

改进的超波束形成算法探讨及性能研究

曹阳阳^{1,2}, 王萍³, 耿明昕⁴

(1. 中国科学院上海高等研究院, 上海 201210; 2. 中国科学院大学, 北京 100190;
3. 上海美多通信设备有限公司, 上海 200333; 4. 陕西电力科学研究所, 陕西西安 710054)

摘要: 为进一步提高超波束形成(Hyper Beam Forming, HBF)算法的性能, 在传统的 HBF 基础上提出一种改进的 HBF(Improved Hyper Beam Forming, Im-HBF)算法。将基于半阵指向性函数高阶运算修正到基于全阵指向性函数的高阶运算。仿真结果表明, Im-HBF 算法具有更窄的主瓣, 并且对端射来波信号栅瓣抑制能力更强, 进一步提高了对目标的检测能力。同时, Im-HBF 算法对指数 n 具有更为广泛的适用性, 当指数 $n>2$ 时也能获得优于常规波束形成(Conventional Beam forming, CBF)的波束性能。

关键词: 改进超波束; 主旁瓣比; 主瓣宽度; 波束锐化

中图分类号: B845.2 Q62

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2016)-05-0463-04

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2016.05.014

Research on the improved hyper beamforming algorithm and its performance analysis

CAO Yang-yang^{1,2}, WANG Ping³, GENG Ming-xin⁴

(1. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Science, Shanghai 201210, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3. Shanghai Metto Electronic Service Co. Ltd, Shanghai 200333, China;
4. Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: In order to achieve greater performance of hyper beamforming algorithm, this paper proposes an Improved Hyper Beam Forming (Im-HBF) method based on the higher order operation of whole array instead of half array. Simulation results show that the Im-HBF method can get greater reduction of beam width and grating lobe and better detection performance. The Im-HBF method can be satisfied with the index of n in generalize, although the index of $n>2$ also could get better performance than Conventional Beam forming (CBF).

Keywords: Improved Hyper Beam Forming (Im-HBF); the ratio of main lobe; the width of main beam forming; beam sharpening

0 引言

超波束算法(Hyper Beam Forming, HBF)^[1-6]通过左、右子阵波束输出构建“和波束”与“差波束”, 利用“和波束”与“差波束”的抵消原理, 同时获得窄主瓣和低旁瓣, 进而提高对目标的检测能力并实现精确定向。

本文在传统的 HBF 算法基础上, 提出了一种改进的 HBF 算法(Im-HBF), 将基于半阵波束输出的 HBF 高阶次运算修正为基于全阵波束输出 HBF 高阶次运算。对所提出的 Im-HBF 算法进行了仿真,

并与传统 HBF 算法性能进行了比较。

1 HBF 基本原理

1.1 HBF 基本原理

如图 1 所示, 设阵元间距为半波长的 N 元线列阵, 将接收阵分成两个对称的左、右子阵, 以 1 号基元为参考, 左、右子阵对应的分裂阵波束的表达式记为 R_l 和 R_r 。根据 HBF 的定义, 其“和波束” R_s 与“差波束” R_d 的表达式分别为:

$$R_s = |R_l| + |R_r| \quad (1)$$

$$R_d = |R_l - R_r| \quad (2)$$

超波束一般表达式为^[1-2]

$$R_H = (R_s^n - R_d^n)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

式中: n 为超波束的指数, 通过调节 n 可获得不同

收稿日期: 2015-12-10; 修回日期: 2016-02-22

作者简介: 曹阳阳(1990—), 女, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 研究方向为阵列信号处理。

通讯作者: 曹阳阳, E-mail: caoyy@sari.ac.cn

波束宽度的波束输出，通常取 $0.3 < n < 1$ ，并且随着 n 的减小，HBF 的束宽急剧减小。

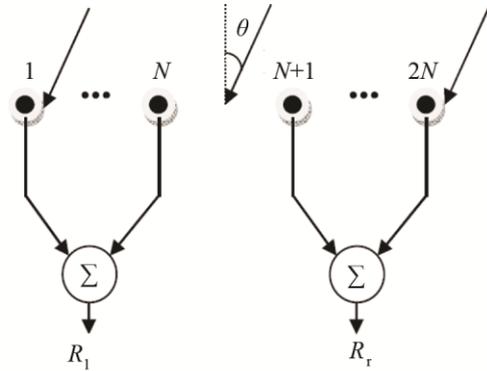


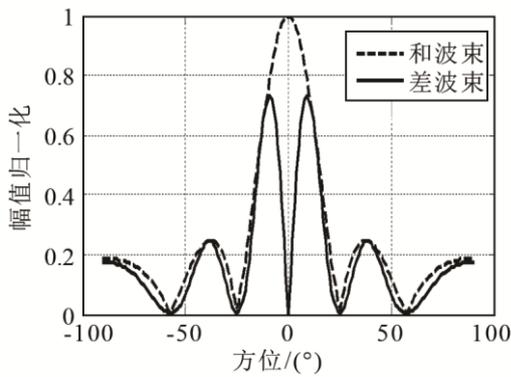
图 1 线列阵分裂波束示意图
Fig.1 The sketch of split beam forming of a linear array

1.2 HBF 性能仿真

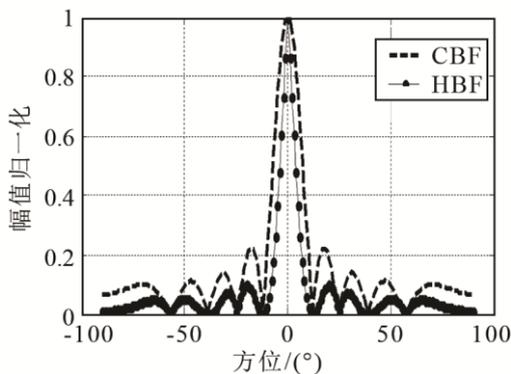
对 10 阵元半波长线列阵进行仿真，结果如图 2 所示。

图 2(a)~图 2(c)中目标来波方位 $\theta=0^\circ$ ；图 2(d)中目标来波方位 $\theta=80^\circ$ ；图 2(e)双目标来波方位分别为 $\theta=[0^\circ, 30^\circ]$ ，输入信噪比相差 3 dB。

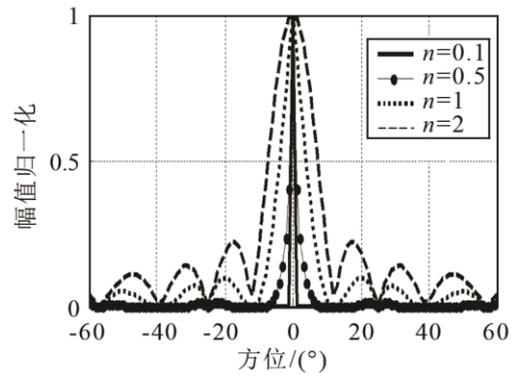
由图 2(a)可知，在预成主波束方向上，“和波束”最大，“差波束”最小，但两者的旁瓣位于相同的方位上，因此可以通过相减获得旁瓣抵消和窄波束的输出。图 2(b)验证了 HBF 的特性。由图 2(c)



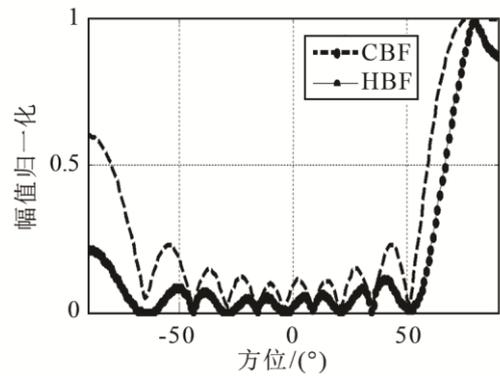
(a) 和波束与差波束的输出



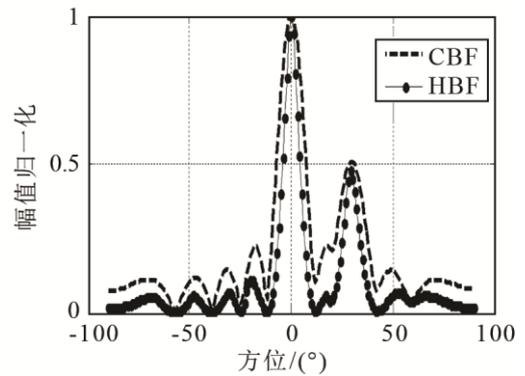
(b) HBF 与 CBF 波束性能比较



(c) 不同指数下的 HBF 输出



(d) 端射来波的波束输出



(e) 双目标的波束输出

图 2 HBF 性能仿真

Fig.2 The simulation of hyper beamforming

可知，随着 n 的减小，HBF 的主波束宽度和旁瓣级同时减小。表 1 给出了不同指数下的 HBF 参数列表。由图 2(d)可知，对于端射来波信号，HBF 可以给出更为精确的来波方位估计，并对栅瓣具有一定

表 1 HBF 的主要参数列表
Table 1 The main parameters of HBF

指数 n	-3 dB 波宽/(°)	第一旁瓣方位/(°)	主旁瓣比/dB
2	10.6	18	13
1	4.4	20	20
0.5	0.8	22	33
0.1	0.1	/	∞

的抑制能力。由图 2(e)可知，对于双目标 HBF 也具有较好的估计特性，且不改变相对信噪比。

2 Im-HBF 算法

2.1 HBF 的数学推导

如图 1 所示，设阵元间距为半波长的 N 元线列阵，目标方位为 θ ，相邻阵元接收的信号相位差为 ϕ ，预成波束方位为 θ_0 ，相邻阵元插入相移为 ϕ_0 。忽略接收信号 $s(t)$ ，以 1#基元作为参考，左右子阵对应的分裂阵波束的表达式 R_l 和 R_r 分别为：

$$R_l = \sum_{k=0}^{N/2-1} e^{jk(\phi-\phi_0)} = \frac{\sin \frac{N(\phi-\phi_0)}{4}}{\sin \frac{(\phi-\phi_0)}{2}} \cdot \frac{e^{j\frac{N(\phi-\phi_0)}{4}}}{e^{j\frac{(\phi-\phi_0)}{2}}} \quad (4)$$

$$R_r = \sum_{k=N/2}^{N-1} e^{jk(\phi-\phi_0)} = e^{jN(\phi-\phi_0)/2} R_l \quad (5)$$

将式(4)、(5)代入式(3)，可得 HBF 的输出：

$$R_H = 2R_l \left[1 - \sin^n \frac{N(\phi-\phi_0)}{4} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

2.2 Im-HBF 算法的基本原理

为了更符合期望的波束指向性图，这里定义广义 Hyperbeam 为

$$R_H = F(R_S, R_D, n) \quad (7)$$

式中， $F(\cdot)$ 为映射关系。由于左右子阵包络相同，只差一个相位因子，易知 $R_S = 2|R_l|$ ，式(7)可简化为 $R_H = F(R_l, n)$ 的函数。

HBF 的本质是以半阵指向性函数 R_l 为基础的指向性函数，按照方位自动选出不同的权因子来实现波束锐化，波束方位越靠近目标方向，则权因子越大，远离目标方位后权因子迅速减小，并周期震荡。子波束 R_l 本身并不具备很高的方位分辨力。

权因子 $(1-x^n)^{1/n}$ ， $|x| \leq 1$ 是 n 的高阶次运算，当 $n \leq 1$ 时，权因子快速下降，使 R_H 获得窄主瓣、低旁瓣的特性；随着 n 的增大，权因子衰减减慢，当 $n=2$ 时， R_H 与 CBF 输出相同；当 $n > 2$ 时，以 R_l 为基础的指向性函数的 R_H 的性能就会差于 CBF，是传统的 HBF 对 n 的取值范围具有一定局限性的原因。

为实现更为一般意义上的 HBF 技术，本文将“和波束” R_S 修正为全波束指向性函数的输出：

$$R'_S = |R_l + R_r| \quad (8)$$

根据上述模型，则 Im-HBF 为

$$R'_H = F(R'_S, R_D, n) \quad (9)$$

改进 R'_H 以全波束指向性函数 R'_S 为基础的函数，权因子不变，因此仍保留传统的 HBF 窄主瓣、

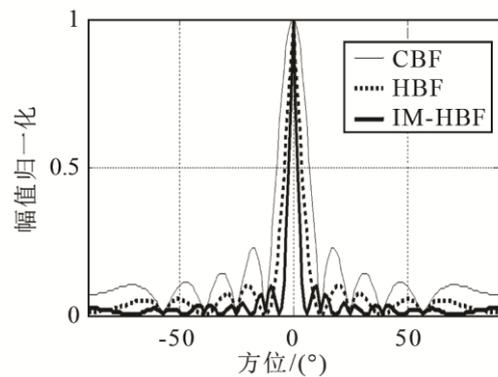
低旁瓣的特性。并且基础函数 R'_S 具有比 R_l 更窄的主瓣，因此 Im-HBF 的波束主瓣也将更窄。

同样，随着 n 的增大，权因子衰减减慢，Im-HBF 性能变差，当 $n \geq 2$ 时，以 R_l 为基础指向性函数的 Im-HBF 始终优于 CBF，并且随着 n 的增大，其性能逼近 CBF。

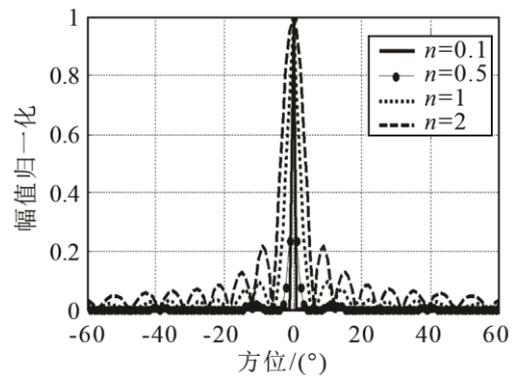
2.3 Im-HBF 的性能仿真

同样，对 10 阵元线列阵进行仿真，结果如图 3 所示。

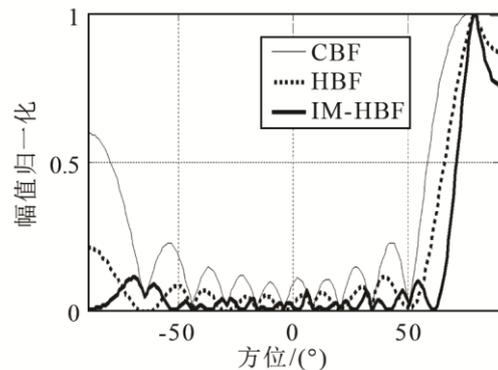
图 3(a)、图 3(b)中目标来波方位 $\theta=0^\circ$ ；图 3(c)中目标来波方位 $\theta=80^\circ$ ；图 3(d)中双目标来波方位



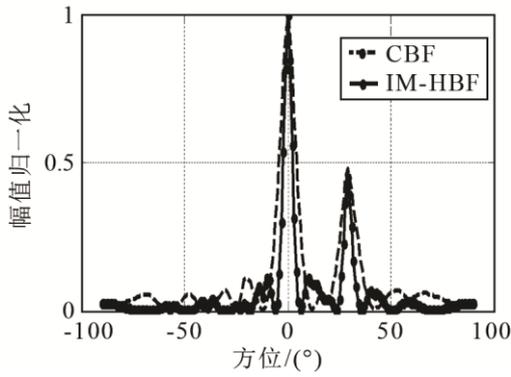
(a) 波束性能比较



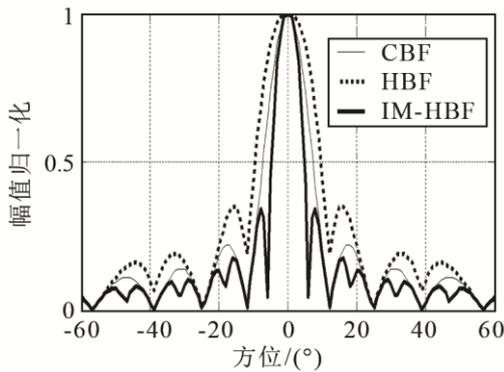
(b) 不同指数下的 Im-HBF 输出



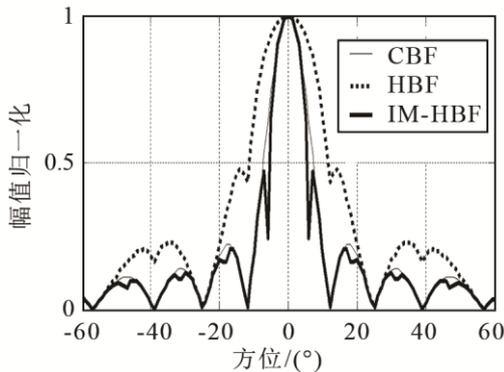
(c) 端射来波的波束输出



(d) 双目标的波束输出



(e) 指数 $n=4$ 波束输出



(f) 指数 $n=10$ 波束输出

图 3 Im-HBF 的性能仿真

Fig.3 The simulation of the improved hyper beamforming

分别为 $\theta=[0^\circ, 30^\circ]$, 输入信噪比相差 3 dB; 图 3(e) 为超波束指数 $n=4$ 时的波束输出; 图 3(f) 为超波束指数 $n=10$ 时的波束输出。

HBF 的主波束宽度和旁瓣级同时减小。表 2 给出不同指数下的 Im-HBF 参数列表; 对于端射来波信号, 由图 3(c) 仿真结果可见 Im-HBF 基本无栅瓣; 由图 3(d) 可见对于双目标入射, Im-HBF 也不改变输入相对信噪比。图 3(e) 验证了当 $n \geq 2$ 时, 以半波束指向性函数为基础的传统 HBF 其性能差于

CBF, 而 Im-HBF 受 n 值影响较小, 随着 n 的增大, 其性能接近于 CBF。

表 2 Im-HBF 主要参数列表
Table 2 The main parameters of Im-HBF

指数 n	-3 dB 波宽/(°)	第一旁瓣方位/(°)	主旁瓣比/dB
2	5.2	9	13
1	2.2	10	20
0.5	0.4	11	33
0.1	/	/	∞

3 结 论

本文在传统 HBF 算法基础上, 将基于半阵指向性函数高阶运算修正到基于全阵指向性函数的高阶运算, 提出了一种 Im-HBF 算法。该算法在相同的指数 n 下, 具有更窄的主瓣并且对端射来波信号栅瓣抑制能力更强, 进一步提高了对目标的检测能力。同时, 对于传统 HBF, 指数 $n > 2$ 时其波束性能差于 CBF; Im-HBF 对指数 n 具有更为广泛的适用性, 当指数 $n > 2$ 时也能获得优于 CBF 的波束性能, 随着指数 n 的增大, 其性能逼近 CBF。

Im-HBF 基于传统 HBF 算法, 因此其适用范围与传统 HBF 相同, 不仅适用于线列阵, 还适用于圆阵、平面阵、圆柱阵等阵列结构, 具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Schlieter H. Passive sonar detection improvement by hyper beam technique[C]// UDT, Europe, 2006, Hamburg, Germany, 2006: 7A. 2
- [2] Schieter H, Eigenrod H. 2D-hyperbeam patents: Europe, EP 0882 244 B1[P]. 2003.
- [3] HU Q, HAO B A, YI H, et al. Research on the passive detection model based on 3D-HBF and FSVDD for Underwater high-speed small targets and its application[C]//Advanced Materials Research. 2011, 317: 1282-1288.
- [4] 聂良春. 超波束(HBF)用于波束锐化[J]. 声学技术, 2008, 27(6): 892-895.
NIE Liangchun. Hyper Beam forming (HBF) technique for beam narrowing[J]. Technical Acoustics, 2008, 27(6): 892-895.
- [5] 王昭辉, 刘云涛, 蔡惠智. 基于修正超波束技术的精确定向算法探讨[J]. 声学技术, 2009, 28(5): 651-654.
WANG Zhaohui, LIU Yuntao, CAI Huizhi. Research on the algorithms of accurate bearing estimation based on modified hyper-beam technique[J]. Technical Acoustics, 2009, 28(5): 651-654.
- [6] 王永丰, 王昭辉. 超波束处理方法的快速实现及试验验证[J]. 声学技术, 2012, 31(5): 522-525.
WANG Yongfeng, WANG Zhaohui. Fast implementation of hyper beam method and its performance evaluation[J]. Technical Acoustics, 2012, 31(5): 522-525.