

主瓣干扰下宽带圆阵自适应波束形成方法

覃岭¹, 黄茜², 李会勇², 何子述²

(1. 总参57所 成都 610041; 2. 电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】在宽带自适应波束形成中,若干扰信号从主瓣进入,往往引起主瓣畸变且副瓣电平增高,波束性能严重恶化。随着圆型阵列的广泛应用,该文针对均匀圆阵的宽带波束形成,合理地构造出阻塞矩阵,对主瓣干扰进行干扰相消预处理,再进行自适应波束形成,解决了主瓣畸变问题,提高了自适应波束的性能。结合均匀分布圆阵所作的计算机仿真验证了该方法的有效性。

关键词 自适应波束形成; 宽带; 圆阵; 干扰相消

中图分类号 TN958.92

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.010

Adaptive Broadband Beamforming of Circular Array Under Main Lobe Interference Condition

QING Lin¹, HUANG Qian², LI Hui-yong², and HE Zi-shu²

(1. The 57th Institute of the General Staff Chengdu 610041;

2. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract The main lobe interference usually causes the distortion of the main lobe and the increase of the side-lobe level in adaptive broadband beamforming. Circular arrays have been applied popularly for its wide scan range. A reasonable blocking matrix of uniform circular array is constructed for broadband beamforming to cancel the main lobe interference. The simulation verifies the effectiveness of the proposed method in avoiding the main lobe distortion.

Key words adaptive digital beam forming; broadband; circular array; interference cancellation

宽带自适应波束形成技术在雷达、通信、声纳等领域有着广泛的应用价值^[1-4]。文献[5]提出了MVDR波束形成方法在线性约束最小方差准则下,得到信号的同时抑制了干扰。但是,当干扰从主瓣进入时,该方法不能有效地工作,自适应波束形成出现主瓣畸变和旁瓣电平抬升,严重影响了自适应波束形成性能。文献[6]针对窄带信号在均匀线阵情况下,提出了一种解决该方法的方法。文献[7]把文献[6]中的方法应用到宽带信号的弱信号DOA估计中,但都是针对均匀分布线阵的应用,没有对其他阵列进行推导。圆阵的波束扫描范围能够达到360°,得到了广泛应用^[8-10],并且,圆阵是共形阵的基础阵型,对圆阵的研究具有重要意义^[11-15]。本文就均匀分布圆阵的宽带自适应波束形成,重新构造了文献[7]中的阻塞矩阵,有效地消掉主瓣干扰后再进行MVDR自适应波束形成。

1 宽带信号模型

假设一半径为 R 的圆阵上均匀分布了 M 个全向阵元。第 m 个阵元的方位角为 $\psi_m = 2m\pi/M$, D 个宽带源信号和宽带干扰为远场平面波,并具有相同的带宽 B 和中心频率 f_0 ,噪声为相互独立的零均值高斯白噪声,且与信号不相关,方差为 σ_n^2 ,与源信号具有相同的带宽。对持续时间 T_a 上的阵列输出数据向量 $\mathbf{x}(t)$,经过快速离散傅里叶变换(FFT)分解为 J 个互不重叠的窄带部分。在 f_j 子频带上的数据向量为:

$$\mathbf{X}(f_j) = \mathbf{A}(f_j) \cdot \mathbf{S}(f_j) + \mathbf{N}(f_j) \quad j=1, 2, \dots, J \quad (1)$$

式中 f_j 为第 j 个子带的中心频率; $\mathbf{X}(f_j)$ 为 $M \times 1$ 子带接收信号向量; $\mathbf{S}(f_j)$ 为信号在第 j 个频带的谱分量; $\mathbf{N}(f_j)$ 为 $M \times 1$ 的向量,表示噪声在 f_j 处的谱分量; $\mathbf{A}(f_j) = [\mathbf{a}(\varphi_1, \theta_1, f_j), \mathbf{a}(\varphi_2, \theta_2, f_j), \dots, \mathbf{a}(\varphi_D, \theta_D, f_j)]$ 为 f_j 子频带内信号的方向矩阵; $\mathbf{a}(\varphi_i, \theta_i,$

收稿日期: 2008-03-25; 修回日期: 2008-06-11

基金项目: 部级基金

作者简介: 覃岭(1965-),男,博士生,主要从事阵列信号处理、通信系统等方面的研究。

$f_j) = [e^{-2\pi R(f_j/c)\sin\theta_i\cos(\varphi_i-\psi_i)}, \dots, e^{-2\pi R(f_j/c)\sin\theta_i\cos(\varphi_i-\psi_M)}]$;
 φ_i 、 θ_i 分别为第*i*个信号的入射方位角和仰角,
 $i=1, 2, \dots, D$, D 为信号源个数即期望信号和干扰
 的总个数。

2 干扰相消预处理

首先用常规DOA估计算法对主瓣干扰进行方向估计。假设只有一个主瓣干扰,估计出干扰的到来角 (φ_l, θ_l) 后,就可以对接收数据 \mathbf{X} 进行干扰相消预处理。构造阻塞矩阵为:

$$\mathbf{B}(f_j) = \begin{bmatrix} 1 & -e^{j(u_{l,2}-u_{l,1})} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -e^{j(u_{l,3}-u_{l,2})} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -e^{j(u_{l,(M-1)}-u_{l,(M-2)})} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & -e^{j(u_{l,M}-u_{l,(M-1)})} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 $u_{l,m} = 2\pi R \frac{f_j}{c} \sin\theta_l [\cos(\varphi_l - \psi_m)]$; $\mathbf{B}(f_j)$ 为
 $(M-1) \times M$ 维的预处理阻塞矩阵,它利用干扰信号
 在相邻天线单元上引起的相差来抑制主瓣干扰。设
 处理后的数据为 \mathbf{Y} ,有:

$$\mathbf{Y}(f_j) = \mathbf{B}(f_j)\mathbf{X}(f_j) \quad (3)$$

可以证明,阻塞矩阵有效地抑制了主瓣干扰。设预
 处理变换前,第*m*个天线单元的接收信号为:

$$x_m(f_j) = \sum_{i=1}^D s_i(f_j)e^{-ju_{im}} + n_m(f_j) \quad (4)$$

根据式(3)的预处理后得到变换后的信号为:

$$y_m(f_j) = \sum_{i=1}^D \bar{s}_i(f_j)e^{-ju_{im}} + \bar{n}_m(f_j) \quad (5)$$

式中 $\bar{s}_i(f_j) = s_i(f_j)[1 - e^{-j(u_{i,(m+1)}-u_{i,m}-(u_{l,(m+1)}-u_{l,m}))}]$;

$u_{i,m} = 2\pi R \frac{f_j}{c} \sin\theta_i [\cos(\varphi_i - \psi_m)]$; $m=0, \dots, M-1$;

$\bar{n}_{m,k}(f_j)$ 为高斯白噪声。比较式(4)和式(5)可以看出,
 预处理变换改变了信号的复包络,但不改变信号的
 波达方向,并且对于主瓣干扰,其复包络 $\bar{s}_i(f_j)$ 等
 于零。因此,预处理有效地抑制了强干扰,不会影
 响后续波束形成的处理。

3 聚焦宽带波束形成

首先采用文献[16]中的一致聚焦方法求解聚焦
 矩阵。对于给定的频段 f_j 及参考频段 f_c 存在一个共
 同的聚焦变换 $\mathbf{T}(f_j)$,使得对于任意角集
 $(\varphi, \theta) \subseteq \Phi_N = \{(\varphi_1, \theta_1), (\varphi_2, \theta_2), \dots, (\varphi_N, \theta_N)\}$,有:

$$\mathbf{T}(f_j)\mathbf{C}(f_j, \varphi, \theta) = \mathbf{C}(f_c, \varphi, \theta) \quad j=1, 2, \dots, J \quad (6)$$

式中 $\mathbf{T}(f_j)$ 为一致聚焦变换; $\mathbf{C}(f_j) = \mathbf{B}(f_j)\mathbf{A}(f_j)$,
 为 $(M-1) \times D$ 维;方向角度集合 Φ_N 称为一
 致角集, N 为该集合的元素个数。由于式(6)在实
 际求解中只能是约等于,所以求解式(6)即为求下面方
 程的极小范数最小二乘解,即:

$$\mathbf{T}(f_j) = \min \|\mathbf{T}(f_j)\mathbf{C}(f_j) - \mathbf{C}(f_c)\|_F \quad (7)$$

式中 $\|\cdot\|_F$ 为Frobenius矩阵范数。可得:

$$\hat{\mathbf{T}}(f_j) = \mathbf{C}(f_c)\mathbf{C}^+(f_j) \quad (8)$$

式中上标“+”代表矩阵的M-P广义逆。实际估
 计中,到达角 (φ, θ) 可以用覆盖整个估计角度范围
 的大量已知离散角的集合来逼近。

聚焦后的数据为:

$$\mathbf{Y}(f_j) = \hat{\mathbf{T}}(f_j)(\mathbf{B}(f_j)\mathbf{X}(f_j)) \quad (9)$$

对该数据采用MVDR方法进行波束形成,变换
 后的信号协方差矩阵为:

$$\mathbf{R}_Y = E[\mathbf{Y}(f_j)\mathbf{Y}^H(f_j)] \approx$$

$$\frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \mathbf{T}(f_j)\mathbf{B}(f_j)\mathbf{X}(f_j)\mathbf{X}^H(f_j)\mathbf{B}^H(f_j)\mathbf{T}^H(f_j) \quad (10)$$

根据MVDR算法,可求得波束形成最佳权向量为:

$$\mathbf{w}_{\text{opt}}(f_c) = \frac{\mathbf{R}_Y^{-1}\mathbf{a}(\varphi_s, \theta_s, f_c)}{\mathbf{a}^H(\varphi_s, \theta_s, f_c)\mathbf{R}_Y^{-1}\mathbf{a}(\varphi_s, \theta_s, f_c)} \quad (11)$$

式中 φ_s 和 θ_s 分别为期望信号到达方向的方位角
 和仰角。

对于存在主瓣干扰的宽带波束形成,可以采用
 如图1所示的处理流程。



图1 存在主瓣干扰时的宽带波束形成处理流程

4 仿真实验及结论

考虑一直径100 m的圆形阵列,均匀分布了10
 个各向同性的阵元,整个阵列的扫描范围可达360°;

目标宽带信号从160°方位角、45°仰角入射, 信噪比0 dB; 信号带宽2 MHz, 中心频率4 MHz; 两个干扰信号分别从135°方位角、45°仰角和170°方位角、45°仰角入射, 干噪比各为30 dB、40 dB; 干扰信号、噪声的频率范围和所需入射信号一致, 阵列接收到的信号通过FFT变换分解为512个子带。图2所示为不经过干扰相消预处理, 直接采用MVDR的宽带波束图。图2a所示为三维图, 图2b所示在最高频率点为5 MHz、最低频率点为3 MHz、中心频率点为4 MHz处的截面图。图2是将135°方位角的主瓣干扰经过上述干扰相消预处理后得到的波束图。

将参考频率点处的权向量用在各个频点处, 得到图3a所示的三维图。图3b所示最高频率点为5 MHz、最低频率点为3 MHz、参考频率点为4 MHz处的截面图。对比图2和图3可看出, 对主瓣干扰进行干扰相消预处理后, 能有效地进行自适应波束形成, 解决了主瓣畸变的问题。

实验证明, 虽然预处理进行干扰相消时增加了数据计算量, 但采用阻塞矩阵能有效地在圆阵上进行宽带自适应波束形成。当然, 还可以在该算法上进行修正, 进而降低旁瓣电平, 用在其他更普遍的阵列上。

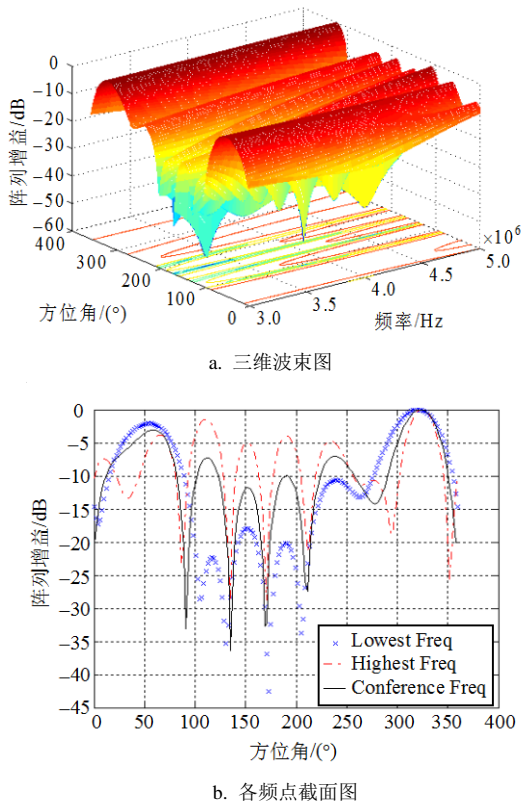


图2 直接采用MVDR方法形成的波束图

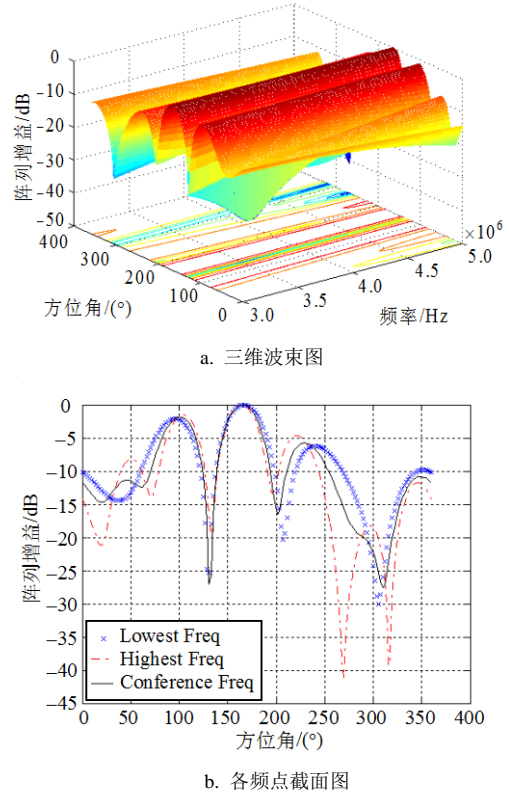


图3 经干扰相消预处理后的波束图

参 考 文 献

[1] MOHAMAD G. Wideband smart antenna theory using rectangular array structures[J]. IEEE Tran on Signal Processing, 2002, 50(9): 2143-2151.

[2] 王杰贵. 应用于雷达电子战系统的宽带DBF技术[J]. 航天电子对抗, 2006, 22(5): 39-41. WANG Jie-gui. Wideband DBF applicated in radar EW system[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2006, 22(5): 39-41.

[3] ZHENG Sheng-hua, XU Da-zhuan, JIN Xue-ming. A novel receiver architecture for DBF antenna array[J]. Journal of Electronics Science Technology of China, 2007, 5(1): 33-37.

[4] 吴曼青. 数字阵列雷达及其进展[J]. 中国电子科学学报, 2006, 1(1): 11-16. WU Man-qing. The development of digital array radar[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2006, 1(1): 11-16.

[5] CAPON J. High-resolution frequency-wave number spectrum analysis[J]. Proc IEEE, 1969, 57: 1408-1418.

[6] 李荣锋, 王永良, 万山虎. 一种在主瓣干扰条件下稳健的自适应波束形成方法[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(7): 61-64. LI Rong-feng, WANG Yong-liang, WAN Shan-hu. Robust adaptive beam forming under main lobe interference conditions[J]. Systems Engineering and Electronics, 2002, 24(7): 61-64.

[7] 王 姝, 何子述, 李会勇. 宽带强干扰背景下的弱信号源DOA估计方法[J]. 现代雷达, 2005, 28(9): 69-71.

- WANG Shu, He Zi-shu, LI Hui-yong. Estimation of DOA for broadband weak signal source in broadband strong interference background[J]. *Modern Radar*, 2005, 28(9): 67-71.
- [8] IOANNIDES P, BALANIS C A. Wideband beamforming using circular arrays[C]//Antennas and Propagation Society International Symposium. Monterey CA, USA: IEEE, 2004.
- [9] WAX M, SHEINVALD J. Direction finding of coherent signals via spatial smoothing for uniform circular arrays[J]. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 1994, 42(5): 613-620.
- [10] 石磊, 郝保安, 王明洲. 鱼雷共形阵自适应宽带恒定束宽波束形成研究[J]. *鱼雷技术*, 2006, 14(2): 30-31.
- SHI Lei, HAO Bao-an, WANG Ming-zhou. Research on adaptive broadband constant beamwidth beamforming of conformal array of torpedo[J]. *Torpedo Technology*, 2006, 14(2): 30-31.
- [11] XU Di-hua, CHEN Jian-wen. A novel DOA estimation for uniform circular arrays in correlated environment without interpolation[C]//ISPACS2006, [S.l.]: IEEE, 2006.
- [12] CLAUDIO E D D. Asymptotically perfect wideband focusing of multiring circular arrays[J]. *IEEE Trans Signal Process*, 2005, (10): 3661-3673.
- [13] LAUH B K, LEUNG Y H, LIU Y, et al. Transformations for nonideal uniform circular arrays operating in correlated signal environments[J]. *IEEE Trans Signal Process*, 2006, 54(1): 34-48.
- [14] HERSEY R K, MELVIN W L. Adaptive conformal array radar[C]//Radar Conference. [S. l.]: IEEE, 2004.
- [15] WANG H, KAVEH M. Coherent signal-subspace processing for the detection and estimation of angles of arrival of multiple wideband sources[J]. *IEEE Trans Acoust, Speech and Signal Processing*, 1985, 33: 823-831.
- [16] 雷中定, 黄绣坤. 宽带相干源波达方向估计的新方法[J]. *通信学报*, 1998, 19(2): 14-19.
- LEI Zhong-ding, HUANG Xiu-kun. A new method for wideband DOA estimates[J]. *Journal of China Institute of Communications*, 1998, 19(2): 14-19.

编辑 税红

(上接第340页)

- [2] FOSCHINI G J, GANS M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas[J]. *Wireless Personal Commun*, 1998, 6(3): 311-335.
- [3] MOLISCH A F, WIN M Z, Winters J H. Capacity of MIMO systems with antenna selection[C]//IEEE ICC. Finland: IEEE, 2001.
- [4] GORE D A, PAULRAJ A J. MIMO antenna subset selection with space time coding[J]. *IEEE Trans Signal Processing*, 2002, 50(10): 2580-2588.
- [5] YANG Hai-fen, LI Guang-jun, XIONG Yong, et al. Combining space time turbo trellis codes with transmit antenna selection[C]//IEEE ICCAS. Hongkong, China: IEEE, 2005: 275-278.
- [6] CHEN Z. Asymptotic performance of transmit antenna selection with maximal-ratio combining for generalized selection criterion[J]. *IEEE Commun Letters*, 2004, 8(4): 247-249.
- [7] XIAO L, DONG X. Error performance of selection combining and switched combining systems in Rayleigh fading channels with imperfect channel estimation[J]. *IEEE Trans Vehicular Tech*, 2005, 54(6): 2054-2065.
- [8] ZHUANG M, LIN B. Performance analysis of alamouti-scheme with imperfect multiple transmit antennas selection in Rayleigh fading channel[C]//IEEE ISAPE. [S.l.]: IEEE, 2006: 1-4.
- [9] 陈明, 朱近康. 非理想反馈链路下的发送天线选择系统性能分析[J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(2): 296-300.
- CHNE Ming, ZHU Jing-kang. Performance analysis of transmit antenna selection with imperfect feedback[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2007, 29(2): 296-300.
- [10] 庄铭杰, 陈如山. 信道差错对多发天线选择性能的影响[J]. *电波科学学报*, 2007, 22(4): 652-658.
- ZHUANG Ming-jie, CHEN Ru-shan. Effects of erroneous channel state information on performance of multiple transmit antennas selection[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2007, 22(4): 652-658.
- [11] MA Q, TEPEDELENLIOGLU C. Antenna selection for space-time coded systems with imperfect channel estimation[J]. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2007, 6(2): 710-719.
- [12] YOU R, HONG Li, BAR-NESS Y. Diversity combining with imperfect channel estimation[J]. *IEEE Trans Commun*, 2005, 53(10): 1655-1662.
- [13] PROAKIS J G. *Digital communications*[M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1995.
- [14] DAVID H A, NAGARAJA H N. *Order statistics*[M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 2003.
- [15] WANG Z, GIANNAKIS G B. A simple and general parameterization quantifying performance in fading channels[J]. *IEEE Trans Commun*, 2003, 51(8): 1389-1398.

编辑 漆蓉