

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2212457

一种射频信号相位差校准方法及系统实现*

宋文强^{1,2} 徐伟^{1,2}

(1.南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心 南京 210044;

2.南京信息工程大学江苏省气象探测与信息处理重点实验室 南京 210044)

摘要: 通信系统中通道材料和环境会对射频信号的相位产生影响,针对传统相位校准方法存在校准频率低、误差大的问题,提出了一种基于软件无线电技术的相位差校准方法。利用快速傅里叶变换和坐标旋转数字计算机求解频谱最大谱线处的相位值,结合数字正交技术完成信号的相位校准。以亿门级 FPGA 为核心搭建实验平台对该方法进行实验测试,利用 Xilinx Artix-7 产生参考和待校准信号,设计亿门级 FPGA 的 DDR3 存储、相位差测量、校准等逻辑电路完成相位差校准。测试结果表明,对于相位差为 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 范围内频率为 1 GHz 的射频信号,经系统校准后相位差的相对误差小于 0.3%,均方根误差仅为 0.07° 。

关键词: 射频信号;相位校准;FPGA;坐标旋转数字计算机;数字正交运算

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

A phase difference calibration method for radio frequency signal and a system implementation

Song Wenqiang^{1,2} Xu Wei^{1,2}

(1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Channel materials and environment in communication system will affect the phase of RF signal. Aiming at the problems of low calibration frequency and large error in traditional phase calibration methods, a phase difference calibration method based on software radio technology is proposed. The phase value of the maximum spectral line is solved by the fast Fourier transform and the coordinate rotation digital computer, and the phase calibration of the signal is completed by combining the digital orthogonal technique. The method was tested experimentally with the billion-gate FPGA as the core. Xilinx Artix-7 was used to generate reference and to be calibrated signals, and logic circuits such as DDR3 storage, phase difference measurement and calibration of billion-gate FPGA were designed to complete phase difference calibration. The test results show that the relative error of phase difference is less than 0.3% and the root-mean-square error is only 0.07° for radio frequency signals with a frequency of 1 GHz in the range of -90° to 90° .

Keywords: radio-frequency signal; phase calibration; FPGA;CORDIC; numerical orthogonal operation

0 引言

受通道材料和环境的影响,通信系统中的射频信号在不同路径传输时会产生相位差,准确测量射频信号的相位差并进行校准,对提高数字通信的可靠性具有重要意义。

传统的相位差测量方法有过零点检测法^[1]、频谱分析法^[2],其中,过零点检测法原理简单、硬件实现容易,但随机噪声对过零点影响大,造成测量精度低。频谱分析法能在一定程度上克服噪声的干扰,但由于信号时域的截断效应,

会造成频谱泄露,导致相位计算出现较大的误差。2017年 Kim 等^[3]提出利用具有相关系数的处理块实现相位校准,对于 1 220.7 Hz 以内的信号校准误差在 0.02° 以内,但信号采样速率仅为 20 MHz,对于射频信号无法实现相位校准。2018年 Jiang 等^[4]通过实时测量信号数据,计算相位延迟,利用倍频器、放大器等硬件电路对传输信号进行相位补偿,对于 1.5 GHz 的信号,校准误差在 0.5° 以内,但是由于电子元器件存在热温漂,当环境温度发生变化时,会导致

收稿日期:2022-12-22

* 基金项目:国家重点研发计划政府间/港澳台重点专项(2021YFE0105500)、国家自然科学基金(41605121)项目资助

信号校准误差也会随之变化。2020 年, Rajagopalan 等^[5]提出了一种基于坐标旋转数字计算机 (coordinate rotation digital computer, CORDIC) 的实时相位校准算法, 该方法运算速度快、抗干扰能力较强, 但系统的均方根误差为 0.2° 。目前, 实际通信系统中, 射频信号的相位差测量要求分辨率为 0.001° , 相对误差在 1% 以内。

大规模、高性能的 FPGA 为利用软件无线电技术^[6]实现相位差校准提供了一种新的途径。基于此, 提出一种快速傅里叶变换^[7] (fast Fourier transformation, FFT) 和 CORDIC^[8] 算法相结合的射频信号相位差校准方法, 并通过 FPGA 验证该方法的有效性。

1 基于 FFT 的相位差测量及校准方法

1.1 相位差测量

设参考信号 $x(t)$ 和待校准信号 $y(t)$ 为同频率不同相位的信号, 采样后的离散信号分别为 $x(n)$ 和 $y(n)$ 。利用快速傅里叶变换将参考信号 $x(n)$ 和待校准信号 $y(n)$ 从时域变换到频域, 即:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp(-j \frac{2\pi}{N} n) = \text{Re}[X(k)] + j \text{Im}[X(k)] \quad (1)$$

$$Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y(n) \exp(-j \frac{2\pi}{N} n) = \text{Re}[Y(k)] + j \text{Im}[Y(k)] \quad (2)$$

式(1)和(2)中, $\text{Re}[X(k)]$ 和 $\text{Im}[X(k)]$ 分别为参考信号 $x(n)$ 在频域的实部值和虚部值, $\text{Re}[Y(k)]$ 和 $\text{Im}[Y(k)]$ 分别为待校准信号 $y(n)$ 在频域的实部值和虚部值。

将参考信号 $x(n)$ 在频域的实部值和虚部值求平方和, 得到参考信号 $x(n)$ 的幅度谱 $|F_n|_x$:

$$|F_n|_x = \sqrt{\text{Re}[X(k)]^2 + \text{Im}[X(k)]^2} \quad (3)$$

由于参考信号 $x(n)$ 和待校准信号 $y(n)$ 为同频不同相的信号, 两路信号的频点相同。利用参考信号 $x(n)$ 的幅度谱 $|F_n|_x$ 找到最大谱线对应的坐标, 即频点。求出参考信号 $x(n)$ 和待校准信号 $y(n)$ 在频点处的相位值, 即:

$$\varphi_0 = \arctan\left(\frac{\text{Im}[X(k)]}{\text{Re}[X(k)]}\right) \quad (4)$$

$$\varphi_1 = \arctan\left(\frac{\text{Im}[Y(k)]}{\text{Re}[Y(k)]}\right) \quad (5)$$

其中, φ_0 和 φ_1 分别为参考信号 $x(n)$ 和待校准信号 $y(n)$ 在频点处的相位值。

将式(4)和(5)求得的相位值求差, 即得到参考信号 $x(n)$ 和待校准信号 $y(n)$ 之间的相位差:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_0 \quad (6)$$

1.2 相位校准方法

根据频点求出两路信号的相位差后, 利用数字正交运

算^[9]的方法来校准信号的相位。假设参考信号 $x(t)$ 和待校准信号 $y(t)$ 分别为初相为 0 和 $\Delta\varphi$ 的正弦信号, 即:

$$x(t) = A \sin(2\pi f t) \quad (7)$$

$$y(t) = A \sin(2\pi f t + \Delta\varphi) \quad (8)$$

其中, A 为幅值, f 为待校准信号的频率。

利用数字下变频 (digital down converters, DDC) 技术将待校准信号 $y(t)$ 转变为 I 路基带信号和 Q 路基带信号。

设 DDC 的本振频率为 f_L , 产生的 I 路和 Q 路基带信号分别为 $y_I(t)$ 和 $y_Q(t)$, 即:

$$y_I(t) = A \sin(2\pi f t + \Delta\varphi) \cdot \cos(2\pi f_L t) = A [\sin(2\pi(f - f_L)t + \Delta\varphi) + \sin(2\pi(f + f_L)t + \Delta\varphi)] \quad (9)$$

$$y_Q(t) = A \sin(2\pi f t + \Delta\varphi) \cdot [-\sin(2\pi f_L t)] = A [\cos(2\pi(f + f_L)t + \Delta\varphi) - \cos(2\pi(f - f_L)t + \Delta\varphi)] \quad (10)$$

将两路基带信号通过 FIR 低通滤波器滤除高频分量:

$$y_{IF}(t) = A \sin(2\pi(f - f_L)t + \Delta\varphi) \quad (11)$$

$$y_{QF}(t) = -A \cos(2\pi(f - f_L)t + \Delta\varphi) \quad (12)$$

滤除高频分量后的复数形式可表示为:

$$y_{IQF}(t) = y_I(t) + j \cdot y_Q(t) = A [\sin(2\pi(f - f_L)t + \Delta\varphi) - j \cdot \cos(2\pi(f - f_L)t + \Delta\varphi)] \quad (13)$$

相位差校准即将待校准信号 $y(t)$ 的初相值 $\Delta\varphi$ 抵消为零, 滤除高频分量后的 I/Q 信号乘以单位相变因子 K , 即:

$$K = e^{j\Delta\varphi} \quad (14)$$

$$y'_{IQF}(t) = y_{IQF}(t) \cdot K = y_{IQF}(t) \cdot e^{j\Delta\varphi} = A [\sin(2\pi(f - f_L)t + \Delta\varphi) - j \cdot \cos(2\pi(f - f_L)t + \Delta\varphi)] \cdot [\cos(\Delta\varphi) - j \cdot \sin(\Delta\varphi)] = A [\sin(2\pi(f - f_L)t) - j \cdot \cos(2\pi(f - f_L)t)] \quad (15)$$

$$y'_{IF}(t) = A \sin(2\pi(f - f_L)t) \quad (16)$$

$$y'_{QF}(t) = -A \cos(2\pi(f - f_L)t) \quad (17)$$

式(14)中, $\Delta\varphi$ 为求得的相位差。式(16)中, $y'_{IF}(t)$ 为 $y'_{IQF}(t)$ 的实部。式(17)中, $y'_{QF}(t)$ 为 $y'_{IQF}(t)$ 的虚部。

将乘以单位相变因子 K 之后的信号 $y'_{IQF}(t)$ 的实部 $y'_{IF}(t)$ 和虚部 $y'_{QF}(t)$ 经过数字上变频^[10], 得到相位校准后的信号 $y'(t)$, 即:

$$y'(t) = A [y'_{IF}(t) \cdot \cos(2\pi f_L t) - y'_{QF}(t) \cdot \sin(2\pi f_L t)] = A [\sin(2\pi(f - f_L)t) \cdot \cos(2\pi f_L t) + \cos(2\pi(f - f_L)t) \cdot \sin(2\pi f_L t)] = A \sin(2\pi f t) \quad (18)$$

由式(18)可知, 通过校准后, 信号 $y'(t)$ 的相位与参考信号相同。校准原理如图 1 所示, 对待校准信号 $y(t)$ 进行数字下变频, 转变为 I/Q 两路基带信号, 将 I/Q 两路基带信号分别看作复数信号的实部和虚部并与相变因子 K 相乘, 得到相位差被抵消的 I/Q 两路基带信号, 最后通过数字上变频技术将信号频率转变为原始信号频率, 得到校准后的信号 $y'(t)$ 。

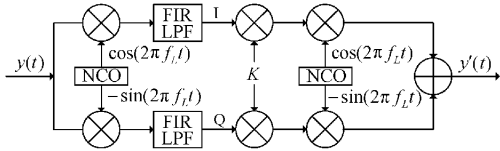


图 1 相位控制原理框图

2 相位校准算法的 FPGA 实现

采用国产新一代的高性能 SRAM 型 FPGA BQR7VX690T 作为硬件实现平台。

通过 MATLAB 软件生成参考信号和待校准信号,将

生成的两路信号存储到 Xilinx Artix-7 系列 FPGA 中,国产亿门级 FPGA 通过 SFP 收发器^[11]接收两路信号并存储到 DDR3 存储器^[12]中,从 DDR3 中读出数据并通过提出 FFT 和 CORDIC 算法完成相位差测量,最后将校准后的信号通过 SFP 收发器输出。

1) 相位差测量电路

采用 FFT 算法和 CORDIC 算法相结合的方法实现相位差测量,相位差测量顶层逻辑电路如图 2 所示,主要包括 FFT 模块、求幅度谱及最大谱线模块、CORDIC 模块和求相位差模块。

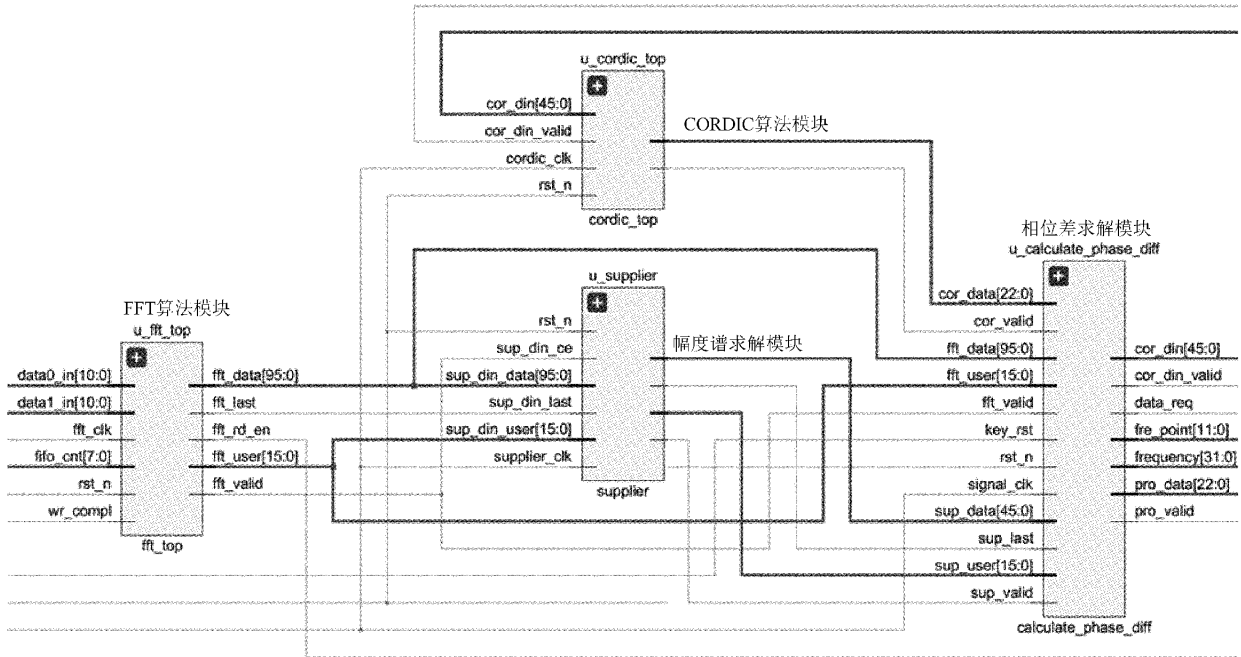


图 2 相位差测量顶层逻辑电路

FFT 算法模块 `fft_top` 通过 FFT IP 核完成 2 048 点的快速傅里叶变换,实现信号从时域到频域的转换^[13],得到信号离散频谱的实部值和虚部值并缓存在两个 RAM 中,以便于计算两路信号在频点处的相位值,无需重新计算信号离散频谱的实部值和虚部值,从而在很大程度上降低资源占用,提高了整体的运算速度。

幅度谱求解模块 `supplier` 对信号离散频谱的实部值和虚部值求平方和再相加,得到信号的幅度谱。由于信号离散频谱的实部值和虚部值存在负值,无法直接对其进行相乘求和,运算时需要考虑实部值和虚部值的符号位。输入的两路信号为同频信号,所以最大谱线对应的坐标也相同,即频点相同,只对一路信号进行求幅度谱和最大谱线即可。

CORDIC 算法模块 `cordic_top` 将频点值作为地址,从两个 RAM 中读出频点对应的离散频谱的实部值和虚部值,利用 CORDIC 算法计算得到两路信号在频点处的相位值。

相位差计算模块 `calculate_phase_diff` 考虑到两路信号在频点处的相位值可能为负值,使用一个带符号位的减法器进行相位差计算,将 CORDIC 模块输出的相位值通过减法器进行求差,得到两路信号的相位差。

2) 相位校准电路

根据前面的理论推导,可通过数字下变频^[14]、数字上变频和复数相乘的方法实现相位校准。相位校准原理如图 3 所示。

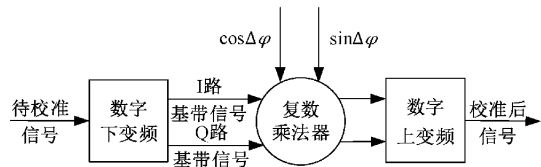


图 3 相位校准原理框图

FPGA 实现相位校准的顶层逻辑电路如图 4 所示。数字下变频模块 DDC 主要包括正交信号产生、乘法和 FIR 低通滤波器^[15]等子模块。首先利用 DDS^[16] IP 核生成两

路正交本振信号并存储到 RAM 中,其中一路为正弦信号,一路为余弦信号,然后将生成的两路本振信号分别与待校准信号相乘,最后利用 MATLAB 软件生成的 COE File 文

件完成 FIR Compiler IP 核的配置,将相乘得到的两路信号通过 FIR 低通滤波器完成下变频,得到 I 路基带信号和 Q 路基带信号。

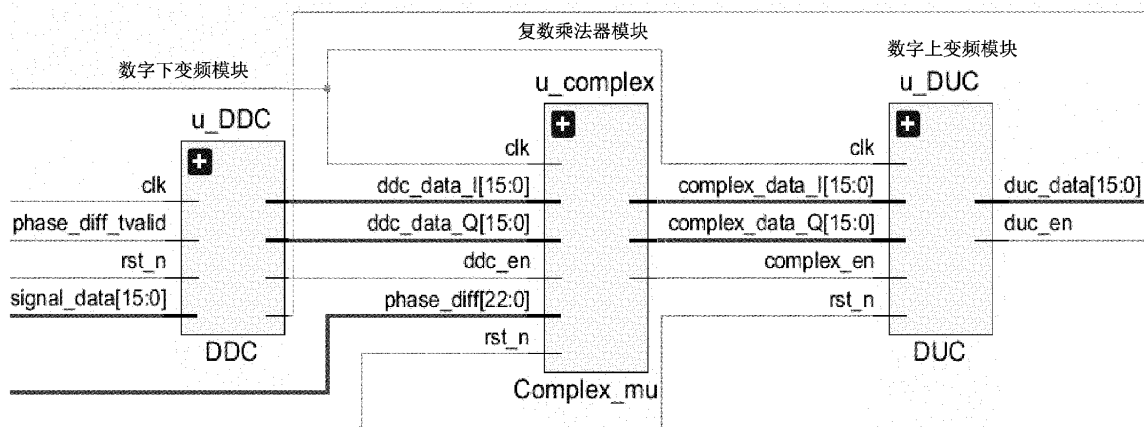


图 4 相位校准顶层逻辑电路

复数乘法器模块 complex 使用开发平台自带的 Complex Multiplier IP 核实现。将 I、Q 两路基带信号分别看作复数信号的实部和虚部, $\cos\Delta\varphi$ 和 $\sin\Delta\varphi$ 分别看作单位相变因子的实部和虚部,其中 $\Delta\varphi$ 表示求得的相位差。利用复数乘法器将实部值和虚部值与单位相变因子的实部值和虚部值相乘,得到相位校准后的 I/Q 信号。

数字上变频模块 DUC 通过 DDS IP 核生成两路与 DDC 模块相同的本振信号,并与相位校准后的 I/Q 信号相乘,其中将相位校准后的 I 路基带信号与余弦本振信号相乘,相位校准后的 Q 路基带信号与正弦本振信号相乘,最后将相乘后的信号相加得到校准后的信号。

3 系统测试及应用

由 Artix-7 系列 FPGA 完成参考信号和待校准信号的发送,两路信号为频率 1 GHz、相位相差 -45° 的正弦信号。两路信号由 MATLAB 软件生成, A/D 采样频率为 10 GHz,位宽为 16。国产亿门级 FPGA 实现相位差测量和校准,利用 VIVADO 软件自带的 ILA 在线逻辑分析仪完成系统测试,搭建的实验平台如图 5 所示。

参考信号和待校准信号波形如图 6, 国产亿门级 FPGA 接收到的参考信号和待校准信号波形如图 7, 其中 signal_in_dout0 为参考信号、signal_in_dout1 为待校准信号。校准后的信号波形如图 8 所示, phase_diff 为 FPGA 测量的校准前相位差 $\Delta\varphi$ 的定点数,转换为角度单位:

$$\Delta\varphi = -824\ 994/2^{20} \approx -0.786\ 775\ 59\ \text{rad} \approx -45.078\ 921^\circ$$

signal_send_dout 为校准后的信号波形。参考信号与校准后信号幅值的最大值和最小值一一对应,参考信号和校准后的信号的相位差为 0。上位机软件显示界面如图 9 所示。

进一步设置两路射频信号的相位差在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 范围

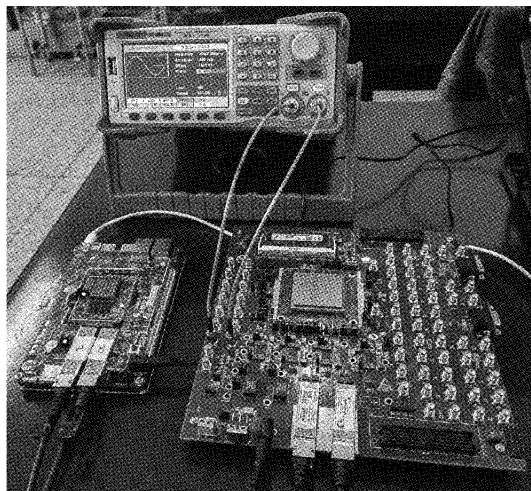


图 5 系统实物图

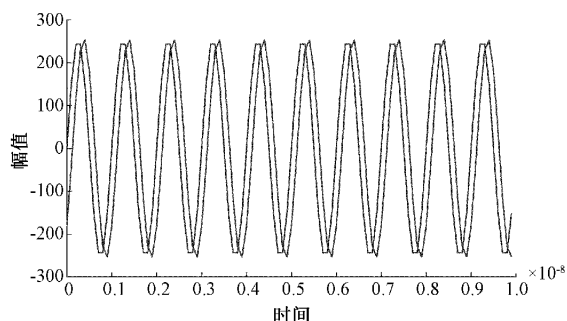


图 6 参考信号和待校准信号波形

内变化,校准后的相位差结果如表 1 所示。经过系统校准后,相位差的相对误差均保持在 0.3% 以内,均方根误差为 0.07° ,相对于 Rajagopalan 等提出的基于坐标旋转数字计算机的实时相位校准算法,校准精度有明显提升。

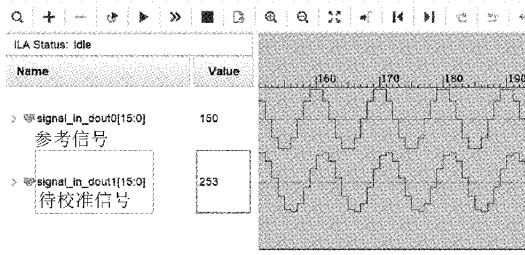


图 7 亿门级 FPGA 接收到的参考信号和待校准信号波形

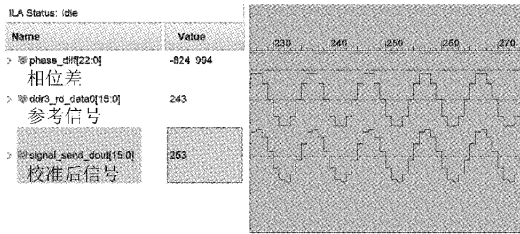


图 8 相位差和校准后的信号波形

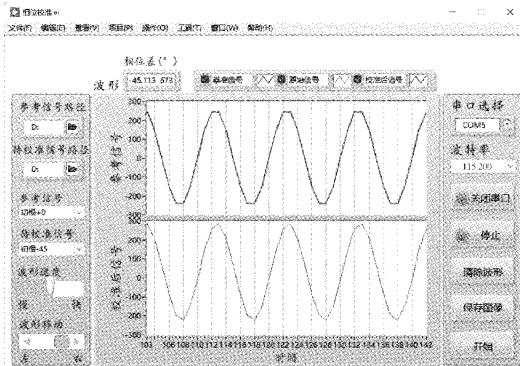


图 9 应用软件显示

表 1 射频信号相位差校准数据

频率/ GHz	设定的 相位差/(°)	校准后的 相位差/(°)	校准 误差/(°)	相对 误差/%
1	-90	-90.120	0.120	0.133
	-60	-60.157	0.157	0.262
	-45	-45.079	0.079	0.175
	-30	-30.035	0.035	0.117
	-20	-20.017	0.017	0.087
	-10	-9.974	0.026	0.260
	10	9.971	0.029	0.290
	20	19.976	0.024	0.119
	30	30.037	0.037	0.123
	45	44.960	0.040	0.089
	60	59.987	0.013	0.022
	90	89.877	0.123	0.137

分析系统存在校准误差的原因,应该是信号的采样和快速傅里叶变换的点数会对 FFT 算法的结果产生一定的

影响,同时 CORDIC 算法会在迭代计算中产生截断误差。

4 结 论

针对因通道材料和环境导致的射频信号相位超前或滞后的问题,提出的 FFT 和 CORDIC 算法相结合的求相位差的方法校准误差小,利用数字正交运算的方法能够以很小的硬件资源消耗实现高精度的相位校准。基于国产亿门级 FPGA 完成系统的设计并进行系统测试,测试结果表明,针对 1 GHz 的射频正弦波信号,系统相对误差小于 0.3%。

由于 FFT 点数对 FPGA 芯片的资源占用、运算速度和测量精度有较大的影响,在实施过程中应合理考虑 FFT 运算的点数,从而达到资源占用、算法性能和测量精度之间的平衡。另外,整个系统使用的 IP 核较多,未来可自行设计 IP 核,从而降低 IP 核对资源的占用。

参考文献

- [1] 沈廷鳌, 黄思宇, 陈鹏, 等. 基于陷波器和相关法的科氏流量计信号处理方法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(14): 140-144.
- [2] 沈廷鳌, 李明, 李华南, 等. 基于相关和 Hilbert 变换的科氏流量计相位差估计方法[J]. 仪器仪表学报, 2017,38(12): 2908-2914.
- [3] KIM D, PARK S. Digital beamforming technique with high resolution digital phase shifter and digital phase calibration using SDR [C]. 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), IEEE, 2017: 1-2.
- [4] JIANG Y, WANG J, GOU W, et al. Phase calibration of signal transmission [C]. 2018 14th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD), IEEE, 2018: 1392-1396.
- [5] RAJAGOPALAN P, DUBEY S, ARORA R, et al. CORDIC based phase calibration algorithm for phase coherent DSP applications[C]. 2020 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks(SPIN), IEEE, 2020: 576-580.
- [6] AMRHAR A, KISOMI A A, ZHANG E, et al. Multi-mode reconfigurable software defined radio architecture for avionic radios [C]. 2017 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference(ICNS), IEEE, 2017: 1-10.
- [7] GARRIDO M, QURESHI F, TAKALA J, et al. Hardware architectures for the fast Fourier transform[J]. Handbook of Signal Processing Systems, 2019: 613-647.
- [8] GARRIDO M, KÄLLSTRÖM P, KUMM M, et al.

- CORDIC II: A new improved CORDIC algorithm[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2015,63(2): 186-190.
- [9] WU C, LIN Y, JIN X, et al. Synchronous in-phase and quadrature demodulation technique for resonant micro-optic gyroscope [J]. Applied Optics, 2019, 58(18): 5050-5056.
- [10] 刘涛,连可,叶笠,等. 正交型频率交替采样与重构方法研究[J]. 电子科技大学学报, 2019,48(6): 858-864.
- [11] AZMAN M F B, HAMID N A B, YAHYA A B. Overview of signal integrity simulation for SFP+ interface serial links with advanced design system(ADS)[C]. 2020 IEEE 10th Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics(ISCAIE), IEEE, 2020: 68-72.
- [12] 宗凯. 基于FPGA的DDR3控制器设计[J]. 电子测量技术, 2017,40(1): 118-122.
- [13] 罗阳锦,张升伟. 基于FPGA的多通道高速数字谱仪的关键算法的设计与实现[J]. 电子学报, 2020, 48(5): 922-929.
- [14] 吴思奇,赵晨,陈泽宗. 船载S波段测波雷达多带宽数字下变频设计[J]. 电子测量技术, 2021,44(10): 17-23.
- [15] 宋卓达,王志乾,李建荣,等. 基于FPGA的FIR数字滤波器设计及实现[J]. 液晶与显示, 2020,35(10): 1073-1078.
- [16] 沈辉,薛兵,唐朝阳,等. 基于DDS技术的信号发生器设计[J]. 电子测量技术, 2020,43(20): 160-164.

作者简介

宋文强,硕士研究生,主要研究方向为仪器仪表技术和信号检测与处理。

E-mail:songwq0105@163.com

徐伟(通信作者),博士,正高级实验师,硕士生导师,主要研究方向为气象观测方法及仪器。

E-mail:xw@nuist.edu.cn