引用格式: 杜俊桥, 夏伟杰, 孙璟, 一种改进的 CORDIC 实时生成加权系数方法[J]. 声学技术, 2023, 42(5): 661-668. [DU Jungiao, XIA Weijie, SUN Jing. An improved CORDIC method for generating weighting coefficients in real-time[J]. Technical Acoustics, 2023, 42(5): 661-668.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2023.05.016

一种改进的CORDIC实时生成加权系数方法

杜俊桥,夏伟杰,孙璟 (南京航空航天大学电子信息工程学院,江苏南京 210016)

摘要:基于现场可编程门阵列实现多波束声呐频域波束形成算法时,通常需要使用坐标旋转数字计算(Coordinate Rotation Digital Computer, CORDIC)方法实时生成加权系数,但波束数较多且为宽带信号时会消耗大量硬件资源。文 章提出一种改进的基于 CORDIC 方法实时生成加权系数的方法。通过频点复用处理,多个波束组可共用同一个 CORDIC IP 核依次实时生成加权系数,降低了 87.5%的 CORDIC IP 核资源消耗;通过引入二维乒乓、用后即抛思 想,对存储加权系数的随机存取存储器(Random Access Memory, RAM)基于波束和频点复用进行乒乓处理,可降低 97.9%的RAM系数存储空间占用。该改进方法通过多维度复用处理,占用少量RAM存储空间来节省大量CORDIC IP核资源,均衡了RAM和CORDIC IP核资源的消耗,具有很好的工程应用价值。 关键词: CORDIC IP 核现场可编程门阵列; 加权系数; 实时; 复用; 硬件资源 中图分类号: TN929.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-3630(2023)-05-0661-08

An improved CORDIC method for generating weighting coefficients in real-time

DU Jungiao, XIA Weijie, SUN Jing

(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

Abstract: For the field programmable gate array (FPGA) based beamforming algorithm of multi-beam sonar in frequency domain, the coordinate rotation digital computer (CORDIC) algorithm is usually required to generate the weighted coefficient in real time, but for large number of beams and broadband signal, a lot of hardware resources would be consumed. An improved real-time weighted coefficient generation method based on CORDIC is proposed in this paper. By frequency point multiplexing, multiple beam banks can share the same CORDIC IP core to generate weighted coefficients in real time, which reduces CORDIC resource consumption by 87.5%. By introducing the idea of two-dimensional ping-pong and throw after use, the ping-pong processing of the weighted coefficient cache RAM based on beam and frequency point multiplexing can reduce the occupancy of RAM storage space by 95.3%. This improved method saves a lot of CORDIC resources by occupying a small amount of RAM storage space and balances the consumption of RAM and CORDIC resources, and has good engineering application value.

Key words: field programmable gate array (FPGA); weighting coefficients; real time; multiplexing; hardware resources

引言 0

在水下的科学研究以及军事等活动中,通常需 要准确地获取所关注区域内的水底地形地貌信息, 基于声波在水中独有的传播特性设计的成像声呐、 多波束测深声呐等各种声呐被广泛应用于水下探测 活动[1-6]。

声呐通过形成多波束来获取信息,在工程实现 中波束形成的核心是实时生成加权系数。目前业内 使用坐标旋转数字计算(Coordinate Rotation Digital

收稿日期: 2022-03-22; 修回日期: 2022-09-17

Computer, CORDIC)方法来实时生成波束形成的加 权系数,但当波束数较多且为宽带信号波束形成 时,采用传统方法实时生成加权系数会消耗大量的 随机存取存储器(Random Access Memory, RAM)和 CORDIC IP核(简称: CORDIC)资源[7]。

现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA) 在 实 现 频 域 波 束 形 成 过 程 中, CORDIC实时生成的加权系数与原始数据对应相乘 累加即可完成波束形成,当前主要有两种方法来保 证系数与原始数据高度同步。一种是纯RAM缓存 方法,使用少量的CORDIC先依次实时生成加权系 数,然后将全部的加权系数缓存到RAM中¹⁸,通过 控制读取RAM中的系数与原始数据完成相乘累加 操作。这种方法虽然耗用CORDIC资源较少,但会 占用大量的 RAM 存储器资源。刘雪等¹⁹提出纯

作者简介: 杜俊桥(1997一), 男, 陕西汉中人, 硕士研究生, 研究方向 为信号与信息处理。

通信作者: 夏伟杰, E-mail: nuaaxwj@nuaa.edu.cn

CORDIC实时生成方法,通过使用大量CORDIC资源来保证同一波束下的加权系数实时生成速率与原始数据传输速率相同,直接将CORDIC输出的加权系数送入乘法器与对应的原始数据完成相乘操作。这种方法的优点是不需要缓存系数,不会占用RAM资源,但是会消耗大量的CORDIC资源。

本文围绕宽带多波束声呐的波束形成加权系数 实时生成展开研究^[10],致力于解决硬件资源消耗过 多的问题。本文提出了多维度复用实时系数生成方 法,通过频点复用、波束复用、RAM乒乓操作等 一系列处理,最终通过占用少量RAM存储器空间, 显著减少了CORDIC资源消耗。虽然一定程度增加 了逻辑实现复杂度,但均衡了CORDIC和RAM的 资源消耗,节省了硬件资源。

1 直线阵列波束形成加权系数推导

频域波束形成时^[11-13],波束角θ方向,频点ω 下的频域波束输出表达式为

$$B(\omega) = A_k S_k \exp(j\varphi_{\omega k}) \tag{1}$$

式中: A_k 是接收阵元幅度加权系数,可由仿真工具 直接生成, S_k 是第k个阵元接收原始信号经过脉冲 压缩后在频域的复信号, $\exp(j\varphi_{ok})$ 是第k个阵元原 始信号的补偿系数,即波束形成加权系数,其中 $\varphi_{ok}为第k$ 个阵元在频点 ω 下的补偿相位值。

直线阵列回波接收示意图如图1所示。设均匀 等间隔直线阵列有*M*个阵元,相邻阵元间距为*d*, 回波信号源为*S*,回波到达方向为*θ*_k。



Fig.1 Schematic diagram of echo receiving by a linear array

选定阵元0为参考阵元,设阵元0与信号源的 距离为 r_k ,阵元 $m(0 \le m \le M-1)$ 与信号源的距离为 R_k 。根据余弦定理,可得阵元m与参考阵元的回波 声程差 ΔR 。声波波长为 λ ,由声波性质,可得两阵 元接收回波的相位差为

$$\varphi_{\omega k} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot r_k \left(\sqrt{1 + \frac{m^2 d^2}{r_k^2} + \frac{2md\sin\theta_k}{r_k}} - 1 \right) \quad (2)$$

为方便后续FPGA处理实现,根据泰勒定理展 开式,将非线性关系转换为线性关系并舍弃高阶无 穷小量,结合声波的波速*c*,波长λ与频率*f*三者关 系,可得线性变换后的补偿相位差表达式为

$$\varphi_{\omega k} = \left(\frac{2\pi m d \sin \theta_k}{c} + \frac{\pi m^2 d^2 \cos^2 \theta_k}{c r_k}\right) \cdot f \tag{3}$$

根据补偿相位差 $\varphi_{\omega k}$, CORDIC 可实时生成加 权系数实部 cos $\varphi_{\omega k}$ 和虚部 sin $\varphi_{\omega k}$ 。补偿相位差与阵 元间距、声速、阵元通道、波束角、距离、频率有 关。其中,阵元间距为固定值,声速预先可调,距 离随接收回波信号先后次序变化,且在同一距离下 做分割后短序列的 FFT 变换,则在设定声速和距离 下,补偿相位差由波束角、阵元通道、频率三个变 量确定。通过控制输入CORDIC 的补偿相位差,即 可实时生成对应的加权系数。

2 多维度复用实时系数生成方法

2.1 频点复用波束形成

设计声呐参数为波束数为512, 阵元通道数为 96, FFT 点数为64。由波束形成理论可知,不同波 束输出结果仅与各自波束的加权系数有关,同一时 刻的512个波束的波束形成都使用同一个64×96的 二维原始数据,综合考虑数据速率和时钟速率,波 束形成模块的时钟速率提高为原始数据的6倍,每 6个波束组成一个波束组,512波束分为86个波 束组。

每个波束用于波束形成的64×96二维原始数据 需要对应大小的二维加权系数与之相乘完成波束形成,则单个波束每一时刻需要实时生成64×96的加 权系数,其中,96为通道数,64为做FFT变换的 频点数。全部波束均需要实时生成对应的加权系 数,考虑实部信号和虚部信号,则512波束总共需 要实时生成6,291,456个加权系数,数据量巨 大,会导致大量FPGA资源被占用。

频域波束形成基于频点变化,逐频点进行加权 系数相乘补偿,进一步多通道累加完成波束形成。 为了缓解硬件资源占用压力,考虑将整个频带划分 为多个子频带,每相邻的若干个频点组成1个子频 带^[14]。用子频带的中心频点作为该频带的频率值, 基于该频率值实时生成加权系数,该加权系数可作 为该子频带内所有频点的公用系数,用于该子频带 内所有频点下的原始数据完成波束形成。如此处 理,则FPGA只需要实时生成各个子频带中心频点 下的加权系数便可供整个宽带的原始数据完成波束 形成,极大地减小了FPGA的资源占用。 利用 Matlab 进行逐频点波束形成和频点复用波 束形成仿真。通过设计多个点目标,使其在方位向 既分布于中央波束又分布于边缘波束,在距离向既 分布于近距离又分布于远距离,对比逐频点波束形 成和频点复用的波束形成结果,分析频点复用处理 对波束性能的影响,进一步确定组成一个子频带的 频点数。

频域变换时的FFT 点数为64,考虑将整个64 频点划分成若干个均匀的子频带。对比16频点复 用、8频点复用、4频点复用以及逐频点4种情况下 的波束形成结果,根据波束形成结果的图像显示效 果,波束性能分析以及硬件资源消耗等综合因素来 确定合适的子频带宽度。4种情况的波束形成结果 图像显示如图2所示。







将3种复用处理的波束形成结果与逐频点的波 束形成图像对比,发现频点复用处理不会影响中央 波束,但会对边缘波束造成影响。16频点复用处理 后边缘波束的距离向出现了明显的旁瓣,导致成像 效果较差,说明16频点复用处理明显降低了边缘 波束质量。8频点复用和4频点复用虽然也在边缘 波束的距离向出现了较强旁瓣,但并没有对成像效 果造成较大影响;同时,4频点复用处理的成像效 果虽然优于8频点复用处理,但考虑到硬件资源有 限,4频点复用处理相较于8频点复用处理需要消 耗更多的FPGA资源。综合考虑节省资源与图像显 示效果,最后确定选用8频点复用处理,即每8个 频点组成一个子频带。

通过对波束在方位向和距离向的性能进行定量 分析^[15],进一步分析8频点复用处理对波束结果的 影响。图3为点目标逐频点与8频点复用在方位向 的波束能量分布图。由图3可以看出,在中央波束 附近,频点复用对波束的方位向波束能量没有影



响;在边缘波束附近,波束的主瓣没有影响,波束 的旁瓣在频点复用处理后比逐频点波束形成时大, 但低于主瓣能量 30 dB,不会影响波束的方位向 性能。

图4为点目标逐频点与8频点复用在距离向的 波束能量分布图。由图4可以看出,在中央波束附 近,频点复用对波束的距离向波束能量没有影响; 在边缘波束附近,频点复用处理导致出现较强旁 瓣,但最强的旁瓣能量低于主瓣能量约20dB,不 会对主瓣造成较大影响。



综合分析8频点复用对波束性能的影响,虽然 8频点复用处理一定程度上降低了波束性能,尤其 是在边缘波束的距离向,但是整体在可接受范围 内,对波束结果的整体影响较小,对节省FPGA硬 件资源效果显著,确定采用8频点复用处理。

2.2 基于频点复用的多组波束复用 CORDIC

多频点复用系数处理后,CORDIC每生成一个 频带内的加权系数可供8个频点下的原始数据使 用,则CORDIC可利用其余7个频点的原始数据共 用频带加权系数的时间生成其他7个波束该频带内 的加权系数^[16-18]。如此,一个CORDIC可在保证系 数与原始数据同步的前提下生成加权系数与8个波 束组的原始数据实时完成波束形成,则一个 CORDIC可串行生成48个波束的加权系数,消耗 11个CORDIC可并行生成所有波束加权系数。

单个 CORDIC 生成 48 个波束的加权系数时, 48 个波束的系数串行依次生成,但原始数据是通过 8 个 RAM 并行缓存。为了保证系数 RAM 输出与原 始数据RAM输出对应相乘,使用16个系数RAM 来缓存生成的8组实部系数和8组虚部系数,通过 控制CORDIC内48个波束的系数生成顺序来保证 系数和原始数据对应。按照波束、频点、通道优先 级依次降低的顺序,在一个CORDIC内按照串行顺 序生成加权系数。

单个CORDIC生成48波束加权系数示意图如 图5所示。首先生成第1号波束的第1个频带系数, 写入第一个系数RAM,接着顺序生成第7、13、 19、25、31、37、43号波束的第一个频点,通过控 制系数RAM的写使能,依次分别写入第2至第8个 系数RAM,直至43号波束的第一个频带系数生成 后,8个波束组的每组波束内的首号波束的第一个 频点系数全部生成。8个系数RAM均写入第一个 频带下的96通道加权系数。同一时间,8个原始数 据RAM完成各自首号波束第1~8频带的原始数据 缓存。



图5 单个CORDIC生成48波束加权系数

Fig.5 A single CORDIC generates a 48-beamweighted coefficients

8个波束组的每组波束内的首号波束的第一个 频点系数全部生成后,接着生成每组波束内的首号 波束的第2至第8频带系数,并分别写入8个系数 RAM。至此,8组波束的每组波束的首号波束所有 频点系数全部生成结束。按照首号波束加权系数的 生成顺序,依次生成每个波束组内部的第2、3,4, 5,6号波束的系数。直到每个波束组内的第6号波 束的第8个频带系数生成结束,则一个CORDIC内 的48个波束的所有系数生成结束。11个CORDIC 并行工作生成512个波束的所有加权系数。

2.3 CORDIC实时生成方法

将补偿相位送入CORDIC即可实时生成加权系数,需要首先实时生成补偿相位。

根据式(3),结合公式中常数与变量分析,令 $\alpha = 2\pi d \sin \theta_k, \beta = \pi d^2 \cos^2 \theta_k$,其中, $\alpha \pi \beta$ 仅与波束 角 θ_k 的变化有关,而波束角为512个确定值,因此 可分别预存 $\alpha \pi \beta$ 的512个确定值,只需控制读取预 存值,可不用CORDIC实时生成,减小了CORDIC 资源占用,且易于实现。

距离*r*_k随采样点数序号的变化而变化,通过设置随采样时刻变化规律生成距离参数。通过计数器循环产生0到95的*m*计数器,再平方即可循环生成*m*²。频率*f*为8个频带的各自中心频率值,可提前预存为8个固定的参数,通过控制频率生成模块的读地址调用预存的参数。

在一定声速范围内设置若干个声速档位,可提 前预存多个固定的参数,根据下发的声速指令控制 读地址匹配对应的声速参数,实现声速调节。

图6为CORDIC实时生成方法的实现过程,将 各部分参数对应生成后,通过简单的加法器和乘法 器即可实时生成最终的加权系数。由于距离参数随 实际原始数据采样位置实时变化,所以该加权系数 具有近场聚焦功能;由于声速可根据实际水声环境 选择读取调用,所以该加权系数具有声速可调功 能,使得声呐可适用于多种水声环境。



图6 CORDIC实时生成方法 Fig.6 CORDIC real-time generation method

2.4 二维乒乓、用之即抛系数 RAM 缓存

图7为系数RAM写入和读取的过程示意图。 首先写入首号波束第1个频带的96个系数到第一个 系数RAM的存储位置1~96,经过96×8个时钟,即 768个时钟,一个CORDIC负责实时生成的8个波 束组的首号波束的第一个频带系数分别缓存写入到 8个系数RAM。此时CORDIC开始实时生成第一个 系数RAM内的首号波束第2个频带系数,写入至 第一个系数RAM的存储位置97~192,与此同时, 开始读取第一个系数RAM的存储位置1~96缓存的 第一个频带的系数,重复读取8次,与一个频带内 的8个频点原始数据完成波束形成,共经过768个 时钟,1~96缓存的第一个频带的系数使用完成, 后续波束形成不会再使用该系数,此时CORDIC开 始实时生成第一个系数RAM内的首号波束第3个 频带系数,直接将首号波束第3个频带系数写入第 一个系数RAM的存储位置1~96,更新存储位置1~ 96的系数,并且同时开始读取存储位置97~192的 系数8次。依此类推,使用存储深度192的乒乓 RAM反复读取和写入系数,每一个系数RAM完成 6个波束加权系数的缓存,使用86个系数RAM并 行完成所有波束的加权系数缓存。



图7 系数RAM写入和读取 Fig.7 Coefficient RAM write and read

由于每一个系数RAM写入一个频带下96通道 的系数后,直至生成下一个频带内的系数才会重新 写入。通过控制系数RAM的读取,重复读取8次 系数RAM写入的一个频带内96通道的系数,与原 始数据RAM读出的该频带下的8个频点的原始数 据完成波束形成。在该系数RAM需要写入新的系 数时,恰好原来系数RAM内写入的该频带内的96 个系数已经被读取出来并与该波束该频带原始数据 完成波束形成,后续不再用到这96个系数值。

引入二维乒乓,用之即抛的思想^[13],在波束和 频带两个变量之间做乒乓操作。本文设计存储深度 为192的乒乓RAM,1次写入、8次读取,只需占 用极少的RAM存储空间便可以缓存所有的系数。

3 FPGA资源占用对比分析

3.1 纯CORDIC 或纯 RAM 实时生成方法资源消耗 设计声呐参数为波束数为 512, 阵元通道数为

96, FFT点数为64, 波束数为512个,分为86个波 束组。纯CORDIC生成方法对应需要消耗86个 CORDIC IP核实时生成加权系数,每一个CORDIC 依次串行生成每个波数组内6个波束的加权系数, 86个CORDIC并行生成所有波束的加权系数;纯 RAM缓存方法需要消耗86个系数RAM,每一个系 数RAM用于缓存6个波束的加权系数,考虑每8个 频点复用一个频带系数,单个系数RAM需要缓存 6×8×96个系数,即4608个系数,每个系数占用1 Byte存储空间,考虑RAM乒乓操作,则单个系数 RAM占用9216存储空间,每个系数使用1Byte存 储空间,则所有波束的实部和虚部加权系数总共占 用存储空间为1548kB。

3.2 多维度复用实时生成方法资源消耗

如图8所示为加权系数直接缓存与二维乒乓缓 存两种系数缓存方法的RAM存储空间占用的对比。 采用二维乒乓RAM,每个系数RAM存储深度192, 则总共消耗的86个系数RAM占用存储空间为192× 2×86×1 Byte=32.25 kB。





多频点复用处理,为多组波束复用CORDIC创造了必要条件,一个CORDIC可以顺序生成8个波束组的加权系数,即一个CORDIC可以负责生成48个波束的加权系数,通过对波束角、阵元通道、频点的控制,实时生成对应的相位补偿角,将相位补偿角输入至CORDIC,即可在单个CORDIC内串行生成48个波束的所有加权系数。总共有512个波束,则总共消耗11个CORDIC。在单个CORDIC内部串行生成其负责的48个波束的加权系数。11个CORDIC并行生成所有波束的加权系数。

3.3 资源消耗对比

表1为三种方法的资源消耗。本文提出的改进的实时生成方法,相较于纯CORDIC或纯RAM实

时生成加权系数方法,大幅度降低了逻辑资源占用 和存储空间占用。通过多维度复用方法,在逻辑资 源占用方面,减少了87.5%的CORDIC资源占用。 通过二维乒乓、用之即抛的系数缓存方法,减少了 97.9%的系数RAM存储空间占用。

本系统采用 Xilinx 的 kintex-7 系列开发板,型 号为 xc7k410t-2ffg900,该开发板可提供的存储器 空间为3 578 kB,Slice LUTs数量为254 200。加权 系数实时生成模块仅是整个声呐系统的一个模块, 但会消耗整个声呐系统的大量资源。多维度复用方 法节省了大量硬件资源的占用,均衡了加权系数生 成模块在整个器件各类资源在的利用率,有利于整 个系统的资源合理分配。

表1 三种方法资源消耗 Table 1 Resource usages of three methods

		-		
方法	CORDIC 消耗数	RAM 系数 存储空间 占用/kB	加权系数 模块的逻 辑资源占 用率/%	加权系数 模块的 RAM资源 占用率/%
纯RAM	1	1 548	0.6	44
纯CORDIC	88	0	52.5	0
多维度复用	11	32.25	6.25	1

4 测试与验证

仿真测试验证了多频点复用处理的可行性,由 多频点复用出发,采用多维度复用方法实时生成波 束形成加权系数,还需要在水中进行实际测试验证 该方法实时生成的加权系数的波束形成结果。在湖 中设置目标,用声呐进行实际照射实验,成像显示 波束结果可验证该方法在实际工程中的具体使用 效果。

如图9所示为一边沿不规则人造湖实景,南北 长度约为70m,东西长度约为200m,水深约3m, 湖边有人工修筑的水泥堤坝,用声呐对湖边堤坝进 行照射实验,主要测试远场环境下的波束形成结



图 9 堤坝实景图 Fig.9 The photo of the dam

果。图10所示为堤坝声呐成像结果。由图10可以 看出,声呐成像与实际堤坝的形状一致。



图10 堤坝声呐成像结果 Fig.10 The sonar imaging results of the dam

如图11为一直径约为30 cm的圆环。在声呐前 方3 m左右的水中放入该圆环,主要测试近场环境 下的波束形成结果。图12为近场环境下的圆环声 呐成像图,可以清楚地识别出近距离的圆环目标 物。由图12成像结果可知,通过多维度复用处理 实时生成波束形成加权系数,该方法形成的多波束 具有良好的波束性能,能够满足实际工程的需要。



图 11 圆环照片 Fig.11 Photo of the ring



图 12 圆环声呐成像结果 Fig. 12 The sonar imaging results of the ring

5 结论

本文基于CORDIC方法实时生成波束形成加权 系数展开研究,针对工程实践中当波束数较多,信 号为宽带信号时硬件资源消耗过多的问题,提出了 多维度复用的解决方案。充分发挥了FPGA实时高 速并行运算的优势,本文提出的方法改进既保证了 波束形成后的波束性能,又极大地降低了FPGA中 RAM存储器和CORDIC的资源消耗。同时,该改 进方法采用波束形成系数实时生成的方法,使声呐 具有近场聚焦和声速可调功能,具有很好的工程应 用价值。

参考文献

- 孙玉臣, 王德石, 李宗吉, 等. 蛙人探测声呐系统发展综述[J]. 水下无人系统学报, 2021, 29(5): 509-523.
 SUN Yuchen, WANG Deshi, LI Zongji, et al. Review on the development of frogman detection sonar system[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2021, 29(5): 509-523.
- [2] 张伟民. 多波束成像声呐仿真及成像分析研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019.
 ZHANG Weimin. Simulation and imaging analysis of multibeam imaging sonar[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2019.
- [3] 刘妹琴, 韩学艳, 张森林, 等. 基于水下传感器网络的目标跟踪 技术研究现状与展望[J]. 自动化学报, 2021, 47(2): 235-251.
 LIU Meiqin, HAN Xueyan, ZHANG Senlin, et al. Research status and prospect of target tracking technologies via underwater sensor networks[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47 (2): 235-251.
- [4] HUANG J E, ZHOU T A, DU W D, et al. Smart Ocean: a new fast deconvolved beamforming algorithm for multibeam sonar[J]. Sensors, 2018, 18(11): 4013.
- [5] 梅继丹,石文佩,马超,等. 近场反卷积聚焦波束形成声图测量
 [J]. 声学学报, 2020, 45(1): 15-28.
 MEI Jidan, SHI Wenpei, MA Chao, et al. Acoustic measurement of near-field deconvolution accumulation Jiao Bo beam formation[J]. Acta Acustica, 2020, 45(1): 15-28.
- [6] 郁红波, 鞠建波, 魏帅, 等. 浅海海底地形对吊放声呐探测距离的影响[J]. 声学技术, 2021, 40(1): 49-56.
 YU Hongbo, JU Jianbo, WEI Shuai, et al. Effects of shallow seabed topography on the detection range of hanging sonar[J]. Technical Acoustics, 2021, 40(1): 49-56.
- [7] 熊正大,张宏伟.基于CORDIC算法的干涉仪测向的FPGA实现方法[J].电子技术与软件工程,2020(3):113-115.
 XIONG Zhengda, ZHANG Hongwei. FPGA implementation method of interferometer direction finding based on CORDIC algorithm[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2020(3):113-115.
- [8] ZHAO D X, HE P Y. CORDIC-based multi-gb/s digital outphasing modulator for highly efficient millimeter-wave transmitters[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2018, 2018: 1-6.
- [9] 刘雪,夏伟杰,凡志邈.基于 CORDIC 的成像声呐加权系数实时生成方法研究[J]. 声学技术, 2020, 39(6): 774-778. LIU Xue, XIA Weijie, FAN Zhimiao. Research on CORDIC based real-time generation method of weight coefficients for imaging sonar[J]. Technical Acoustics, 2020, 39(6): 774-778.
- [10] 周成伟,郑航,顾宇杰,等. 互质阵列信号处理研究进展:波达方 向估计与自适应波束成形[J]. 雷达学报, 2019, 8(5): 558-577. ZHOU Chengwei, ZHENG Hang, GU Yujie, et al. Research progress on coprime array signal processing: direction-ofArrival estimation and adaptive beamforming[J]. Journal of Radars, 2019, 8(5): 558-577.
- [11] GUAN C Y, ZHOU Z M, ZENG X W. Optimal waveform de-

sign using frequency-modulated pulse trains for active sonar [J]. Sensors, 2019, **19**(19): 4262.

[12] 杜召平,陈刚,王达.国外声呐技术发展综述[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(1): 145-151.
 DU Zhaoping, CHEN Gang, WANG Da. Foreign sonar tech-

nology development research summary[J]. Ship Science and Technology, 2019, **41**(1): 145-151.

- [13] 高嵩, 胥剑涛. 基于 FPGA 的相控阵天线波束控制算法优化研究[J]. 电子技术应用, 2021, 47(9): 82-85, 95.
 GAO Song, XU Jiantao. Optimization of phased array antenna beam control algorithm based on FPGA[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(9): 82-85, 95.
- [14] 李根根. 宽带多波束成像声纳算法研究与 FPGA 实现[D]. 南 京:南京航空航天大学, 2019.
- [15] XIA W J, JIN X E, DOU F W. Thinned array design with minimum number of transducers for multibeam imaging sonar [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2017, 42(4):

892-900.

- [16] 李欣桐,张为.基于 CORDIC 的低功耗复合计算架构[J].南京 大学学报(自然科学), 2021, 57(3): 466-472.
 LI Xintong, ZHANG Wei. CORDIC-based low-power composite computing architecture[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2021, 57(3): 466-472.
- [17] 邹家轩, 揭灿, 王栋, 等. 双向预判免缩放因子 CORDIC 算法
 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(2): 47-52.
 ZOU Jiaxuan, JIE Can, WANG Dong, et al. Bi-directional prediction scaling-free CORDIC algorithm[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(2): 47-52.
- [18] 仲雅莉, 吴俊辉, 刘炫, 等. 一种基于 CORDIC 算法的高精度反 正切求解[J]. 电子技术应用, 2022, 48(1): 12-17. ZHONG Yali, WU Junhui, LIU Xuan, et al. A high precision arctangent solution based on CORDIC algorithm[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(1): 12-17.