

有向阵元圆形阵列声纳波束形成原理及实现

颜 海¹, 庄圣贤¹, 李 杰², 庄晓明¹

(1. 西南交通大学电气工程学院, 成都 610031; 2. 北京理工大学宇航科学技术学院, 北京 100081)

摘要: 有向阵元阵列接收具有区域指定性好和灵敏度高的优点而被广泛应用于雷达、水声信号目标探测。探讨了基于有向阵元圆阵的波束形成原理并设计出基于 FPGA 的自适应数字波束形成 (ADBF) 模块, 仿真结果表明有向阵元形成的波束图较全向阵波束图有明显改善, LMS 自适应算法对干扰能有效抑制, 从而提高了系统输出信号干扰噪声比(SINR)。

关键词: 圆阵列; 辐射方向图; 阵列波束图; 最小均方算法; FPGA

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2009)-01-0073-05

Beam-forming principle and implementation of circular array composed of directional elements

YAN Hai¹, ZHUANG Sheng-xian¹, LI jie¹, ZHUANG Xiao-ming¹

(1. Southwest Jiaotong University, College of Electrical Engineering, Chengdu 610031, China;

2. Beijing Institute of Technology, Aerospace Science and Technology Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: Due to its better regional direction and high sensitivity, the array composed of directional elements is widely used in radar and underwater sonar target detection. The beam-forming principle of the circular array composed of directional elements is studied. The design and its FPGA implementation of the adaptive beamforming are discussed in detail. Simulation results show that the beam pattern of the circular array composed of directional elements is improved in comparison with the traditional one. And the interference is effectively repressed by using the LMS adaptive algorithm. Thus, the signal-to-noise ratio of the system can be increased.

Key word: circular array; radiation pattern; array beamforming map; least mean square; FPGA

1 引言

阵列信号接收器有单一信号接收器不可比拟的优越性能, 阵列形式也是多种多样的, 目前对线阵和全向阵的分析处理最多, 而如导弹头的雷达或鱼雷的水听器 etc 地方常用到阵元有向的圆阵列, 另外圆阵能对 360° 空间任意形成波束, 比线阵 180° 探测范围更广, 因此对有向阵元圆阵的分析和设计十分必要。本文根据圆阵特点建立阵列方向函数, 即阵因子, 同时根据水声能量辐射特点, 分析对比选取了较优的阵元辐射函数作为阵元方向函数, 通过辐射方向图相乘法^[1]得到有向阵列方向函数 $G(\theta, \phi) = F(\theta, \phi)f(\theta, \phi)$ 。

随着阵列信号处理技术的发展, 波束形成的自适应算法被广泛运用和研究^[2,3], 其中有直接采样协方差阵求逆(SMI)算法、递推最小平方(RLS)算法、

神经网络(NN)算法、正交化解(G-S)算法、最小均方 (Least Mean Square, LMS) 算法, 根据算法易于工程实现等特点, 本文采用最小均方 (Least Mean Square, LMS) 算法。

目前, 波束形成算法通过 DSP 芯片编程实现的方案很多^[3,4], 随着现代系统对实时性能要求的提高和高速 FPGA 芯片的出现, FPGA 芯片编程实现数字信号处理得到广泛运用^[5-7], FPGA 数字芯片具有功耗低、体积小、集成度高、速度快、开发周期短、费用低、用户可定义功能及可重复编程和擦写等许多优点, 应用领域不断扩大, 越来越多的电子系统开始采用可编程逻辑器件来实现数字信号处理, 本文采用新一代可编程逻辑器件 Stratix 系列芯片, 其性能完全满足高速数字信号系统的设计要求。

2 全向阵元圆阵和有向阵元圆阵波束指向函数的建立

当声纳水听器阵列接收系统阵元空间布好之后, 那么根据阵列的空间结构都可以建立与之相关

收稿日期: 2008-02-25; 修回日期: 2008-05-16

基金项目: 十一国防预研基金(51305050203)

作者简介: 颜海(1980-), 男, 四川人, 硕士研究生, 研究方向为 DSP 数字信号处理技术及应用, EDA 技术。

通讯作者: 颜海, E-mail: yhcoulours@21cn.com

的波束指向函数, 如设信号的入射方向为 (θ, φ) , (θ, φ) 如果保持信号的强度不变, 那么这个系统的输出 $D(\theta, \varphi)$ 就是反映了它对不同方向信号的灵敏度, $D(\theta, \varphi)$ 就是称该基阵系统的指向性函数, 如果 $D(\theta, \varphi)/D(\theta_0, \varphi_0)$ 在 $\theta=\theta_0$ 、 $\varphi=\varphi_0$ 取得极大值, 则称 $D(\theta, \varphi)/D(\theta_0, \varphi_0)$ 为归一化指向性函数^[8]。

2.1 圆阵指向性函数

建立指向性函数的过程实质上就是选取适当的参考点求取每个阵元相对参考点的相位差^[8], 如图 1 所示。

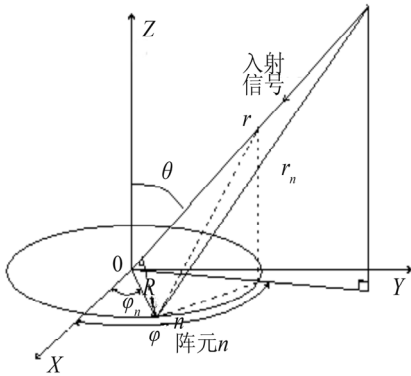


图 1 圆阵列信号接收的几何模型

Fig.1 Geometrical model of a circular receiving array

根据图 1 选取圆心为参考点, 由几何关系可得, 每个阵元相对于参考点的声程差为:

$$\Delta d_n = R \times \cos \alpha = R \times \sin \theta \times \cos(\varphi - \varphi_n)$$

由此可得第 N 个阵元相对于参考点的相位差:

$$\xi_n = \omega_0 \times \frac{\Delta d_n}{v_0} = 2\pi \frac{R}{\lambda_0} \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_n)$$

则阵列的扫描矢量为: $\alpha = [e^{-j\xi_1}, e^{-j\xi_2}, \dots, e^{-j\xi_N}]$, 复权矢量为: $w = [W_1 e^{j\beta_1}, W_2 e^{j\beta_2}, \dots, W_N e^{j\beta_N}]$, 所以波束指向函数为: $F(\theta, \varphi) = w^T \alpha(\theta, \varphi)$, 取二维平面, 令 $\theta = 90^\circ$, 当 $w = [1, 1, \dots, 1]$ 时, 波束图如图 2 所示。

此时波束在 0° 方向形成, 若要实现 0° 到 360° 任意角度 (θ_0, φ_0) 的波束, 则权矢量为:

$$w = [e^{j\xi_{10}}, e^{j\xi_{20}}, \dots, e^{j\xi_{N0}}]$$

其中:

$$\xi_{n0} = \omega_0 \times \frac{\Delta d_n}{v_0} = 2\pi \frac{R}{\lambda_0} \sin \theta_0 \cos(\varphi_0 - \varphi_n)$$

则圆阵任意波束指向函数为:

$$F(\theta, \varphi) = \alpha(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N e^{j2\pi \frac{R}{\lambda_0} [\cos(\varphi_0 - \varphi_n) \sin(\theta_0) - \cos(\varphi - \varphi_n) \sin(\theta)]}$$

在平面形成任意波束图如图 3 所示 $(\theta_0 = 90^\circ, \varphi_0 = 45^\circ)$

2.2 基于有向阵元的圆形阵列指向性函数

2.2.1 阵元辐射指向函数的选取

通过上面的仿真分析看到全向阵元圆阵的旁

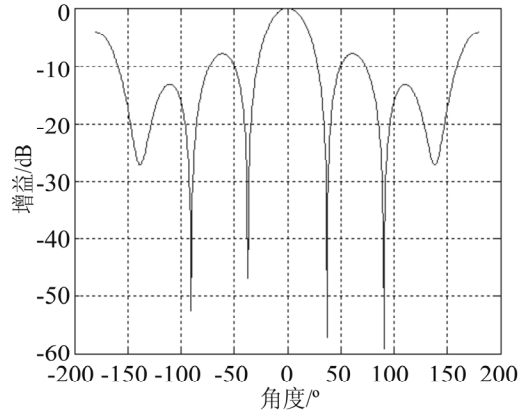


图 2 $\theta=90^\circ$ 和 $\varphi=0^\circ$ 的波束图 $(N=8, r=0.6\lambda)$

Fig.2 Beam pattern for $\theta=90^\circ$ and $\varphi=0^\circ$ ($N=8$ and $r=0.6\lambda$)

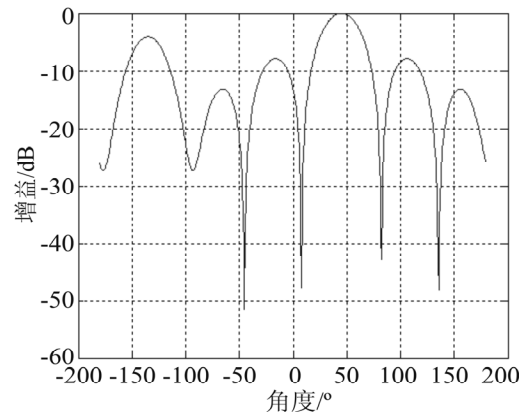


图 3 $\theta=90^\circ$ 和 $\varphi=45^\circ$ 的波束图 $(N=8, r=0.6\lambda)$

Fig.3 Beam pattern for $\theta=90^\circ$ and $\varphi=45^\circ$ ($N=8$ and $r=0.6\lambda$)

瓣较高, 它的主瓣比第一旁瓣高出 8dB, 为了得到更高的主瓣相对增益, 将每个阵元按具体要求设定方向, 设每个阵元的方向图函数为 $f(\theta, \varphi)$, 阵列方向图函数 $F(\theta, \varphi)$ 称为阵因子, 则由辐射方向图相乘法^[1]可得有向阵元阵列指向性函数为:

$$G(\theta, \varphi) = F(\theta, \varphi) f(\theta, \varphi)$$

由于圆阵每个阵元的声轴不相互平行而是相交于一点, 如图 4 所示, 故阵元有向圆阵指向性函数为:

$$G(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N e^{j2\pi \frac{R}{\lambda_0} [\cos(\varphi_0 - \varphi_n) \sin(\theta_0) - \cos(\varphi - \varphi_n) \sin(\theta)]} f_n(\theta, \varphi)$$

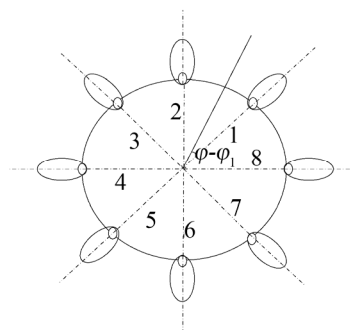


图 4 圆阵阵元发射方向图

Fig.4 Transmitting pattern of circular array's elements

声纳水听器阵元接收声波的强度与阵元结构及波达方向和阵元中心轴的夹角有关, 辐射方向函数中不可避免地引入三角函数, 由于阵元中心轴方向接收的声波强度最强, 随着波达方向与中心轴夹角的增大, 阵元接收的能量递减。下面说明均匀圆阵阵元辐射方向函数的选取。

每个阵元接收 -90° 到 $+90^\circ$ 范围的能量, 沿阵元的中心轴方向能量最强, 然后向左右两边递减, 根据这一特点, 选取阵元辐射函数为: $f_n(\theta, \varphi)=1$, $f_n(\theta, \varphi)=\cos(\varphi-\varphi_n)$, $f_n(\theta, \varphi)=(1+\cos(\varphi-\varphi_n))/2$ 。它们的指向性如图 5 所示, $f_n(\theta, \varphi)=1$ 是对应 0dB 的一条直线, 对阵列特性无影响, $f_n(\theta, \varphi)=\cos(\varphi-\varphi_n)$ 辐射特性曲线变化幅度比 $f_n(\theta, \varphi)=(1+\cos(\varphi-\varphi_n))/2$ 大, 它对阵列的影响更大。

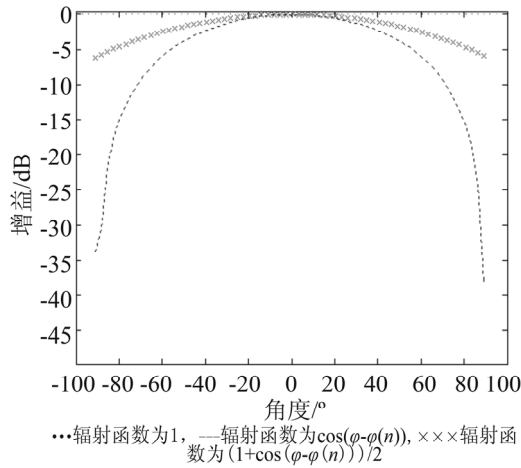
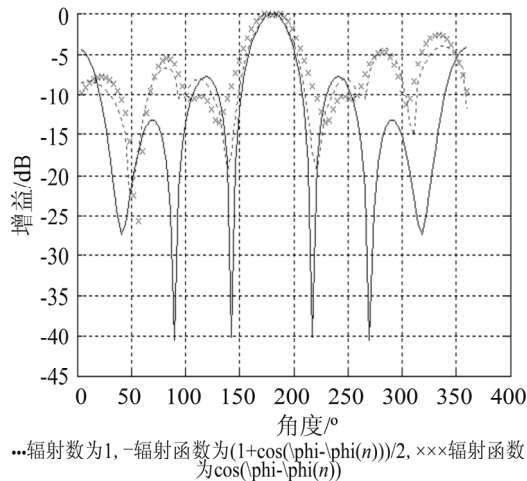


图 5 阵元发射特性曲线

Fig.5 Array element transmitting characteristic curve

2.2.2 有向阵元的圆形阵列指向性图

图 6 给出了三种辐射函数的有向阵元阵列的波束图, 由图 6 看出在三种情况中, 当辐射函数为

图 6 有向阵元圆阵波束图($N=8, r=0.6\lambda$)Fig.6 Beam pattern of a circular array composed of directional elements($N=8, r=0.6\lambda$)

$f_n(\theta, \varphi)=\cos(\varphi-\varphi_n)$ 时波束的主波瓣和第一副波瓣的增益差最大, 大约 11dB, 这也印证了前面的分析。

3 基于 FPGA 的有向阵元圆阵 ADBF 系统设计

3.1 自适应算法结构及 FPGA 实现

自适应数字波束形成(ADBF)又称自适应数字空域滤波, 它是通过对各阵元加权进行空域滤波, 来达到增强有用信号、抑制干扰的目的, 而且它可以根据信号环境的变化, 来改变各阵元的加权因子。在理想的条件下, 自适应波束形成技术可以有效地抑制干扰而保留期望(有用)信号, 从而使阵列的输出信号干扰噪声比(SINR)达到最大。ADBF 的核心是所采用的算法, 自适应过程的实现可以采用任何一种适用于横向结构滤波器的自适应迭代算法, 比如 Wiener 滤波器, 或者最小均方自适应算法(Least Mean Square, LMS), LMS 算法较其它自适应算法具有结构简单、计算量小、易于实现等特点。本设计采用最小均方(LMS)算法, 系统结构原理如图 7 所示。

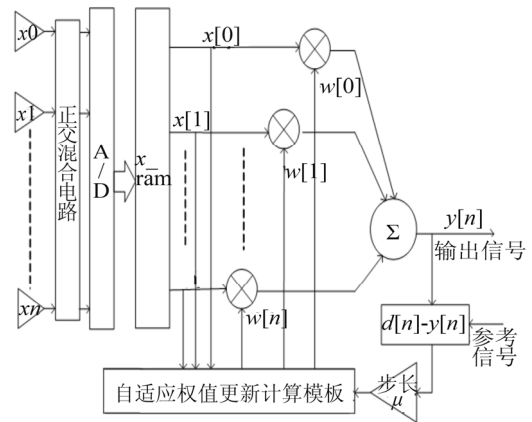


图 7 基于 FIR 架构自适应波束形成原理

Fig.7 The principle of adaptive beamforming based on FIR

图中:

$$y[n] = \sum_0^L x[n] w[n] \quad (1)$$

$$e[n] = d[n] - y[n] \quad (2)$$

$$w[n+1] = w[n] + 2\mu e[n-D] x[n-D] \quad (3)$$

具体实现步骤如下:

第一步: 由式(1)得, 实际输入的 $x(n)$ 和调整后的权值 $w(n)$ 各分量相乘之后累加得到输出 $y(n)$;

第二步: 由式(2)得, 实际输出的 $y(n)$ 与期望 $d(n)$ 相减得到调整误差 $e(n)$;

第三步: 由式(3)得, 延时后的调整误差 $e(n)$ 跟步长的 2 倍相乘, 再和延时的输入 $x(n-D)$ 相乘得到的积与延时的权值相加, 得到新的权值向量。

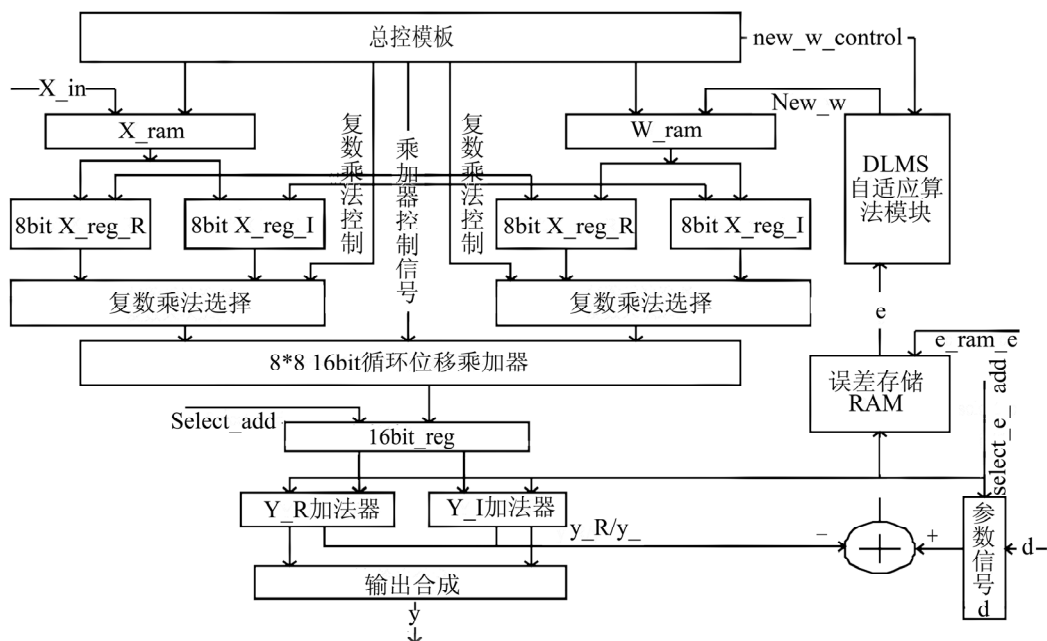


图 8 FPGA 信号自适应处理系统

Fig.8 Adaptive signal processing system based on FPGA

第四步：新的权值向量再与新的输入向量循环进行第一到第三步实现自适应。

由此，可将系统分为五大模块：主控模块：主要产生时钟信号，给各模块提供时序信号触发各模块的启动和初始化；双口存储模块(包括：输入数据存储模块、权值存储模块、误差信号存储模块等)：存储各功能模块所需的数据和参数；自适应权值计算模块，误差计算模块：这两个模块可以合在一起，系数更新的自适应算法；空间滤波器乘加模块：完成滤波运算，得到输出结果。

对声纳窄带信号一般取其复包络来进行运算，所以如何进行复数运算是提高系统反应速度的关键，本系统空间滤波采用并行乘加，使得 8 路信号可同时处理，加速了系统的反应，设计结构如图 8 所示。

3.2 仿真分析

本文设计的核心部分是基于 Stratix 系列 EP1S10 芯片设计的，分别对 I/Q 8 路原始数据进行 DLMS 自适应算法和复数乘加运算，在 Quartus II 环境下用 VHDL 语言编程实现并仿真，同时应用 MATLAB 对数字结果进行波形仿真。

(1) 按系统要求在 360° 圆周方向形成 16 个波束，即圆周扫描，相邻波束方向夹角 $<25^\circ$ ，改变波束预成方向使每隔小于 25° 形成一个波束，将 FPGA 输出存储器中的数据读出，并用 MATLAB 处理后得到波束扫描图如图 9 所示。

(2) 图 10 为系统预形成波束方向为 0° 方向，干扰从 45° 传来，从图 10 可以看出，主波束在 0°

方向形成，和预形成主波束吻合，在 45° 干扰方向形成零陷，并且提高了主波束的增益，满足系统的设计要求。

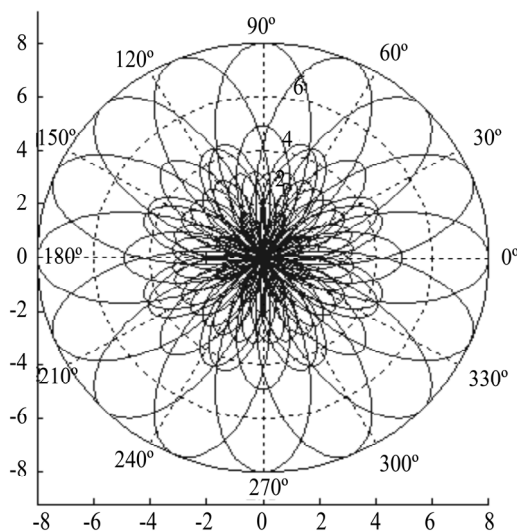


图 9 360° 圆周扫描波束指向图

Fig.9 Beam pattern of 360°circular scanning

4 结束语

自适应数字波束形成(ADBF)是现代声纳阵列信号处理的关键技术之一，本文推导出有向阵元圆阵方向波束函数并且给出了基于 FPGA 芯片实现的 ADBF 结构，给出了相应的硬件设计和仿真验证，采用 FPGA 结构，硬件成本低，在自适应阵列信号处理系统中具有很好的应用前景。

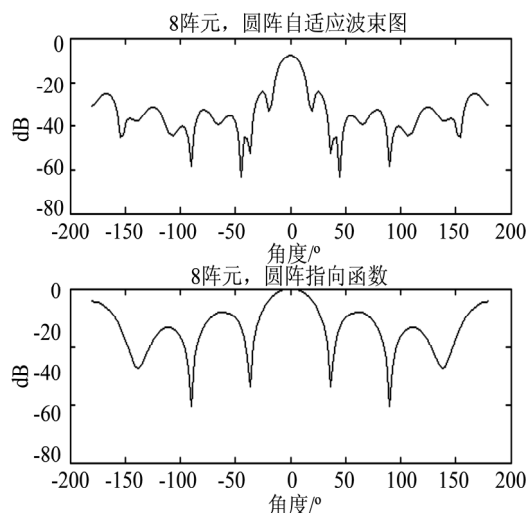


图 10 预成 0° 方向的波束图($N=8, r=0.6\lambda$)
Fig.10 Preformed 0° beam pattern($N=8, r=0.6\lambda$)

参 考 文 献

- [1] John D. Kraus, Ronald J. Marhefka. 天线(第三版)[M]. 电子工业出版社, 2004.
- [2] John D. Kraus, Ronald J. Marhefka. Antennas: For All Applications, Third Edition [M]. Electronic Industry Press, 2004.
- [2] Groen J, Beerens S P. Adaptive port-starboard beamforming of triplet sonar arrays[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2005, 30(2).
- [3] 范西昆. 并行实现空时自适应算法[J]. 电子学报, 2005, (12).
FAN Xi Kun. Parallel implementation of space-time adaptive processing algorithms[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, (12).
- [4] 刘千里. 基于 DSP 的声纳波束形成系统设计[J]. 电子器件, 2006, 29(3).
LIU Qian Li. Designing sonar beam forming system based on DSP [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2006, 29(3).
- [5] 毕永年. 基于 FPGA 的数字波束合成器设计[J]. 电子技术, 2003, (8).
BI Yongnian. Design of A digital wave beam focalizer based on FPGA [J]. Electronic Technology, 2003, (8).
- [6] J Ou, VK Prasanna. Parameterized and energy efficient adaptive beamforming on fpgas using matlab/simulink[J]. Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2004.
- [7] Paul Graham, Brent Nelson. FPGA-based sonar processing[J]. Department of Electrical and Computer Engineering. Brigham Young University, Provo, UT.
- [8] 李启虎. 声纳信号处理引论[M]. 海洋出版社, 1985.
LI Qihu. Introduction to the sonar signal processing [M]. Ocean Press, 1985.

[1] John D. Kraus, Ronald J. Marhefka. 天线(第三版)[M]. 电子工业