

基于修正超波束技术的精确定向算法探讨

王昭辉^{1,2}, 刘云涛¹, 蔡惠智¹

(1. 中国科学院声学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100190)

摘要: 为提高目标定向精度, 在保持基阵孔径不变的前提下, 对传统超波束技术进行了修正, 将超波束非线性运算和后置处理算法相结合, 避开了超波束非线性带来的弊端。仿真结果表明, 修正后的方法有效地减小了主瓣宽度, 降低了旁瓣高度, 提高了系统的目标检测性能, 降低了虚警概率, 对于系统的精确定向具有重要意义。

关键词: 目标精确定向; 超波束; 主副比

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2009)-05-0651-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2009.05.018

Research on the algorithms of accurate bearing estimation based on modified hyper-beam technique

WANG Zhao-hui^{1,2}, LIU Yun-tao¹, CAI Hui-zhi¹

(1. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190; 2. Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Accurate bearing estimation is critical in array processing techniques. Since the conventional hyper beam technique, due to the nonlinearity, cannot be combined straightforwardly with linear post-processing algorithms, this article improves the technique and proposes a new approach which successfully steers clear of the non-linear drawbacks. Simulations demonstrate that this new approach can effectively reduce the width of the main lobe of the beam pattern and reduce the amplitude of the side lobe, and thus enhance the accuracy of the bearing estimation.

Key words: accurate bearing estimation; hyper beam technique; peak side lobe ratio of beam pattern

1 引言

目标精确定向是阵列信号处理中的一项关键技术。传统的提高定向精度的方法主要包括增大阵列孔径或采用相应的后处理算法^[1,2], 但前者常受到硬件条件的限制。超波束技术^[3]在阵列孔径保持不变的前提下有效地减小了指向性函数的主瓣宽度并抑制了旁瓣, 进而提高了系统的检测性能, 降低了虚警概率^[4]。但该技术的非线性输出限制了后置处理算法的应用, 如传统的匹配滤波处理等。

本文对超波束方法进行了修正, 将非线性操作与后置处理算法相结合, 提出了一种提高线性系统目标定向精度的新方法。

2 基于修正超波束技术的目标精确定向算法

2.1 超波束技术原理

收稿日期: 2008-08-07; 修回日期: 2008-11-05

作者简介: 王昭辉(1984-), 女, 山东济宁人, 硕士研究生, 研究方向为阵列信号处理。

通讯作者: 王昭辉, E-mail: zhawang0312@gmail.com

以等间隔线列阵为例对超波束技术予以介绍, 如图 1 所示。图中阵元从左到右顺序编号为: $H_1, H_2, \dots, H_M, H_{M+1}, \dots, H_{2M}$ 。

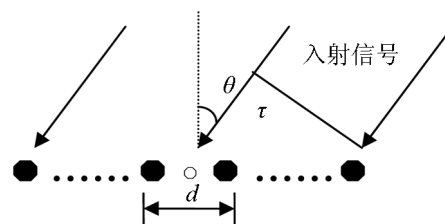


图 1 等间隔线列阵
Fig.1 Equal-spaced linear array

假定基元间隔为 d , 时间参考点选在阵列中心, 入射波为单频信号 $A\cos(2\pi ft)$, 入射方向为 θ , 则第 i 阵元接收到的信号为:

$$s_i(t) = A\cos[2\pi f(t + (M-i+\frac{1}{2})\frac{d\sin\theta}{c})]$$

假设预成波束方向为 θ_0 , 并令:

$$\phi_0 = 2\pi \frac{d\sin\theta_0}{\lambda}, \quad \phi = 2\pi \frac{d\sin\theta}{\lambda}$$

左子阵 $H_1, H_2, \dots, H_M$ 形成左半波束 $s_L(t)$ 为:

$$s_L(t) = \sum_{i=1}^M s_i(t) = \sum_{i=1}^M A\cos[2\pi ft - (M-i+\frac{1}{2})(\phi_0 - \phi)]$$

右子阵 $H_{M+1}, \dots, H_{2M}$ 形成右半波束 $s_R(t)$ 为:

$$s_R(t) = \sum_{i=M+1}^{2M} s_i(t) = \sum_{i=M+1}^{2M} A \cos[2\pi ft - (M-i+\frac{1}{2})(\phi_0-\phi)] = \sum_{i=1}^M A \cos[2\pi ft + (i-\frac{1}{2})(\phi_0-\phi)]$$

利用三角函数求和公式:

$$\sum_{i=1}^N \cos[\alpha + (i-1)\beta] = \frac{\cos(\alpha + \frac{N-1}{2}\beta) \sin \frac{N\beta}{2}}{\sin(\frac{\beta}{2})}$$

将左右波束化简为:

$$s_L(t) = A \cos[2\pi ft - \frac{M}{2}(\phi_0-\phi)] \frac{\sin[\frac{M(\phi_0-\phi)}{2}]}{\sin \frac{\phi_0-\phi}{2}}$$

$$s_R(t) = A \cos[2\pi ft + \frac{M}{2}(\phi_0-\phi)] \frac{\sin[\frac{M(\phi_0-\phi)}{2}]}{\sin \frac{\phi_0-\phi}{2}}$$

和波束 s_S 与差波束 s_D 分别为:

$$s_S(t) = s_L(t) + s_R(t), \quad s_D(t) = s_L(t) - s_R(t)$$

将左右波束代入上式, 化简可得:

$$s_S(t) = A \cos(2\pi ft) \frac{\sin[M(\phi_0-\phi)]}{\sin \frac{\phi_0-\phi}{2}}$$

$$s_D(t) = A \sin(2\pi ft) \left\{ \frac{1 - \cos[M(\phi_0-\phi)]}{\sin \frac{\phi_0-\phi}{2}} \right\}$$

左右半波束、和波束、差波束的指向性函数分别为:

$$D_H(\theta) = \left| \frac{\sin[\frac{M}{2}(\phi_0-\phi)]}{M \sin \frac{\phi_0-\phi}{2}} \right| \quad (1)$$

$$D_S(\theta) = \left| \frac{\sin[M(\phi_0-\phi)]}{2M \sin \frac{\phi_0-\phi}{2}} \right| \quad (2)$$

$$D_D(\theta) = \left| \frac{1 - \cos[M(\phi_0-\phi)]}{2M \sin \frac{\phi_0-\phi}{2}} \right| \quad (3)$$

根据所得指向性函数可得和、差波束的指向性图案如图 2 所示。

利用差波束在信号入射方向的优良特性, 可计算出超波束及其指向性函数分别为:

$$s_{Hyper}(t) = |s_L(t)| + |s_R(t)| - |s_L(t) - s_R(t)| = |s_L(t)| + |s_R(t)| - |s_D(t)| \quad (4)$$

$$D_{Hyper}(\theta) = |D_H(\theta) - D_D(\theta)| \quad (5)$$

根据式(5)绘出其指向性图案如图 3 所示。

一般性超波束形成公式为:

$$s_{Hyper}(t) = [|s_L(t)| + |s_R(t)|]^n - |s_D(t)|^n \quad (6)$$

推荐 n 的取值为: $0.3 \leq n \leq 1$ 。

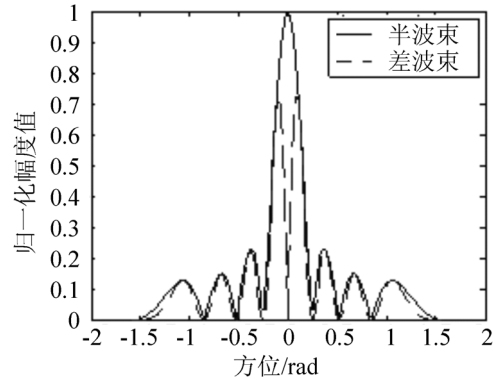


图 2 16 元等间隔线列阵的半波束与差波束指向性
Fig.2 Beam patterns of half beam and difference beam for 16-sensor array

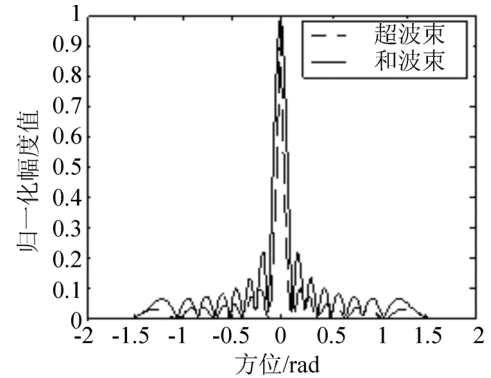


图 3 16 元等间隔线列阵的和波束与超波束指向性
Fig.3 Beam patterns of sum beam and hyper beam for 16-sensor array

对比和波束与超波束的指向性图案可知, 在线列阵孔径保持不变的前提下超波束具有以下优点:

- (1) 减小了主瓣宽度;
- (2) 有效抑制了旁瓣;

因此, 采用超波束可以提高系统的检测性能, 降低虚警概率, 并提高目标方位估计精度。

但由于超波束形成公式的非线性, 超波束输出不能进行线性后置处理操作, 如匹配滤波等。因此, 为了提高测向精度, 有必要对该方法进行修正。

2.2 修正超波束技术

首先对和差波束进行后置处理, 然后进行 2.1 节中的非线性操作。设信号副本为 $r(t) = \cos(2\pi ft)$, 并设 $c_R(t) = r(t) \otimes r(t)$ 。

对差波束输出结果进行 Hilbert 变换, 可得

$$c_{DHilbert}(t) = A c_R(t) \left\{ \frac{1 - \cos[M(\phi_0-\phi)]}{\sin \frac{\phi_0-\phi}{2}} \right\}$$

$$\text{又有: } c_S(t) = A c_R(t) \frac{\sin[M(\phi_0-\phi)]}{\sin \frac{\phi_0-\phi}{2}}$$

由和差波束匹配相关结果可得:

$$\tilde{c}_L(t) = A c_R(t) \left\{ \frac{\sin[M(\phi_0 - \phi)]}{\sin \frac{\phi_0 - \phi}{2}} + \frac{1 - \cos[M(\phi_0 - \phi)]}{\sin \frac{\phi_0 - \phi}{2}} \right\}$$

$$\tilde{c}_R(t) = A c_R(t) \left\{ \frac{\sin[M(\phi_0 - \phi)]}{\sin \frac{\phi_0 - \phi}{2}} - \frac{1 - \cos[M(\phi_0 - \phi)]}{\sin \frac{\phi_0 - \phi}{2}} \right\}$$

而后有: $\tilde{c}_{Hyper}(t) = [(|\tilde{c}_L(t)| + |\tilde{c}_R(t)|)^n - |c_D(t)|^n]^{1/n}$

根据 $\tilde{c}_{Hyper}(t)$ 进行目标检测与方位估计, 可计算 $\tilde{c}_L(t)$ 、 $\tilde{c}_R(t)$ 、 $\tilde{c}_{Hyper}(t)$ 的指向性函数分别为:

$$\tilde{D}_L(\theta) = \left| \frac{\sin[M(\phi_0 - \theta)]}{2M \sin \frac{\phi_0 - \theta}{2}} + \frac{1 - \cos[M(\phi_0 - \theta)]}{2M \sin \frac{\phi_0 - \theta}{2}} \right| \quad (7)$$

$$\tilde{D}_R(\theta) = \left| \frac{\sin[M(\phi_0 - \theta)]}{2M \sin \frac{\phi_0 - \theta}{2}} - \frac{1 - \cos[M(\phi_0 - \theta)]}{2M \sin \frac{\phi_0 - \theta}{2}} \right| \quad (8)$$

$$\tilde{D}_{Hyper}(\theta) = |\tilde{D}_L(\theta) + \tilde{D}_R(\theta) - 2D_D(\theta)| \quad (9)$$

信号由侧射方向入射时可根据式(9)给出 $\tilde{c}_{Hyper}(t)$ 的指向性图案如图4所示。

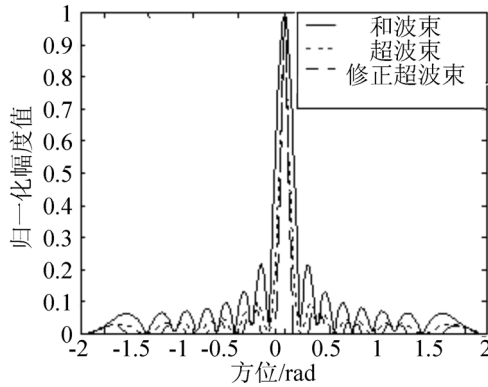


图4 16元等间隔和波束、超波束与修正波束的指向性
Fig.4 Beam patterns of sum beam, hyper beam and modified hyper beam for 16-sensor array

由图4知, 修正波束的指向性函数比2.1节中超波束指向性函数具有更窄的主瓣和更低的旁瓣, 因此将会带来更高的检测增益和更低的虚警概率。

3 仿真试验

3.1 仿真试验1

3.1.1 仿真试验条件

16元等间隔线列阵, 入射信号为单频信号, 中心频率 $f_c = 1000\text{Hz}$, 基元采样频率 $f_s = 10\text{kHz}$ 。

目标位于侧射方向时($\theta = 0^\circ$), 普通波束形成的主瓣宽度为: $\Delta\theta \approx 0.88 \frac{\lambda}{L} \times \frac{1}{\cos\theta} = 6.3^\circ$, 旁瓣高度为主瓣的22%, 即主副比为13.15dB。

目标位于端射方向时($\theta = 80^\circ$), 普通波束形成

的主瓣宽度为: $\Delta\theta = 2(\theta - \theta_0)$ 。其中, $\sin\theta - \sin\theta_0 = 0.44\lambda/L$, 计算得 $\Delta\theta = 23.19^\circ$ 。主副比仍为13.15dB。

3.1.2 仿真试验结果与分析

取 $n=1$, 目标位于侧射方向与端射方向时, 普通波束形成和修正超波束方法匹配滤波后的波束指向性图案如图5、图6所示。

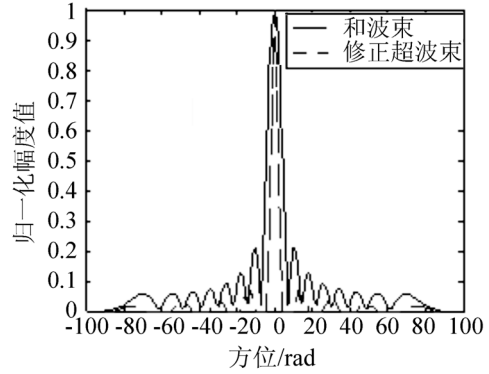


图5 目标位于侧射方向时, 普通波束形成和修正超波束指向性
Fig.5 Beam patterns of sum beam and modified hyper beam with signal in the lateral direction

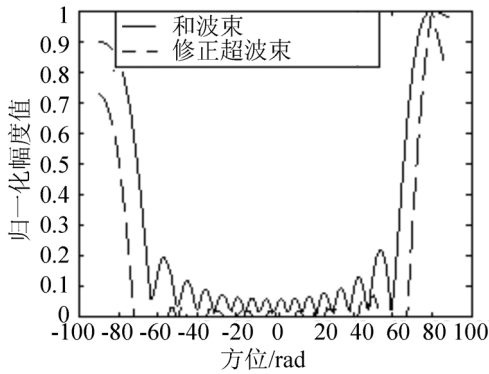


图6 目标位于端射方向时, 普通波束形成和修正超波束指向性
Fig.6 Beam patterns of sum beam and modified hyper beam with signal in the end-fire direction

图5中, 修正超波束方法的3dB主瓣宽度 $\Delta\theta \approx 2.26^\circ$, 降到传统波束形成主瓣宽度的1/3; 主副比为22.83dB, 相比于传统波束形成增加了9.68dB; 图6中, 修正超波束方法的3dB主瓣宽度 $\Delta\theta \approx 10.29^\circ$, 降到传统波束形成主瓣宽度的1/2; 主副比为22.79dB, 相比传统波束形成增加了9.64dB。

调整指数因子 $n=0.5$, 目标位于侧射与端射方向 $\theta=80^\circ$ 时, 普通波束形成和修正超波束方法匹配滤波后的波束指向性图案如图7、图8所示。

图7中, 修正超波束方法的3dB主瓣宽度 $\Delta\theta \approx 0.99^\circ$, 降到传统波束形成主瓣宽度的1/6; 主副比为36.83dB, 比传统波束形成增加了23.68dB; 图8中, 修正超波束方法的3dB主瓣宽度 $\Delta\theta \approx 2.51^\circ$, 降到传统波束形成主瓣宽度的1/10; 主副比为33.72dB, 比传统波束形成增加了20.57dB。

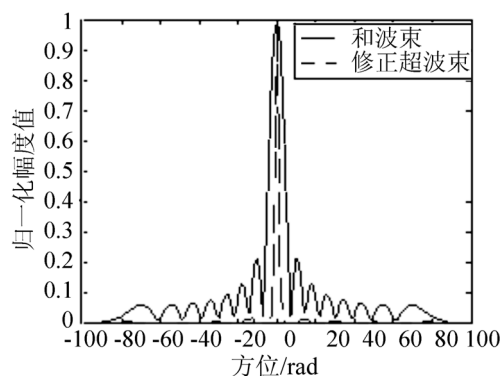


图7 侧射方向时, 普通波束形成和修正超波束指向性($n=0.5$)

Fig.7 Beam patterns of sum beam and modified hyper beam with signal in the lateral direction ($n=0.5$)

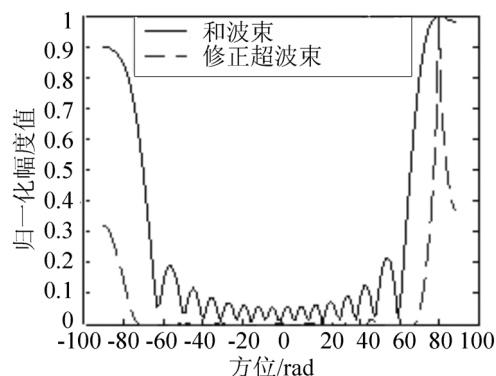


图8 端射方向时, 普通波束形成和修正超波束指向性($n=0.5$)

Fig. 8 Beam patterns of sum beam and modified hyper beam with signal in the end-fire direction ($n=0.5$)

3.2 仿真试验 2

16 元等间隔线列阵, 入射信号为 HFM, 中心频率 $f_c=3000\text{Hz}$, 带宽 $B=1000\text{Hz}$, 基元采样频率 $f_s=20\text{kHz}$, 可得端射与侧射方向 $\theta=80^\circ$ 匹配滤波后指向性图案如图 9、图 10 所示。仿真结果表明, 修正超波束技术对宽带信号同样适用, 即改善了波束指向性图案的主瓣宽度与主副比。

当各基元接收信号信噪比 $SNR=-30.5\text{dB}$ 时, 目标方向波束匹配滤波后的输出结果如图 11 所示。其中, 图 11(a)为传统方法处理结果, 图 11(b)为修正超波束方法处理后结果, 对比两幅图可知, 修正

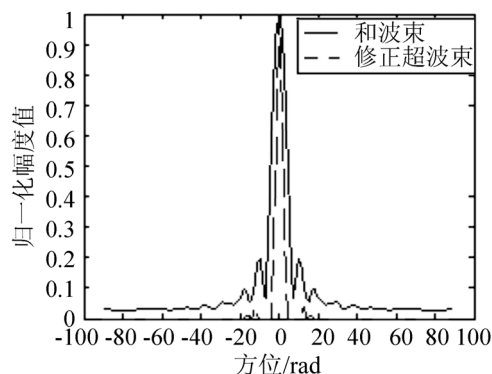


图9 目标位于侧射方向时, 普通波束形成和修正超波束指向性

Fig.9 Beam patterns of sum beam and modified hyper beam with signal in the lateral direction

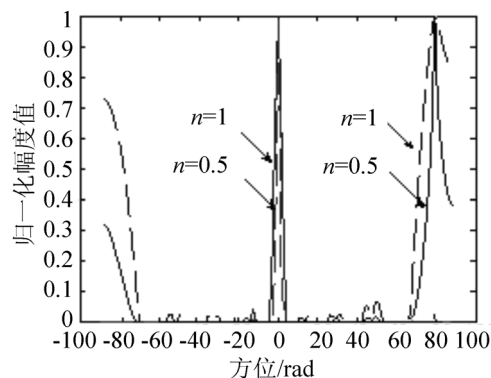


图10 目标位于侧射与端射方向时, 修正超波束指向性

Fig.10 Beam patterns of modified hyper beams with signal in the lateral and end-fire directions

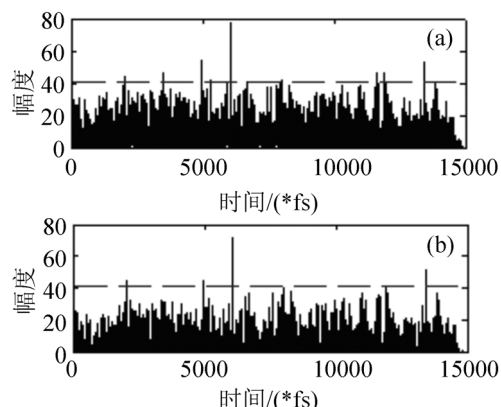


图11 (a) 传统方法匹配滤波输出; (b) 修正超波束方法匹配滤波输出; 输入 $SNR = -28.0\text{dB}$ (基元接收端)

Fig.11 (a) traditional matched filter result; (b) processed result. $n=1$, input $SNR = -28.0\text{dB}$ (基元接收端)

超波束方法可有效降低系统的虚警概率。

4 结 论

本文对传统的超波束技术予以修正, 在不增加系统阵列孔径前提下, 将超波束非线性运算和后处理算法相结合, 提高了系统的定向精度。仿真结果表明, 修正的超波束方法在基本不增加运算复杂度的情况下, 有效减小了波束指向性图案的主瓣宽度, 改善了主副比, 提高了系统的检测增益, 降低了虚警概率, 对精确目标定位具有很好的实用价值。

参 考 文 献

- [1] Van Trees H L. Optimum array processing[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [2] 徐小哲, 孙超. 基于波束域相干信号子空间法的宽带源小尺度基阵定向[J]. 声学技术, 2005, 24(4): 245-249.
XIU Xiaozhe, SUN Chao. Direction of arrival estimation of wide band sources with small array based on beam-space coherent signal-subspace method[J]. Technical Acoustics, 2005, 24(4): 245-249.
- [3] Schlieter H. Passive sonar detection improvement by hyper beam technique[A]. UDT, Europe 2006[C]. Hamburg, Germany, 2006: 7A-2.
- [4] Schlieter H, Eigenbrod H. 2D-hyperbeam patents [P]. European Patent: EP 0882 244 B1, 2003.