

文章编号: 1672-8785(2014)07-0005-07

傅里叶变换光谱相位校正的 FPGA 实现方法

刘加庆^{1,2} 丁 雷^{1,2}

(1. 中科院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083 ;

2. 中科院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要: 傅里叶变换光谱仪因具有分辨率高等优点已被用于新一代大气垂直探测仪。这种光谱仪获取的数据量很大, 只有进行星上数据处理才能降低数据发送量。方法之一是在轨光谱复原。由于非零光程差采样等原因使采样干涉图存在相位差, 经傅里叶变换得到的复数光谱需进行相位校正以获得实数谱。FPGA(Field-Programmable Gate Array)是一种很有应用前景的星上数据处理硬件平台。阐述了相位误差的来源及几种相位校正方法。平方根法适于 FPGA 硬件实现。针对采用传统方法计算平方根时需要很多硬件资源及精度较差的问题, 提出采用 CORDIC(Coordinate Rotation Digital Computer)算法完成复数光谱模值和相位角的计算。重点论述了 CORDIC 算法的 FPGA 实现结构, 分析了其实现的精度、速度和所需的硬件资源。结果表明, 采用 CORDIC 算法计算, 复数光谱的相位和模值具有很好的精度和速度, 所需的硬件资源较少。

关键词: 傅里叶变换; 相位校正; 求模法; CORDIC 算法; FPGA; 在轨光谱复原

中图分类号: TH744.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.07.002

Implementation of Phase Correction for Fourier Transform Spectrum Using FPGA

LIU Jia-qing^{1,2}, DING Lei^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Laboratory of Infrared Detection and Imaging, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Because of the advantages of high resolution etc, Fourier transform spectrometers have been used as a new generation of atmospheric sounders. Such a spectrometer will acquire a very large quantity of data. To reduce the amount of the data to be transmitted, the data should be processed on board. One of the methods is use of in-orbit spectral recovery. Since there exists phase difference in the interferograms sampled by non zero optical path difference sampling, the complex spectra obtained by using Fourier transformation should be corrected in phase so as to generate the real spectra. The Field-Programmable Gate Array (FPGA) is a promising on-board data processing hardware platform. Phase error sources and phase correction methods are presented. The square root method is suitable for a FPGA to implement. In view of the problem that a lot of hardware resources are needed and poor precision is obtained when the square root is calculated by using the traditional method, a Coordinate Rotation Digital Computer (CORDIC) algorithm is proposed for the calculation of complex modulus

收稿日期: 2014-04-12

基金项目: 中科院上海技术物理研究所创新专项(Q-DX-19)资助

作者简介: 刘加庆(1986-), 男, 山东日照人, 博士研究生, 研究方向为红外干涉仪器的实时数据处理技术。

E-mail: nlia9128@126.com

spectrum and phase angle. The FPGA implementation structure of the CORDIC algorithm is mainly discussed, and the required precision, speed and hardware resources are analyzed. The results show that the phase and modulus of complex spectra are good in precision and speed when the CORDIC algorithm is used. Less hardware resources are needed.

Key words: Fourier transform; phase correction; square root method; CORDIC algorithm; FPGA; on-board spectral recovery

0 引言

大气探测是气象卫星的主要业务之一。通过测量大气顶的红外辐射谱,可反演出大气温度、湿度和气压等地球物理参数的三维垂直分布。傅里叶变换光谱仪具有高通量、多通道、高信噪比、高分辨率和宽波段等优点,我国及美欧等国均已将其选为新一代大气垂直探测仪^[1-3]。但傅里叶变换光谱仪获取的是目标的干涉图,需要经过光谱反演处理才能获得目标光谱。相位校正是光谱反演的环节之一。采用傅里叶光谱仪作为大气垂直探测仪时,由于数据获取量很大,需要进行星上数据处理以降低下传数据率。目前的主要处理方法有干涉图压缩和在轨光谱复原两种。其中,在轨光谱复原处理涉及在轨完成毛刺检测、非线性校正、傅里叶变换和相位校正等部分光谱反演的工作。高密度数据处理对硬件平台的要求很高。FPGA 是一种很具应用前景的硬件,例如 Xilinx V5Q 系列 FPGA 内嵌 DSP48E 及 PowerPC 等,可为星上数据处理应用提供丰富的软硬件资源。美欧等相关机构对此开展了大量的研究^[4-12],并提出了具体方案,如 GSFC(Goddard Space Flight Center) 的 SpaceCube 系列板卡^[9,12]。

对于在轨光谱复原方案,相位校正是一个重要的环节。通过相位校正将复数光谱变为实数,可将数据量降低一半。人们对于相位校正已经进行了很多研究,也摸索出了几种不同的方法,如平方根法、Mertz 乘积法、Forman 卷积法和抛物线匹配法等。

本文首先介绍相位误差的产生原因,然后讨论几种相位校正方法。重点论述 CORDIC 算法的原理及用于模值和相位角计算时的 FPGA 实现结构,并给出一种基于 CORDIC 算法的傅里叶变换光谱相位校正的硬件实现方法。

1 傅里叶变换光谱仪的相位误差

相位误差是指计算得到的光谱与真实光谱之间的相位差,干涉图经傅里叶变换后得到的是复数光谱。产生相位误差的原因有很多,其中最主要的原因是,作为傅里叶变换中心点的干涉图采样点对应的不是干涉光程差的零点位置,导致变换光谱为复数光谱。理论上,光程差零点两侧是对称的干涉图。但实际光谱仪的光程差零点定位不准确,导致采样干涉图不对称。若光程差零点偏移 ε 及其对应的光谱相位差 ϕ 满足 $\phi = 2\pi\nu\varepsilon$, 则非对称干涉图的傅里叶变换表达式为

$$I_D(x) = \int_{-\infty}^{\infty} B(\nu) \exp[i\phi(\nu)] \exp[i2\pi x\nu] d\nu \quad (1)$$

式中, $B(\nu)$ 为复数光谱, $I_D(x)$ 为非对称干涉图, $\phi(\nu)$ 为相位因子。式 (1) 可变为

$$\begin{aligned} B(\nu) \exp[i\phi(\nu)] \\ = \int_{-\infty}^{\infty} I_D(x) \exp[-i2\pi x\nu] dx = B_r(\nu) + iB_i(\nu) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $B_r(\nu)$ 、 $B_i(\nu)$ 分别为干涉图 $I_D(x)$ 傅里叶变换的实部和虚部。

为滤去高频噪声,数据采集系统中一般都装有滤波器。经滤波器滤波后,不同频率的信号会有不同的相位滞后。

此外,造成相位误差的原因还有由干涉仪特征波长引起的干涉仪相位色散、光学装配误差、采样间隔不均匀及探测器和电子系统频率响应不一致等。

根据数学表示的不同,干涉图的相位误差可分为线性相位误差和非线性相位误差两种。其中线性相位误差的主要来源是作为傅里叶变换中心点的干涉图采样点与干涉光程差的零点

位置不对应。导致非线性相位误差的原因有很多,例如分束器由于存在一定的吸收损耗,其反射、透过系数可能随波长缓慢变化等。因此,非线性相位误差表现为波数的缓变函数。

2 傅里叶变换光谱的相位校正方法

多年来,科研人员在相位校正方面进行了很多研究,提出了各种相位校正方法,如抛物线匹配法、平方根法(或称求模法)、Mertz 乘积法、Forman 卷积法、最小二乘拟合法及多项式拟合法等。其中比较常用的有 Mertz 乘积法、Forman 卷积法和平方根法。下面对其做一下简单论述。

2.1 平方根法

由式(2)可知,对该式取绝对值可得到经相位校正的真实目标光谱:

$$|B(\nu)| = \sqrt{B_r^2(\nu) + B_i^2(\nu)} \quad (3)$$

该方法运算简单,便于用硬件实现,可自动消除相位误差。由于该方法使用双边干涉图,不需要对干涉图的零光程差点进行精确定位,具有较好的相位校正能力。但该方法存在以下不足:(a)要获取与单边采样同样的光谱分辨率,双边采样的数据量是单边采样的两倍;(b)在求模过程中,系统随机噪声也会被求模叠加,使信噪比降低,在干涉信号较弱时尤其明显。

2.2 Mertz 乘积法^[13]

采用 Mertz 乘积法进行相位校正时,在零光程差的一侧采集很短的干涉图数据,在零光程差的另一侧采集分辨率所要求的干涉图数据(最大光程差 L)。然后在零光程差位置的两侧选取很短的双边干涉图,对其进行傅里叶变换等处理,获取相位差。使用该相位差在频域内完成相位校正,步骤如下:

(1) 对小双边干涉图进行切趾处理。

(2) 将小双边干涉图零光程差点的左侧部分平移到右侧,得到对称的双边干涉图,再经傅里叶变换得到复数光谱。计算相位误差时:

$$\theta(\nu) = \arctan \frac{Im(\nu)}{Re(\nu)} \quad (4)$$

式中, $Re(\nu)$ 和 $Im(\nu)$ 分别是小双边干涉图对应复数光谱的实部和虚部, $\theta(\nu)$ 为误差相位。

(3) 根据小双边干涉图和单边干涉图的点数,对相位误差进行插值处理,得到与单边干涉图对应的带内复数光谱长度一致的修正相位 $\theta(\nu_i)$ 。

(4) 对单边干涉图进行傅里叶变换,得到复数光谱。用修正相位对带内复数光谱进行相位校正,得到经相位校正的实数谱:

$$B(\nu) = B_i(\nu_i) \cos(\theta(\nu_i)) + B_r(\nu_i) \sin(\theta(\nu_i)) \quad (5)$$

式中, $B_i(\nu_i)$ 和 $B_r(\nu_i)$ 分别是单边干涉图对应复数光谱的实部和虚部, $B(\nu)$ 为经相位校正后的光谱。

针对步骤(3)相位插值所引起的误差,有人提出采用正弦相位和余弦相位进行校正。

另外,为减少因插值步骤造成的误差,有人提出了二次插值、牛顿插值 and 多项式拟合等新的插值方法。

Mertz 乘积法假设由零点偏移等引起的相位误差大体上随波数缓慢变化,先计算出一个低频域分辨率的相位误差,然后通过插值等手段获得全频域的相位差。因此, Mertz 法对线性相位误差的校正效果较好,但对非线性误差的校正存在较大的残差,反演光谱存在较大的残差。由于 Mertz 法只进行两次傅里叶变换和插值以及多次乘法运算,较 Forman 卷积法计算速度快,因此 Mertz 法比较适合软件实现,但用硬件实现比较困难。

2.3 Forman 卷积法^[14]

Forman 卷积法在零光程位置取小光程差的双边干涉图计算出相位差,然后在干涉图域用该相位差与整个干涉图作卷积,获得对称干涉图,完成相位校正。其步骤如下:

(1) 对小双边干涉图进行切趾处理。

(2) 小双边干涉图经傅里叶变换得到复数光谱,由式(4)求出相位误差 $\theta(\nu)$; 然后计算 $F(\Delta)$

$$\begin{aligned} F(\Delta) &= FFT[exp(i\theta(\nu))] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} (\cos(\theta(\nu)) + i \sin(\theta(\nu))) exp(-2\pi i \theta(\nu) \Delta) d\Delta \end{aligned} \quad (6)$$

(3) 对 $F(\Delta)$ 进行切趾处理, 然后与采样干涉图 $I_D(x)$ 做卷积。

(4) 判断卷积结果是否对称。若不对称, 重复步骤 1~4, 直到干涉图对称。对单边干涉图进行傅里叶变换, 即得反演光谱。

Forman 法只改变相位, 真实的光谱信息保持不变。因此, 可用多次卷积的方法对相位误差进行修正, 提高相位校正的精度。对线性和非线性相位误差的校正效果都比较好, 不存在随机信号取模相加的问题。获得的复原光谱的信噪比较高, 但其计算过程复杂, 计算量大, 时间长, 用硬件实现该算法非常困难。

由以上讨论可知, 平方根法算法简单, 便于 FPGA 硬件实现, 适用于实时相位校正。但由于它直接对复数光谱取模值, 会降低光谱信号的信噪比。因此可以在干涉图域对目标场景的干涉图进行背景剔除和对多幅干涉图进行叠加均值处理, 以改善信噪比。对于传统的平方根计算方法如实函数近似法、牛顿迭代法、SRT-冗余算法和非冗余算法等, 如果采用硬件实现, 需要消耗很多硬件资源, 而且速度和精度较差。为解决这一问题, 我们引入 CORDIC 算法完成平方根计算, 以满足实时相位校正所需的精度和速度, 同时减少硬件资源的消耗。

3 用 CORDIC 算法计算平方根

3.1 CORDIC 算法的原理^[15]

CORDIC 算法是计算广义向量旋转的一种迭代方法, 由 J.E.Volder 于 1959 年提出。该算法最初被用于直角坐标系和极坐标系变换 (图 1)。

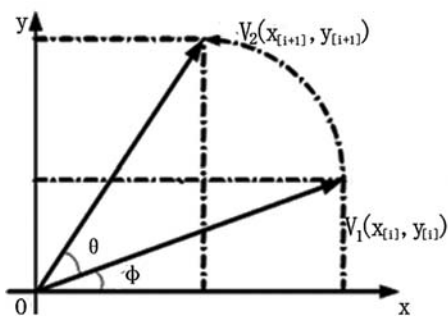


图 1 直角坐标系下的向量旋转

初始化向量 V_1 旋转角度 θ , 得到向量 V_2 , 则有:

$$\begin{cases} x_{[i+1]} = x_{[i]} \cos(\theta) - y_{[i]} \sin(\theta) \\ y_{[i+1]} = y_{[i]} \cos(\theta) + x_{[i]} \sin(\theta) \end{cases} \quad (7)$$

经整理后, 得到:

$$\begin{cases} x_{[i+1]} = \cos(\theta)(x_{[i]} - y_{[i]} \tan(\theta)) \\ y_{[i+1]} = \cos(\theta)(y_{[i]} + x_{[i]} \tan(\theta)) \end{cases} \quad (8)$$

若将角 θ 分为一系列角度 θ_i , 每次旋转角度 θ_i , 旋转方向记为 $d_i(-1$ 或 $+1)$, 则向量 V_1 经 n 次旋转转过的角度 $\theta = \sum_{i=1}^n d_i \theta_i$, 实现向量 V_1 到向量 V_2 的旋转。为便于用硬件实现, 作如下约定: 每次旋转角度 θ_i 的正切值为 2 的倍数, 即 $\theta = \tan^{-1}(2^{-i})$ 。经典 CORDIC 算法的表达式为

$$\begin{cases} x_{[n]} = \prod_{i=0}^{n-1} \cos(\theta_i)(x_{[i]} - d_i \tan(\theta_i) y_{[i]}) \\ y_{[n]} = \prod_{i=0}^{n-1} \cos(\theta_i)(d_i x_{[i]} \tan(\theta_i) + y_{[i]}) \\ z_{[n]} = z_{[0]} + \sum_{i=1}^n d_i \theta_i \end{cases} \quad (9)$$

引入校正因子 k

$$k = \prod_{i=0}^{n-1} \cos(\theta_i) = \prod_{i=0}^{n-1} \sqrt{\frac{1}{1 + 2^{-2i}}}$$

显然, 若令 $d_i = -\text{sign}(y_{[i]})$ (即向量模式), $(x_{[0]}, y_{[0]}) = (B_r(\nu), B_i(\nu))$, 那么, 理论上经过无穷多次迭代便可以得到

$$\begin{cases} x_{[n]} = \frac{\sqrt{B_r^2(\nu) + B_i^2(\nu)}}{K} = \frac{B(\nu)}{K} \\ y_{[n]} = 0 \\ z_{[n]} = \arctan\left(\frac{B_i(\nu)}{B_r(\nu)}\right) \end{cases} \quad (9)$$

由上式可知, 经过一系列的迭代累加操作, 便可完成复原复数光谱相位和模值的计算, 非常适合用 FPGA 实现。实际应用中, 可根据需要选择仅计算模值或相位角, 以减少硬件资源的消耗。

由于我们只需要获取平方根值, 不需要获取角度值, 因此出于节省硬件资源的考虑, 不进行角度值的迭代, 只进行坐标值的迭代。对式 (10) 的 x 坐标值进行模校正, 获得经相位校正的光

谱值 $B(\nu)$ 。直接计算 $B(\nu) = kx_{[n]}$ 非常消耗硬件资源。注意到校正因子 k

$$k = \prod_{i=0}^N \sqrt{\frac{1}{1+2^{-2i}}} \approx 0.6073 \approx 622/1024$$

通过 CSD 编码可得

$$622 = (1001101110)_2 \Rightarrow (10100\bar{1}00\bar{1}0)_2$$

这里除以 1024 可通过右移 10 位实现。622 的 CSD 编码结果为 $(10100\bar{1}00\bar{1}0)_2$, 每个“1”代表需要一个加法器, 每个“ $\bar{1}$ ”代表需要一个减法器, 因此只需要使用 1 个加法器、2 个减法器并进行 4 次移位操作, 就可完成乘以 622 的操作。因此, $B(\nu) = kx_{[n]}$ 的计算只需要使用 1 个加法器和 2 个减法器并进行 4 次移位操作就可完成, 大大节省了硬件资源, 且与各级流水保持结构一致。以上就是基于 CORDIC 算法的傅里叶变换光谱的平方根相位校正。

实际上在用硬件实现时, 如果用有限次迭代的有限位数的值近似“真值”, 操作数位数越多, 迭代次数越多, 误差就越小, 但消耗资源也越多。这个矛盾要求我们必须在数据位数、迭代次数与误差之间进行合理选择。

3.2 CORDIC 算法的误差分析

CORDIC 算法的计算误差与所选的迭代级数和操作数位宽有关。计算误差主要有角度误差和截断误差。角度误差是指实际旋转角度和理想旋转角度之差。截断误差是指由每次迭代的有限操作数位宽引起的误差, 因为在每次迭代中, 乘以 2^{-k} 是由 $y[k] \gg k$ 等的右移来实现的。

由于实际应用时, 数据位宽与格式已经确定, 因此光谱模值及相位角的计算精度主要由迭代次数决定。

CORDIC 算法通过迭代计算逼近真值。但是迭代次数越多, 所需的硬件资源也越大, 因此需要在迭代次数与误差之间进行折中。

由图 2(假定数据位宽为 32 位)可知, 当迭代次数到达 20 次后, 该算法的相对误差下降到 10^{-7} 。若迭代次数继续增加, 相对误差还会缩

小, 但缩小的幅度很小。为了在用硬件实现时留有一定的余量, 选择迭代次数为 23 次。

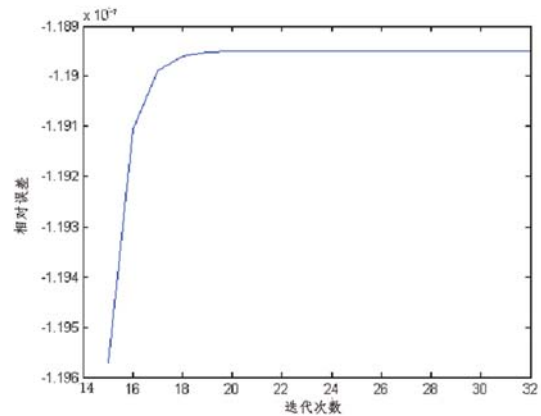


图 2 迭代次数与相对误差

4 CORDIC 算法的 FPGA 实现

根据以上分析, 我们决定采用 23 次迭代。考虑到速度要求, 采用 FPGA 流水结构来实现 CORDIC 算法。

4.1 流水实现结构 [15,16]

流水结构是指用与总迭代次数相同个数的迭代单元来进行并行处理, 将前一迭代单元输出作为后一迭代单元的输入。当所有迭代单元都满负荷工作时, 经过固有的初始化时间后, 每一时钟周期都能产生一个输出结果。CORDIC 算法的 FPGA 流水实现结构如图 3 所示。

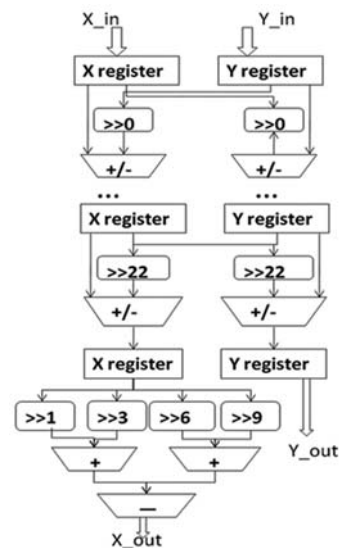


图 3 CORDIC 算法的 FPGA 流水实现结构

考虑到实际应用及节省硬件资源, 仅对 X 的结果即模值进行校正。FPGA 中用 $X_{out} \leq X22 \gg 1 + X22 \gg 3 - X22 \gg 6 - X22 \gg 9$ 即通过四次移位操作实现模值校正。

4.2 算法功能仿真

用 ISE12.3 软件对本设计进行了功能仿真,

仿真波形如 4 所示。

4.3 性能分析

从仿真结果中选取 6 个值, 并将结果与 Matlab 计算结果进行对比, 见表 1。

由表 1 可以看出, 本设计实现了较高精度的平方根计算, 可满足相位校正的需要。

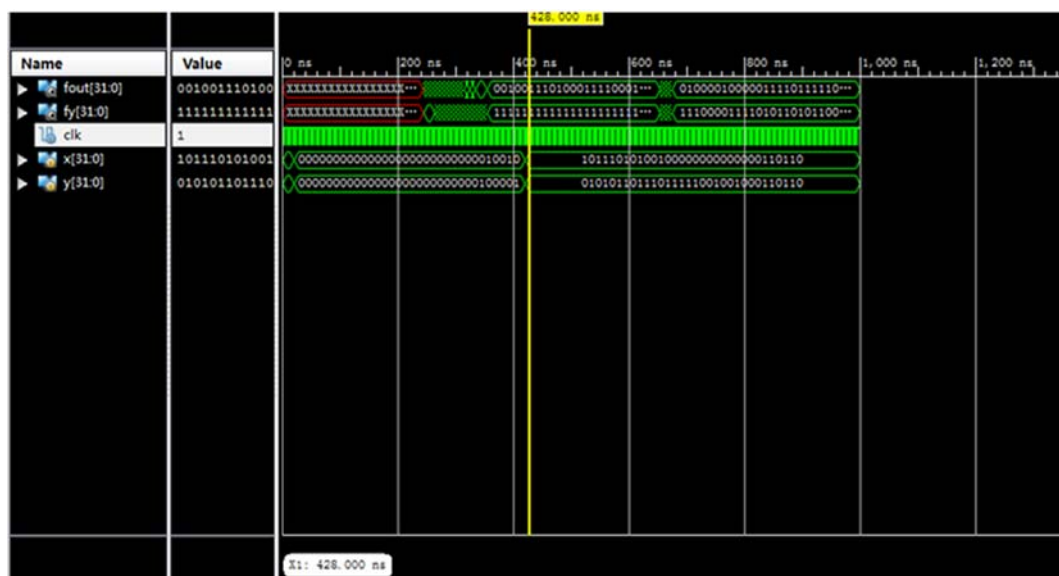


图 4 ISE 时序仿真波形图

表 1 结果分析

X(x_in)	X(Hex)	Y(x_in)	Y(Hex)	X_out	Sqrt(X)	相对误差
2.9371	0BBF9724	0.7941	032D288C	0C2D9F55	3.0426	-2.9×10^{-6}
24.727	62F872B0	1.4054	059F221D	63114E3D	24.7669	1.2×10^{-6}
33.5302	861DDCBF	4.1685	10AC8B43	8727381D	33.7883	-2.0×10^{-6}
7.7361	3DE1C432	1.61	0670A3D7	1F9D8DAC	7.9019	1.6×10^{-6}
14.0449	382CEA43	-1.6845	FD43123F	3895182A	14.1456	-3×10^{-6}
7.6917	1EC44D01	-1.7932	F8D3C362	1F978D4F	7.8980	-2.9×10^{-6}

我们在 XUPV5-LX110T 开发板上实现了该算法, 其资源使用情况见表 2。

表 2 算法综合报告

资源名称	使用量	可用量	占用比例
Slice Registers	1646	69120	2%
Slice LUTs	3215	81920	3%
Bonded IOBs	129	840	15%
BUFG	1	32	3%
Minimum period	4.569ns(frequency: 218.861MHz)		

5 结论

对于干涉图在轨光谱复原等高计算密度数据处理, FPGA 是一种很有应有前景的平台硬件^[17]。相位误差是影响傅里叶变换光谱仪数据质量的重要因素。复原复数光谱的模值和相位角的计算是相位校正的重要内容。本文通过引入 CORDIC 算法, 在 FPGA 内通过移位累加运算, 以较少的硬件资源和速度实现高精度的复数光谱的模值和相位计算, 可应用于星上实时

数据处理等实时性要求较高和硬件资源受限的情况。CORDIC 算法用 FPGA 实现时所面临的延迟大和低吞吐率等问题可通过算法结构优化和多路并行来改善。

参考文献

- [1] Glumb R J, Jordan D C, Mantica P. Development of the Crosstrack Infrared Sounder (CrIS) Sensor Design[C].*International Symposium on Optical Science and Technology. International Society for Optics and Photonics*, 2002: 411-424.
- [2] Simeoni D, Astruc P, Miras D, et al. Design and Development of IASI Instrument[C].*Optical Science and Technology, the SPIE 49th Annual Meeting. International Society for Optics and Photonics*, 2004: 208-219.
- [3] YANG J, China's FengYun Meteorological Satellite Programs[R].WMO meeting,2010.
- [4] Pingree P J, Blavier J F L, Toon G C, et al. An fpga/soc Approach to on-board Data Processing Enabling New Mars Science with Smart Payloads[C].*Aerospace Conference, IEEE*, 2007: 1-12.
- [5] Pingree P J, Norton C. Smart Payload Development for High Data Rate Instrument Systems[M]. Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration, 2007.
- [6] Werne T A, Bekker D L, Pingree P J. Real-time Data Processing for an Advanced Imaging System Using the Xilinx Virtex-5 FPGA[C].*Aerospace Conference, IEEE*, 2010: 1-9.
- [7] Yu G, Vladimirova T, Sweeting M N. FPGA-based on-board Multi/hyperspectral Image Compression System[C].*Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009 IEEE International, IGARSS 2009*, 2009,5: V-212-V-215.
- [8] Pingree P J, Bekker D L, Werne T A, et al. The Prototype Development Phase of the CubeSat On-board processing Validation Experiment[C].*Aerospace Conference, 2011 IEEE*, 2011: 1-8.
- [9] Flatley T. Advanced Hybrid on-board Science Data Processor-SpaceCube 2.0[C].*Earth Science Technology Forum*,2010.
- [10] He Y, Le C, Zheng J, et al. ISAAC-a Case of Highly-reusable, Highly-capable Computing and Control Platform for Radar Applications[C].*Radar Conference, 2009 IEEE*, 2009: 1-4
- [11] Roosta R. A Comparison of Radiation-hard and Radiation-tolerant FPGAs for Space Applications[J].*NASA Electronic Parts and Packaging (NEPP) Program JPL D-31228*, 2004.
- [12] He Y, Ashtijou M. iBoard: A Highly-capable, High-performance, Reconfigurable FPGA-based Building Block for Flight Instrument Digital Electronics[C].*IEEE*, 2010.
- [13] Michaelian K H. Interferogram Symmetrization and Multiplicative Phase Correction of Rapid-scan and Step-scan Photoacoustic FT-IR Data[J].*Infrared Physics*, 1989, **29**(1): 87-100.
- [14] Forman M L, Steel W H, Vanasse G A. Correction of Asymmetric Interferograms Obtained in Fourier Spectroscopy[J].*JOSA*, 1966,**56**(1): 59-61.
- [15] Lakshmi B, Dhar A S. CORDIC Architectures: a Survey[J].*VLSI Design*, 2010, **2010**: 1-19.
- [16] 刘荣华, 李艳萍. 基于 CORDIC 算法求解平方根的研究与 FPGA 实现 [J].*电子、通讯与自动控制技术*, 2010,1-11.
- [17] Pingree P J. Advancing NASA's on-board Processing Capabilities with Reconfigurable FPGA Technologies[J]. *Aerospace Technologies Advancements*, 2010: 69-86.

新闻动态 News

到 2019 年, 红外成像和热成像市场将达 52.19 亿美元

据 www.asdreports.com 网站报道, 根据 ASDReports 最近的一份“红外成像和热成像市场研究报告”, 红外成像和热成像市场份额将从 2014 年的 33.50 亿美元增长到 2019 年的 52.19 亿美元, 每年以 9.27% 的年复合增长率增长。该报告是根据技术、部门、应用、区域和国家对红外成像和热成像的市场进行分类的。根

据技术, 市场分制冷和非制冷红外成像和热成像系统两种。根据部门, 市场进一步被分为商用和军用市场。交通、安全与监测、温度记录, 军用车辆视野, 士兵便携式视觉, 与无人驾驶系统等是根据应用分类的。报告讨论的地区有北美洲、欧洲、亚太地区、中东和拉丁美洲。

报告对最近的技术及趋势、技术怎样影响市场、需要面临的挑战及抑制市场增长的因素进行了分析, 分析了区域的消费趋势及区域的市场大小, 提供了各个部门的开支信息。同时讨论了全球红外成像和热成像市场的威胁和竞争对手, 也综述了相关公司以及它们的财务状况、主要产品、市场和发展关键。 □ 张小华