

强干扰环境水下运动阵列方位估计的新方法

侯云山^{1,2}, 黄建国¹, 史文涛¹

(1. 西北工业大学航海学院, 710072, 西安; 2. 河南科技大学电子信息工程学院, 471003, 河南洛阳)

摘要: 针对水下存在方位不确定的强干扰源时基于合成孔径技术的多目标方位估计方法失效的问题,提出一种基于稳健卡朋波束形成器(RCB)的波束域处理技术的扩展拖曳阵测量方法(RCB-ETAM). 该方法先利用物理线列阵的直线运动特点和水中信号的相干性,通过对不同时段的数据进行相位补偿将物理阵的数据矩阵合成更长孔径的虚拟阵的数据矩阵,然后根据虚拟阵数据和干扰源方位,使用 RCB 自适应调整虚拟阵元权值在感兴趣的范围内形成若干个波束,每个波束在干扰源方位形成零陷从而减小干扰对波束输出结果的影响,最后将虚拟阵数据转换到波束域,使用常规波束形成方法得到目标方位. 仿真结果表明,与 ETAM 方法相比,RCB-ETAM 的抗强干扰能力有了很大提高,在 ETAM 完全失效的情况下,依然能够给出目标方位的准确估计.

关键词: 方位估计; 被动合成孔径; 波束域; 稳健卡朋波束形成器

中图分类号: TN911.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)12-0071-05

A New Bearing Estimation Method for Underwater Moving Arrays in the Context of Strong Interferences

HOU Yunshan^{1,2}, HUANG Jianguo¹, SHI Wentao¹

(1. College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. College of Electronics and Information Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China)

Abstract: A new method called RCB-ETAM is proposed to solve the problem that the conventional passive aperture-synthesis methods for multi-target bearing estimation generally fail in the context of strong interferences. The method exploits the merits of beamspace processing techniques based on robust Capon beamformer(RCB) and the effective data restructuring ability of ETAM(Extended Towed Array Measurements). The method consists of following steps: The phases of different data section of the physical array are compensated to synthesize into a data matrix corresponding to a much longer virtual array by using advantage of the array linear movement and coherence of underwater signals; Then according to the virtual array data and directions of interferences, RCB method is used to adaptively adjust the weights for elements of virtual array such that several beams are formed in the scope of interest with each beam having deep nulls in the directions of interferences; Finally the virtual array data is transformed into the beam domain, and the conventional beamforming technique is used to find the target directions. Simulation results show that the proposed RCB-ETAM method has much better anti-interference ability than the conventional ETAM method, and yields quite correct bearing estimations even when ETAM completely fails.

Keywords: bearing estimation; passive aperture synthesis; beam domain; robust Capon beamformer

收稿日期: 2010-04-26. 作者简介: 侯云山(1973—),男,博士生;黄建国(联系人),男,教授,博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60972152);航空科学基金资助项目(2009ZC53031);西北工业大学基础研究基金资助项目(NPU-FFR-W018102).

水下运动阵列的合成孔径技术利用阵列运动和窄带信号的时域相干性来构建一个长的合成阵列,从而极大地提高了波束形成的性能和目标角度分辨能力。比较经典的方法有 YenCarey 方法^[1]、ML 方法^[2]、ETAM 方法^[3]以及一些在这些方法基础上改进的适合实时处理和具有更高角度分辨力的方法^[4-6],但上述这些方法都没有考虑水下存在强干扰源的情况。一般来说,强干扰源的存在会使得这些合成孔径多目标方位估计方法失效,无法给出正确的估计结果。

对于常规的固定阵列,为了减小强干扰源对方位估计的影响,一般的做法是在感兴趣的角度范围内形成若干波束进行波束域预处理,以抑制波束覆盖区域以外的噪声和干扰。为了有效抑制特定来向的强干扰源的影响,可以通过预先校正阵列误差、在干扰方向设置虚拟干扰源并采用迭代最小二乘法获取各配置波束的最优权的方法进行处理^[7],但此方法在实现上较为复杂,且对方位不确定的干扰适应能力差。

稳健卡朋波束形成器(RCB)^[8]是近年来提出的一种新型自适应波束形成器,能在干扰方向自适应形成零陷,因此它具有远高于常规波束形成器的干扰抑制性能,尤其在干扰方向不确定的情况下具有稳健的性能。

本文采用基于 RCB 波束形成器的波束域处理技术,并吸取 ETAM 方法的高效重构接收数据阵的优点,提出了一种新的波束域处理技术的扩展拖曳阵测量方法(RCB-ETAM)。该方法的处理过程大致分为:基于 ETAM 的数据重构、波束指向和波束个数的确定、若干个 RCB 波束的权数求解、波束空间变换和基于常规波束形成的方位估计 5 个部分。仿真结果表明,与 ETAM 方法相比,RCB-ETAM 的抗干扰能力有了很大提高,在强干扰源存在时,依然能够给出目标方位的准确估计。

1 信号模型

假设具有 M 个阵元的均匀线阵沿着 X 轴方向以速度 v 做匀速直线运动,阵元间距为 d 。如果存在频率为 f_0 且方位角为 $\theta_l (l=1,2,\dots,L)$ 的 L 个远场源目标(相对阵的法线方向),设信号以时间间隔 Δt 采样, $t_i = i\Delta t, i=1,2,\dots,N$, 则 t_i 时刻第 n 个阵元的输出可以表示为

$$x_n(t_i) =$$

$$\sum_{l=1}^L A_l \exp \left[-j2\pi f_0 \left(t_i - \frac{vt_i + (n-1)d}{c} \sin\theta_l \right) \right] + \epsilon_{n,i} \quad (1)$$

于是信号模型的矩阵形式为

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})\mathbf{S} + \boldsymbol{\epsilon} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{S} \in \mathbf{C}^{L \times N}$ 为包含了多普勒频移的目标信号; $\boldsymbol{\epsilon} \in \mathbf{C}^{M \times N}$ 为加性高斯白噪声;

$$\mathbf{X} = [\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_N] \quad (3)$$

其中 $\mathbf{X}_i = [x_1(t_i), x_2(t_i), \dots, x_M(t_i)]^T$ 是阵列输出的第 i 次采样, $\mathbf{X} \in \mathbf{C}^{M \times N}$;

$$\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}) = [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_L)] \quad (4)$$

其中 $\mathbf{a}(\theta_i) (i=1,2,\dots,L)$ 为方向矢量

$$\mathbf{a}(\theta_i) = [1, \exp(-j2\pi f_0 d (\sin\theta_i)/c), \dots, \exp(-j2\pi f_0 (M-1)d (\sin\theta_i)/c)]^T \quad (5)$$

2 ETAM 方法

ETAM 方法考虑的是各次测量数据之间的相位差别,并设法补偿这种相位差别以形成更长孔径的虚拟阵列。

由于 $t_i + \tau$ 时刻第 n 个阵元的输出 $x_n(t_i + \tau)$ 和 t_i 时刻阵列的第 $n+q$ 个阵元的输出 $x_{n+q}(t_i)$ 之间的关系为^[3]

$$x_{n+q}(t_i) = \exp[-j(2\pi f_0 \tau + \phi)] x_n(t_i + \tau) \quad (6)$$

式中: q 为在时间 τ 内阵列移动的阵元位置数,且 $v\tau = qd$ 。记 $\psi = -(2\pi f_0 \tau + \phi)$ 为相位校正因子,则 ψ 的最小平方估计 $\hat{\psi}$ 可按照下面的步骤求出。先计算

$$\begin{aligned} \phi_n &= \arg\{x_{n+q}(t_i)x_n^*(t_i + \tau)\}, \\ n &= 1, 2, \dots, M-q \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $*$ 表示数据的复共扼; $M-q$ 是 2 次测量之间的重叠阵元数。于是,相位校正因子的最小平方估计为

$$\hat{\psi} = \frac{1}{M-q} \sum_{n=1}^{M-q} \phi_n + \hat{\epsilon}_\psi \quad (8)$$

因此,有

$$\begin{aligned} x_{n+q}(t_i) &= \exp(j\hat{\psi}) x_n(t_i + \tau), \\ n &= M-q+1, M-q+2, \dots, M \end{aligned} \quad (9)$$

也就是说,一次扩展使得阵元数由原来的 M 个扩展到了虚拟的 $M+q$ 个。重复以上过程,由于每次测量扩展的阵元数为 q 个,则经过 J 次测量(扩展)后,合成孔径的阵元总数为 $M+Jq$ 。

3 RCB 波束形成器

由 LI 等人^[8]提出的稳健 Capon 自适应波束形成算法(RCB)是近年来的一种性能优越的对角加载

算法,是对 Capon 波束形成器^[9]的一种改进,提高了在期望信号方位不确定时波束形成的稳健性.

下面先简单介绍一下 Capon 波束形成器.

Capon 波束形成器在期望方向的增益保持为 1,同时抑制其他方向的信号,在这些方向上形成零陷.该波束形成器求解的优化问题可表述为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta_0) &= 1 \\ \min(\mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w}) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{a}(\theta_0)$ 是波达方向为 θ_0 的已知期望信号的方向向量; $\mathbf{R}$ 为接收数据的相关矩阵; $\mathbf{w}$ 为权系数向量.

利用拉格朗日乘子法来解决这一最优化问题.求解权系数向量

$$\mathbf{w} = \frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta_0)}{\mathbf{a}^H(\theta_0) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta_0)} \quad (11)$$

式(11)中分母只是一个常数.RCB 算法则对数据协方差矩阵进行了对角加载,其方向图权向量为

$$\mathbf{w} = \left(\mathbf{R} + \frac{\mathbf{I}}{\lambda} \right)^{-1} \mathbf{a}(\theta_0) \quad (12)$$

式中:参数 λ 可以由下式唯一确定

$$f(\lambda) = \sum_{m=1}^M \frac{|z_m|^2}{(1 + \lambda \alpha_m)^2} = \mu \quad (13)$$

其中 μ 为常数,是预先设定的期望信号的导引向量的误差范围, α_m 是 $\mathbf{R}$ 的特征值, z_m 是期望信号的方向向量在 $\mathbf{R}$ 的特征向量空间的投影.

4 RCB-ETAM 方法

4.1 虚拟阵的数据矩阵形式

第 2 节论述了把物理阵扩展为虚拟阵的过程,这里要研究扩展后虚拟阵的数据矩阵形式.

设相邻两次测量的时间间隔为 τ ,采样频率为 f_s ,则每次测量的采样数为

$$k_0 = \tau f_s = q d f_s / v \quad (14)$$

因此经过 J 次测量(扩展)后,阵列输出的数据矩阵变为

$$\tilde{\mathbf{X}} = \tilde{\mathbf{A}}(\boldsymbol{\theta}) \tilde{\mathbf{S}} + \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}} \quad (15)$$

式中: $\tilde{\mathbf{X}} \in \mathbf{C}^{(M+Jq) \times k_0}$ 是一个具有 $M+Jq$ 个虚拟阵元和 k_0 次采样的矩阵;

$$\tilde{\mathbf{A}}(\boldsymbol{\theta}) = [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_L)] \quad (16)$$

其中 $\mathbf{a}(\theta_i) (i=1, 2, \dots, L)$ 为虚拟阵的方向矢量

$$\begin{aligned} \mathbf{a}(\theta_i) &= [1, \exp(-j2\pi f_0 d(\sin\theta_i)/c), \dots, \\ &\exp(-j2\pi f_0 (M+Jq-1)d(\sin\theta_i)/c)]^T \end{aligned} \quad (17)$$

4.2 波束域变换

所谓的波束域变换是指将阵元域的数据经过变

换合成一个或几个波束,再利用合成的波束数据进行方位估计.一般可以通过一个波束转换矩阵 $\mathbf{T}$ 在观测的空间区域来形成 B 个波束.波束转换矩阵有许多不同的构造方法,最具有代表性的是基于离散傅里叶变换(DFT)的波束形成方法^[10],但这些方法都不具有抗强干扰源的能力.下面我们构造一个新的波束转换矩阵.

设观测方位角度范围为 $[\theta_L, \theta_H]$,我们要在这个区域内均匀地形成 B 个波束,波束指向为

$$\begin{aligned} [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_B] &= \\ [\theta_L, \theta_L + \frac{(\theta_H - \theta_L)}{(B-1)}, \dots, \theta_H] \end{aligned} \quad (18)$$

构造波束转换矩阵为

$$\mathbf{T} = [\mathbf{w}(\theta_1), \mathbf{w}(\theta_2), \dots, \mathbf{w}(\theta_B)] \quad (19)$$

式中: $\mathbf{w}(\theta_i)$ 是由式(12)计算出的列向量.

为了保证变换后噪声仍为高斯白噪声,需要对 $\mathbf{T}$ 进行正交化

$$\mathbf{T}_{RCB} = \mathbf{T}(\mathbf{T}^H \mathbf{T})^{-1/2} \quad (20)$$

利用波束转换矩阵 $\mathbf{T}_{RCB}$ 将虚拟阵列的数据阵变换到波束域,得

$$\mathbf{Y} = \mathbf{T}_{RCB}^H \tilde{\mathbf{X}} \quad (21)$$

4.3 用常规波束形成求目标方位

本文使用常规波束形成方法扫描波束图,从而得到目标的方位角估计.常规波束形成谱函数的表达式为

$$\mathbf{P}(\theta) = \mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{R} \mathbf{a}(\theta) \quad (22)$$

式中: $\mathbf{R} = \frac{1}{k_0} \mathbf{Y}^H \mathbf{Y}$ 是虚拟阵的数据相关矩阵.

5 仿真实验及性能分析

设均匀线阵的阵元个数为 $M=8$,阵元间距为中心频率对应的半波长,阵列运动速度为 15 m/s (30 节),水中声速为 1 500 m/s,采样频率为 50 kHz.合成阵列的时间为 0.32 s.取 $q=M/2=4$,可计算出虚拟阵元数为 24.假设有 2 个中心频率为 5 kHz 的等强信号源,信号强度为 0 dB,入射角分别为 -3° 和 3° .2 个强干扰源分别位于 -32° 和 37.5° ,干扰源的强度均为 30 dB.

5.1 波束加权方向图比较

对于虚拟阵,我们首先比较文献[10]中基于 DFT 的波束形成方法和本文提出的基于 RCB 的波束形成方法的波束加权方向图.设观测方位角度范围为 $[-10^\circ, 10^\circ]$,分别采用上述 2 种方法在这个范围内形成 5 个波束,这 5 个波束的指向为

$[-10^\circ, -5^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ]$.

图1给出了基于DFT的5个波束加权方向图. 由文献[10]知, 基于DFT的波束加权方向图的零陷只与阵列结构有关, 与接收数据无关. 当阵元间距为入射信号中心频率对应的半波长时, 零陷位置为 $1/M$ 弧度的整数倍. 如图1所示, 当虚拟阵元数为24时, 零陷位置约为 4.8° 的整数倍.

图2给出了基于RCB的5个波束加权方向图. 由于RCB是与接收数据有关的自适应波束形成方法, 所以能够自适应地在干扰源所在方位形成零陷, 有利于抑制干扰. 从图2中可以看出, 5个波束都位于 -32° 和 37.5° 方位的2个强干扰源, 形成了一50 dB以上的零陷.

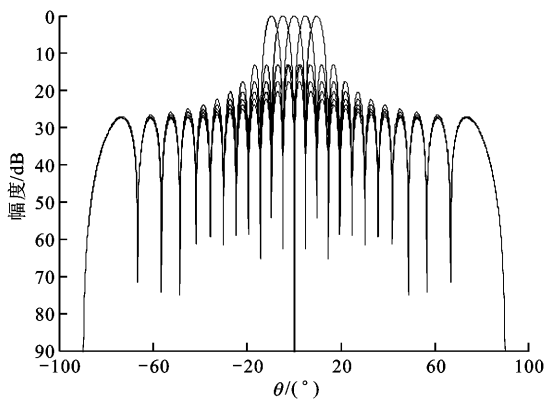


图1 基于DFT的波束加权方向图

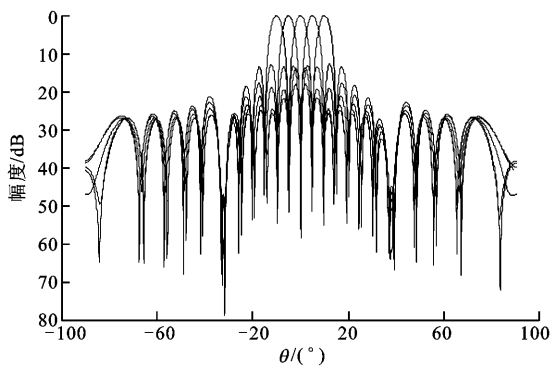


图2 基于RCB的波束加权方向图

5.2 波束转换增益分析

波束转换矩阵的增益定义为

$$g(\theta) = \frac{\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{T} \mathbf{T}^H \mathbf{a}(\theta)}{\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{a}(\theta)} \quad (23)$$

显然波束转换增益小于等于1. 图3比较了基于DFT的波束形成方法和本文提出的基于RCB的波束形成方法的波束转换增益.

由于是对24元虚拟阵而不是8元的物理阵求

波束转换矩阵, 再考虑到阵列扩展过程中引入的噪声和干扰源的影响, 2种方法的波束转换增益在波束覆盖区域 $[-10^\circ, 10^\circ]$ 内都有一定程度的起伏.

从图3可以看出, 基于RCB的波束形成方法的波束转换增益在 -32° 和 37.5° 的2个强干扰源方位上接近0, 将旁瓣进入的干扰功率降到最小, 从而在波束域输出中排除其对目标方位估计的影响, 而基于DFT的波束形成方法的波束转换增益在干扰源方位上值虽较小, 但在干扰源的强度较高的情况下, 仍会有部分干扰源功率从旁瓣进入而导致无法分辨2个目标.

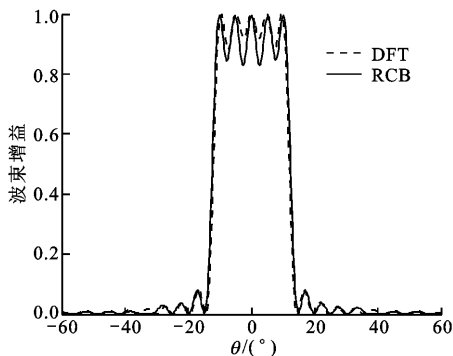


图3 波束转换增益比较

5.3 目标方位估计性能

图4给出了3种方法的空间谱图, 它们分别是常规ETAM方法、基于DFT波束形成的ETAM方法(简记为DFT-ETAM)和本文提出的RCB-ETAM.

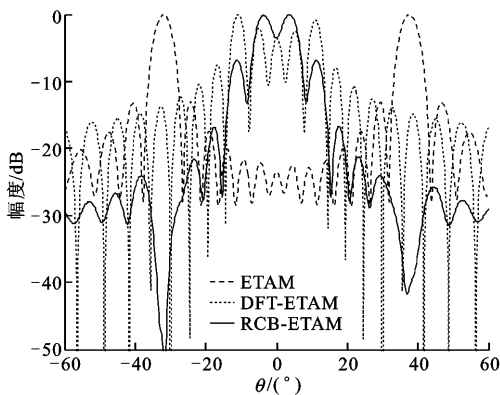


图4 3种方法的空间谱比较

从图4可以看出, 只有本文提出的RCB-ETAM正确地估计出了 -3° 和 3° 处的2个信号源. 原因分析如下.

由于常规ETAM方法本质上还是一种基于能量的方法, 在信号和干扰的强度相差较大的情况下, 给出的只是高强度的干扰源的方位估计. DFT-

ETAM 虽然通过波束转换在波束覆盖区域 $[-10^\circ, 10^\circ]$ 外的值很小, 但仍有部分干扰源功率从旁瓣进入, 导致无法正确估计 2 个目标的方位. 由于本文提出的 RCB-ETAM 可在 -32° 和 37.5° 的 2 个强干扰源方位上形成很深的零陷, 所以能够正确地估计出 -3° 和 3° 处的 2 个信号源.

6 结 论

本文利用 RCB 波束形成器的波束域处理技术, 提出了一种 RCB-ETAM 方法来改善存在方位不定的强干扰源时 ETAM 方法的方位估计性能. 仿真结果表明, 与 ETAM 方法相比, RCB-ETAM 的抗干扰能力有了很大提高, 在强干扰源存在时, 该方法依然能够给出目标方位的准确估计, 是对合成孔径技术的一个重要补充.

参考文献:

- [1] YEN Nai-Chyuan, CAREY W. Application of synthetic-aperture processing to towed-array data [J]. J Acoust Soc Am, 1989, 86(2): 754-765.
- [2] NUTTALL A H. The maximum likelihood estimator for acoustic synthetic aperture processing [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1992, 17(1): 26-29.
- [3] STERGIOPOULOS S. Extended towed array processing by an overlap correlator [J]. J Acoust Soc Am, 1989, 86(1):158-171.
- [4] HOU Yunshan, HUANG Jianguo, JIANG Min, et al. Application of linear prediction technique to passive synthetic aperture processing [J/OL]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2010 (2) [2010-03-27]. <http://www.hindawi.com/journals/asp/2010/751069.html>.
- [5] 侯云山, 黄建国, 金勇. 被动合成阵列极大似然参数估计的快速算法研究[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(12):106-110.
HOU Yunshan, HUANG Jianguo, JIN Yong. Fast algorithm of the maximum likelihood parameter estimation for passive synthetic arrays [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(12):106-110.
- [6] 侯云山, 黄建国, 张立杰, 等. 一种新的浅海目标方位估计方法[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(10):1295-1299.
HOU Yunshan, HUANG Jianguo, ZHANG Lijie, et al. A novel bearing estimation method for shallow wa-

ter targets [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(10):1295-1299.

- [7] TIAN Zhi. Beam-space iterative quadratic WSF for DOA estimation [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2003, 10(6): 176-179.
- [8] LI Jian, STOICA P, WANG Zhisong. On robust capon beamforming and diagonal loading [J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 2003, 51(7):1702-1715.
- [9] CAPON J. High resolution frequency-wavenumber spectrum analysis [J]. Proc of IEEE, 1969, 57(8): 1408-1418.
- [10] ZOLTOWSKI D M, KAUTZ M G, SILVERSTEIN D S. Beam-space root-music [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1993, 41(1):344-364.

[本刊相关文献链接]

- 子阵和相位平滑的相位差方向估计方法. 西安交通大学学报, 2010, 44(10):72-76.
- 被动合成阵列极大似然参数估计的快速方法. 西安交通大学学报, 2009, 43(12):106-110.
- 利用离去角度的无线传感器网络分布式节点定位方法. 西安交通大学学报, 2010, 44(2):61-66.
- 双选择性衰落信道下的改进型频域判决反馈均衡. 西安交通大学学报, 2010, 44(10):67-71.
- 无线传感器网络分布式射频干涉定位方法. 西安交通大学学报, 2009, 43(8):48-52.
- 一种适合任意阵列流型的相干信号波达方向估计算法. 西安交通大学学报, 2009, 43(6):72-75.
- 快速四阶累积量旋转不变子空间算法. 西安交通大学学报, 2009, 43(6):88-92.
- 三维参数联合估计的免疫记忆量子克隆算法. 西安交通大学学报, 2009, 43(4):75-79.
- 一种新的浅海目标方位估计方法. 西安交通大学学报, 2008, 42(10):1295-1299.
- 二维波达方向估计的非酉联合对角化方法. 西安交通大学学报, 2008, 42(6):747-750.
- 相关衰落多输入多输出系统的参数化信道估计. 西安交通大学学报, 2007, 41(12):1431-1435.
- 一种地震子波峰值频率的估计方法. 西安交通大学学报, 2007, 41(6):660-664.

(编辑 刘杨)