同输入频率下3 dB脉冲宽度
Fig. 9 3 dB pulse width at different input frequencies in the system band

系统频带内测试到的3 dB脉冲宽度最高约为1.052 ns, 最低约为0.979 4 ns, 带内平均脉冲宽度约为1.013 6 ns。由于在功率谱条件下, 理论所得的半峰宽要略小于包络条件下1 ns的脉冲宽度, 因此某些频点所测得的3 dB脉冲宽度会优于1 ns。由脉冲宽度可得到系统的平均频率分辨率为101.36 kHz, 该结果与JUICE探测器搭载的CTS系统分辨率相当, 满足了CTS系统对频率分辨率的需求。

3.2.2 脉冲积累对信噪比的改善

脉冲积累是提高抑制噪声, 增强信号特征的有效手段, 不同的积累次数对信噪比的改善程度不同。向系统输入带有加性高斯噪声频率3 GHz的正弦波信号, 输入系统的信噪比为-10 dB。不同积累脉冲数下的频谱图如图10所示。

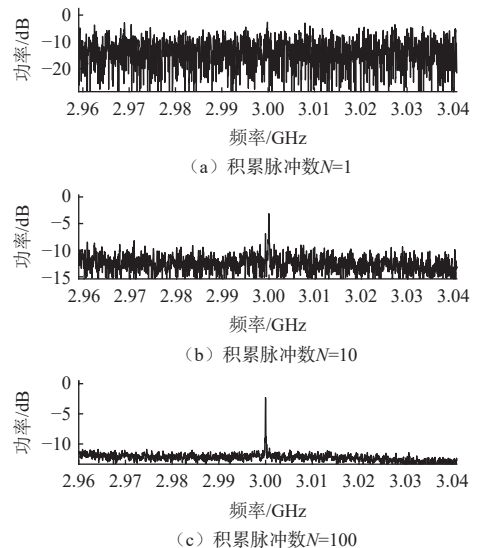


图 10 不同积累脉冲数下的频谱图 (SNR = -10 dB)
Fig. 10 Spectrogram with different numbers of accumulated pulses (SNR = -10 dB)

通过对比积累次数 $N = 1$ 、 $N = 10$ 与 $N = 100$ 时的噪声水平, 可以明显看出脉冲积累有效抑制了噪声, 提

高了信噪比。且随着积累脉冲数的提高,其对噪声的抑制性能越好。为评估CTS系统非相参积累对信噪比的改善程度,假设在积累后噪声电平低于脉冲幅值1 dB的条件下,所需的最小输入信噪比,即检测因子为 D_0 。经过 N 次非相参积累后仍满足上述条件时,所需的最小输入信噪比为 D_n ,则非相参积累增益为

$$G_n = D_0 - D_n \quad (6)$$

向系统分别输入信噪比为 $-30 \sim 0$ dB的测试信号,并对其进行不同次数的积累。本系统积累后噪声电平低于信号幅值1 dB的条件下,系统最小输入信噪比与积累脉冲数之间的关系如图11所示。

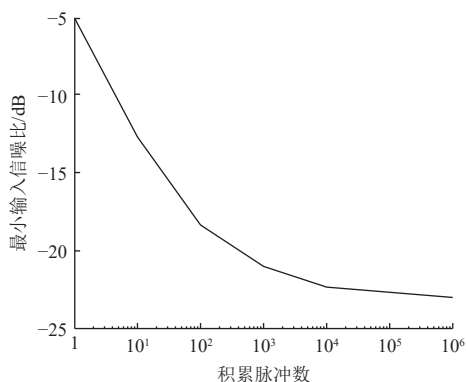


图11 1 GHz带宽CTS系统最小输入信噪比与积累脉冲数之间的关系
Fig. 11 Relationship between the minimum input signal-to-noise ratio and the number of pulse accumulations for the 1 GHz bandwidth CTS system

由图11可知,本文设计的CTS系统随着积累脉冲数的增加,满足给定条件所需的最小输入信噪比越低,即对信噪比的改善程度越好。但脉冲积累对信噪比的改善并不是无限的,随着脉冲积累次数的增加,其对信噪比的改善幅度也随之减弱。当积累脉冲数达到 10^3 时,非相参积累增益为16 dB,而当积累脉冲数增加到 10^6 时,非相参积累增益为18 dB,仅增加2 dB。因此,在实际应用时应选择合适的积累次数。

4 结论

Chirp变换频谱仪是深空探测领域的重要工具,频率分辨率是衡量其性能的关键指标。本文针对1 GHz带宽Chirp变换频谱仪脉冲宽度窄的特点,及系统对微弱信号检测的需求,从系统各模块间时序同步与控制及基于FPGA的脉冲积累算法设计两个方面实现了高精度、实时的CTS系统脉冲积累。通过试验测试,验证了CTS系统时序控制与脉冲积累方案的有效性,测得不同输入频率下带内平均3 dB脉冲宽度可达1.0136 ns,相应的频率分辨率101.36 kHz,这与JUICE探测器搭载

的CTS系统精度相当,满足了CTS系统对频谱分辨率精度的需求,为实现中国深空探测任务高精度频谱分析提供了有效解决问题的途径。此外,进一步讨论了积累脉冲数对系统信噪比的影响,并给出了噪声电平低于脉冲幅值1 dB的条件下,积累脉冲数与最小输入信噪比之间的关系,为CTS系统在深空微弱信号探测领域的进一步应用打下了基础。

参 考 文 献

- [1] 冯丽妃,王敏,孟凌霄. 中国深空探测迈向更深更远处[EB/OL]. (2023-04-25)[2023-11-10]. https://www.cas.cn/cm/202304/t20230425_4885163.shtml.
FENG L F, WANG M, MENG L X. China's deep space exploration moves deeper and farther[EB/OL]. (2023-04-25)[2023-11-10]. https://www.cas.cn/cm/202304/t20230425_4885163.shtml.
- [2] 刘丰,朱忠博,崔万照,等. 太赫兹技术在空间领域应用的探讨[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(6): 857-866.
LIU F, ZHU Z B, CUI W Z, et al. Exploration of Terahertz technology applications in space[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(6): 857-866.
- [3] 陈林杰,颜毅华,刘飞,等. 基于多相滤波器的宽带射电频谱仪设计[J]. 天文研究与技术, 2010, 7(2): 89-94.
CHEN L J, YAN Y H, LIU F, et al. Design of broadband radio spectrometer based on multiphase filters[J]. Astronomical Research & Technology, 2010, 7(2): 89-94.
- [4] HORN J, SIEBERTZ O, SCHMULLING F, et al. A 4×1 GHz array acousto-optical spectrometer[J]. *Experimental Astronomy*, 1999, 9(1): 17-38.
- [5] 张坚,王建华,罗先汉. 用于分子谱线观测的512路数字式自相关频谱仪[J]. 天文学报, 1995(1): 80-85.
ZHANG J, WANG J H, LUO X H. A 512-channel digital autocorrelation spectrometer for molecular spectral line observations[J]. Acta Astronomica Sinica, 1995(1): 80-85.
- [6] KLEIN B, PHILIPP S D, GUSTEN R, et al. A new generation of spectrometers for radio astronomy: fast Fourier transform spectrometer[C]//Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. [S. l.]: SPIE, 2006.
- [7] KLEIN B, HOCHGURTEL S, KRAMER I, et al. High-resolution wide-band Fast Fourier Transform spectrometers[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2012, 542(2): 1075-1082.
- [8] HARTOGH P, FUJISADA H. Present and future chirp transform spectrometers for microwave remote sensing[C]//Proceedings of Sensors, Systems, & Next-generation Satellites. [S. l.]: International Society for Optics and Photonics, 1997: 328-339.
- [9] GULKIS S, FRERKING M, CROVISIER J, et al. MIRO: microwave instrument for Rosetta Orbiter[J]. *Space Science Reviews*, 2007, 128: 561-597.
- [10] HEYMINCK S, GRAF U U, GUSTEN R, et al. GREAT: the SOFIA high-frequency heterodyne instrument[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2012, 542: L1.
- [11] KOTIRANTA M, JACOB K, et al. Optical design and analysis of the

- submillimeter-wave instrument on JUICE[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2018, 8: 588-595.
- [12] 陈东培, 宫俊杰, 周献文, 等. 一种新型射电天文频谱仪——声表面波频谱仪[J]. *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*, 1993(1): 85-91.
- CHEN D P, GONG J J, ZHOU X W, et al. A new type of radio astronomy spectrometer--Surface acoustic wave spectrometer[J]. *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*, 1993(1): 85-91.
- [13] 张晋, 王娜, 艾力·伊, 等. 乌鲁木齐25m射电望远镜的单天线观测研究[J]. *天文学进展*, 2000(4): 271-282.
- ZHANG J, WANG N, AILI Y, et al. Single-antenna observational study of the Urumqi 25m radio telescope[J]. *Progress in Astronomy*, 2000(4): 271-282.
- [14] 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, 188.
- HE X Q, DONG X L, ZHU D, et al. Design and test of a broadband low-power spectrometer for deep space exploration[J]. *International Electronic Elements*, 2019, 27(3): 178-183, 188.
- [15] 王业欢, 董晓龙, 朱迪, 等. 一种用于深空探测的Chirp变换频谱分析仪设计与实现[J]. *空间科学学报*, 2021, 41(6): 945-953.
- WANG Y H, DONG X L, ZHU D, et al. Design and implementation of a Chirp transform spectrum analyzer for deep space exploration[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2021, 41(6): 945-953.
- [16] 茹鹏磊, 刘梦伟, 宫俊杰等. 用于深空探测的400 MHz带宽Chirp变换频谱分析仪的设计与实现[J]. *空间科学学报*, 2022, 42(5): 991-1003.
- RU P L, LIU M W, GONG J J, et al. Design and implementation of a 400 MHz bandwidth Chirp transform spectrum analyzer for deep space exploration[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, 42(5): 991-1003.
- [17] 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 H S, MA L Q, LIU M W, et al. Design of a chirp transform spectrum analyzer and implementation of its digital part[J]. *Metrology and Measurement Technology*, 2019, 39(5): 29-36.
- [18] RU P L, LIU M W, GONG J J, et al. A spectrum analyzer system with wide bandwidth and high frequency resolution based on chirp transform[J/OL]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2021. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/mop.33130>.
- [19] 丁鹭飞, 耿富录, 陈建春. 雷达原理[M]. 第5版. 北京: 电子工业出版社, 2014: 195-197.
- [20] 张涛, 幸涛, 潘璠. 脉冲压缩及相参积累在激光雷达中的应用[J]. *激光与红外*, 2022, 52(8): 1143-1146.
- ZHANG T, XING T, PAN F. Pulse compression and phase parameter accumulation for LIDAR applications[J]. *Laser and Infrared*, 2022, 52(8): 1143-1146.
- [21] PAGANINI L. Power spectral density accuracy in chirp transform spectrometers [D]. Freiburg im Breisgau: Albert-Ludwigs-Universität, 2008.
- [22] 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 J T, MA G Y, WAN Q T, et al. Chirp signals in astronomical observations[J]. *Astronomical Research & Technology*, 2017, 14(4): 443-451.

作者简介:

胡白帆(1999-), 女, 博士研究生, 主要研究方向: 高分辨率Chirp变换频谱仪信号处理及补偿研究。

通信地址: 中国科学院声学研究所(100190)

电话: 16601509619

E-mail: hubaifan@mail.ioa.ac.cn

刘梦伟(1978-), 女, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: 微声学信号处理器及系统研究。**本文通信作者。**

通信地址: 中国科学院声学研究所(100190)

E-mail: liumw@mail.ioa.ac.cn

Design and Implementation of High-Precision Pulse Accumulation for Deep Space Exploration Chirp Transform Spectrometer

HU Baifan^{1,2}, LIU Mengwei¹, RU Penglei^{1,2}, WANG Wen¹

(1. Ultrasonics Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of 1 GHz bandwidth Chirp transform spectrometer with high time resolution and narrow pulse width, as well as the demand for detection of weak signals, a real-time and high-precision back-end timing synchronization and pulse accumulation scheme for CTS system is proposed, which also has the advantage of adjustable integration time. The scheme achieves the synchronization control between the analog and digital parts of the 1 GHz bandwidth CTS system and the precise accumulation of 1 ns narrow pulse in the back-end through system clock design and FPGA algorithm design, in order to ensure that the system achieves a high frequency resolution. Through this synchronization scheme, The average in-band pulse width of the system after accumulation is 1.0136 ns, and the corresponding frequency resolution is 101.36 kHz, which is comparable to the resolution of the CTS carried by the JUICE of ESA, and provides an effective solution to realize the high-precision spectrum analysis of China's deep-space exploration mission.

Keywords: deep space exploration; chirp transform spectrometer; pulse integration; synchronous control; high-frequency resolution

Highlights:

- The Chirp Transform Spectrometer (CTS) is an important system in the back-end of terahertz spectrometers in deep space exploration, and the high timing accuracy of its pulse accumulation is the key to guaranteeing the frequency resolution of the CTS.
- A high-precision timing synchronization and pulse accumulation scheme for the 1 GHz bandwidth Chirp transform spectrometer is proposed, which realizes the synchronization control among the modules of the CTS system and the precise accumulation of narrowband pulses at the system's back end.
- The accumulated pulse width is 1.0136 ns and the system frequency resolution reaches 101.36 kHz, comparable to the resolution of the CTS carried by the JUICE of ESA.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]