

虚拟信源直接数据域高分辨算法

幸高翔, 朱杰

(海军工程大学电子工程学院电子工程系, 武汉 430033)

摘要: 目标高分辨算法的性能优劣直接影响声纳、雷达的目标感知能力。考虑基于空间平滑思想的直接数据域算法, 在干扰方向产生稳定的零陷。虚拟出期望信号并加入到接收数据中, 将实际目标当作干扰, 通过直接数据域自适应的方法在实际目标方向产生零陷: 在波束图的左半部分适当位置虚拟一个期望信号, 得到 $0^\circ\sim 90^\circ$ 的零陷分布图, 在右半部分适当位置虚拟一个期望信号, 得到 $-90^\circ\sim 0^\circ$ 的零陷分布图, 将这两部分零陷图组合后, 取倒数得到实际功率谱图。该方法可以在单快拍、未知目标信号先验信息的情况下得到稳定、高分辨力的目标方位估计, 并能够处理相干信号。仿真分析验证了算法的正确性和良好性能。

关键词: 直接数据域; 空间平滑; 零陷; 高分辨

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2011)-05-0449-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2011.05.015

High resolution algorithm based on direct data domain method

XING Gao-xiang, ZHU Jie

(Dept. of Electronics Engineering, Electronics Engineering College, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The performance of high resolution algorithms influences the ability of detecting targets for sonar and radar. In this paper, the direct data domain approach with spatial smoothing is studied, which generates nulls in the interference directions. The proposed approach regards real targets as the interferences via adding virtual desired signals to the received data to produce nulls in the real target directions, *i.e.* use a virtual desired signal in certain direction on the left-side of a beampattern to get a distribution of nulls in the direction of $0^\circ\sim 90^\circ$, use a virtual desired signal in certain direction on the right-side of a beampattern to get the distribution of nulls in the direction of $-90^\circ\sim 0^\circ$. Combining these two charts can get the final output power spectrum under the condition of one snapshot data without knowing sources *a priori*. The proposed approach can not only get stable high target resolution, but also dispose coherent signals. Numerical simulations verify the validity and capability of the proposed approach.

Key words: direct data domain(DDD); spatial smoothing(SS); null; high resolution

0 引言

由于现有以 MUSIC 算法^[1]为代表的基于子空间分解的高分辨算法在进行目标方位估计时, 将阵列输出协方差矩阵的特征向量分成两部分, 分别张成信号子空间和噪声子空间, 并利用两者相互正交的性质实现高分辨方位估计^[2,3]。此方法需要已知信源数目, 仅在大快拍数、高信噪比的情况下才能够获得良好的分辨效果, 且不能处理相干信号的分辨问题。

直接数据域方法是由 William A Gaidner^[4,5]首先提出来的, 只处理单快拍数据。利用相邻阵元之间

的相位差构造一个数据矩阵, 加以适当约束来求解权向量, 能够适用于非平稳的噪声背景^[6]。该方法在目标估计时, 有主波束宽、方位估计偏差较大的缺点, 因此不用于高分辨目标估计, 但能在已知期望信号的情况下在干扰方向生成稳定且深的零陷。

针对现有高分辨算法的局限性, 利用直接数据域方法可以在干扰方向生成稳定且深的零陷的特性, 本文基于空间平滑的直接数据域方法, 通过虚设两个期望信号, 将目标信号当作干扰, 求解自适应权向量, 在实际目标方向生成零陷。在波束图左半部分适当方位虚拟一个期望信号得到 $0^\circ\sim 90^\circ$ 零陷分布图, 在右半部分适当位置虚拟一个期望信号得到 $-90^\circ\sim 0^\circ$ 零陷分布图, 左右两部分组合后取倒数得到实际功率谱图。本文的高分辨算法克服了 MUSIC 算法的上述缺点, 且只需单快拍的数据, 具有稳定、高分辨力的优点。

收稿日期: 2010-07-07; 修回日期: 2010-10-26

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(No.613660202)资助

作者简介: 幸高翔(1978—), 男, 江西高安人, 博士, 研究方向为水下传感器阵列信号处理、信息融合。

通讯作者: 幸高翔, E-mail: nuexinggx@yahoo.com.cn

1 基于空间平滑直接数据域算法的基本原理

考察在空间传播的多个窄带信源，利用阵列对这些信号进行接收。由 N 个阵元组成均匀线列阵(图 1)，阵元间距为 d 。假设 M 个窄带信号由多个方向入射到阵列上，方向限制在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 的范围内。信号工作波长为 λ 。

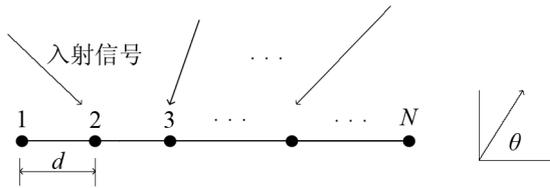


图 1 均匀线列阵
Fig.1 Sketch of a uniform linear array

向量 $\mathbf{x}(t)$ 表示在某一特定时刻 t 测得的阵列输出信号，可以表示为

$$\mathbf{x}(t)=[x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

式中， \mathbf{A} 为 $N \times M$ 的指向向量矩阵，可以表示为 $\mathbf{A}=[\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_M)]^T$ ，其中

$$\mathbf{a}(\theta_i)=[a_1(\theta_i), a_2(\theta_i), \dots, a_N(\theta_i)]^T = [1, e^{j2\pi d \sin \theta_i / \lambda}, \dots, e^{j2\pi d(N-1) \sin \theta_i / \lambda}]^T \quad (2)$$

向量 $\mathbf{s}(t)$ 表示在时刻 t 到达阵元的远场信号， $\mathbf{s}(t)=[s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)]^T$ ， $\mathbf{n}(t)$ 表示包含混响、孤立干扰和噪声的向量。由于在直接数据域方法中处理的是同一快拍的数据，故可省略 (t) 。假设第 n 个阵元上的输出信号为 x_n ，则有

$$x_n = \alpha \exp \left[j2\pi \frac{(n-1)d}{\lambda} \sin \theta_s \right] + \sum_{p=1}^P A_p \exp \left[j2\pi \frac{(n-1)d}{\lambda} \sin \theta_p \right] + n_n \quad (3)$$

式中： α 为信号的幅值； A_p 和 θ_p 分别为第 p 个干扰的幅度和波达方向； P 为干扰源个数， $P \leq (N-1)/2$ ； n_n 为噪声。定义 L 表示子阵数目，将接收的数据构造成 $L \times N-L+1$ 维的矩阵：

$$\mathbf{TX} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_{N-L+1} \\ x_2 & x_3 & \dots & x_{N-L+2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_L & x_{L+1} & \dots & x_N \end{bmatrix}_{L \times (N-L+1)} \quad (4)$$

对于均匀线列阵，相邻阵元之间的信号部分仅仅相差一个常量 $\exp(j2\pi d \sin \theta_s / \lambda)$ 。定义 $z = \exp(j2\pi d \sin \theta_s / \lambda)$ ，对上述矩阵进行处理，构造一个噪声矩阵：

$$\mathbf{TF} = \begin{bmatrix} x_1 - z^{-1}x_2 & x_2 - z^{-1}x_3 & \dots & x_{N-L+1} - z^{-1}x_{N-L+2} \\ x_2 - z^{-1}x_3 & x_3 - z^{-1}x_4 & \dots & x_{N-L+2} - z^{-1}x_{N-L+3} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{L-1} - z^{-1}x_L & x_L - z^{-1}x_{L+1} & \dots & x_N - z^{-1}x_{N-1} \end{bmatrix}_{(L-1) \times (N-L+1)} \quad (5)$$

同理，对数据矩阵 \mathbf{TX} 进行共轭处理，并形成一个逆向矩阵，也可以得到类似 \mathbf{TF} 的噪声矩阵，与上述噪声矩阵共同组成总的噪声矩阵：

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} x_1 - z^{-1}x_2 & x_2 - z^{-1}x_3 & \dots & x_{N-L+1} - z^{-1}x_{N-L+2} \\ x_2 - z^{-1}x_3 & x_3 - z^{-1}x_4 & \dots & x_{N-L+2} - z^{-1}x_{N-L+3} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{L-1} - z^{-1}x_L & x_L - z^{-1}x_{L+1} & \dots & x_N - z^{-1}x_{N-1} \\ x_N^* - z^{-1}x_{N-1}^* & x_{N-1}^* - z^{-1}x_{N-2}^* & \dots & x_L^* - z^{-1}x_{L-1}^* \\ x_{N-1}^* - z^{-1}x_{N-2}^* & x_{N-2}^* - z^{-1}x_{N-3}^* & \dots & x_{L-1}^* - z^{-1}x_{L-2}^* \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_L^* - z^{-1}x_{L-1}^* & x_{L-1}^* - z^{-1}x_{L-2}^* & \dots & x_2^* - z^{-1}x_1^* \end{bmatrix}_{2(L-1) \times (N-L+1)} \quad (6)$$

将 \mathbf{B} 每列当作一个向量 \mathbf{b}_i ，令 $\mathbf{B}=[\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \dots, \mathbf{b}_{2(L-1)}]$ ， $\mathbf{s}_L=[1, z^1, \dots, z^{N-L}]^T$ 。构造目标函数^[7]

$$\phi(\mathbf{w}) = \mathbf{w}^H \mathbf{w} + \sum_{k=1}^{2(L-1)} \beta_k \mathbf{w}^H \mathbf{b}_k + \gamma \mathbf{w}^H (\mathbf{s}_L - 1) \quad (7)$$

式中 γ, β_k 为待定参数，使目标函数最小权值为

$$\mathbf{w} = -\gamma \mathbf{s}_L - \sum_{k=1}^{2(L-1)} \beta_k \mathbf{b}_k \quad (8)$$

$$\begin{pmatrix} \mathbf{s}_L^H \mathbf{s}_L & \mathbf{s}_L^H \mathbf{B} \\ \mathbf{B}^H \mathbf{s}_L & \mathbf{B}^H \mathbf{B} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\gamma \\ -\beta \end{pmatrix} = \mathbf{u}_{2L-1} \quad (9)$$

式中 $\mathbf{u}_{2L-1}=[1, 0, 0, \dots, 0]_{1 \times 2L-1}^T$ 。此方法可以在已知期望信号的情况下在干扰方向形成稳定且深的零陷。

2 基于空间平滑直接数据域方法的高分辨算法

基于上述自适应权值求解能在干扰方向形成稳定的零陷的特性，本文在接收数据中加入虚拟期望信号构成新的接收数据矩阵，将实际目标当作干扰，利用自适应权值算法求出权值，则可在实际目标方向形成稳定且深的零陷，通过对零陷分布图取倒数组合，则可得到稳定、高分辨力的目标分辨图。

处理步骤：

(1) 在波束图的左半部分(通常角度为负)适当方位虚拟出一个期望信号并添加到接收数据中。

(2) 进行一定数量(如 15 次)循环，并在每次循环中给数据加入适当噪声进行扰动，求这些循环零陷分布图的均值，将零陷分布图取倒数，截取 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的功率谱图。

(3) 在波束图的右半部分(通常角度为正)适当

方位虚拟出一个方向期望信号并添加到接收数据中。

(4) 进行一定数量(如 15 次)循环,并在每次循环中给数据加入适当噪声进行扰动,求这些次循环零陷分布图的均值,将零陷分布图取倒数,截取 $-90^{\circ}\sim 0^{\circ}$ 的功率谱图。

(5) 将两个截取的功率谱图组合, 0° 方向取两功率谱图 0° 方向的均值,构成 $-90^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 方向的功率谱图。

3 仿真分析

在仿真实验中,通过比较发现,在 $\pm 40^{\circ}$ 附近添加虚拟源处理效果较好。因此,在下面的仿真中,所加的虚拟源均在 $\pm 40^{\circ}$ 。

(1) 非相干情况下与 MUSIC 算法比较

参数设置为: 23 元均匀线列阵,阵元间距为半波长,目标信号角度为 -10° 、 0° 、 8° ,噪声为均值为 0、方差为 1 的高斯非相干噪声。MUSIC 算法取 20 个快拍,新算法取 1 个快拍。子阵数为 12,目标信噪比为 10 dB 时功率谱图如图 2 所示,目标信噪比为 30 dB 时功率谱图如图 3 所示。

图 2、3 为不同信噪比时非相干情况下新算法与 MUSIC 算法的比较。基于直接数据域方法的高分辨算法在不同信噪比下具有稳定、分辨力较高的特点。尤其在高信噪比情况下,旁瓣较低,谱峰较窄,性能优于 MUSIC 算法。由图 3 可以看出,MUSIC 算法在信源数估计错误或先验信息错误的情况下,性能将明显降低,无法有效地估计目标方位。而基于直接数据域方法的高分辨算法不需要信源数的先验信息,仍能有效分辨目标。

(2) 信噪比 10 dB 时,满足虚警概率在 10% 以下,可以计算获取双目标有效分辨的门限值为 -12 dB,参数设置为: 阵列为 23 元均匀线列阵,阵元

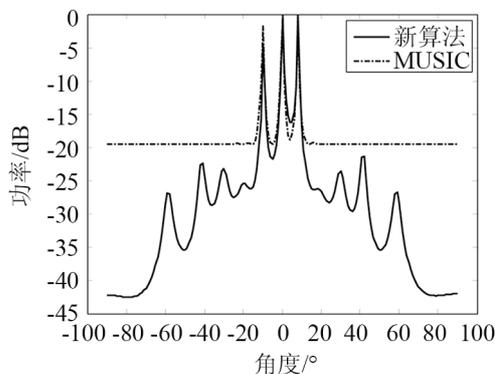


图 2 非相干信号算法比较(信噪比为 10dB)
Fig.2 Comparison of different approaches (noncoherent signal, SNR=10dB)

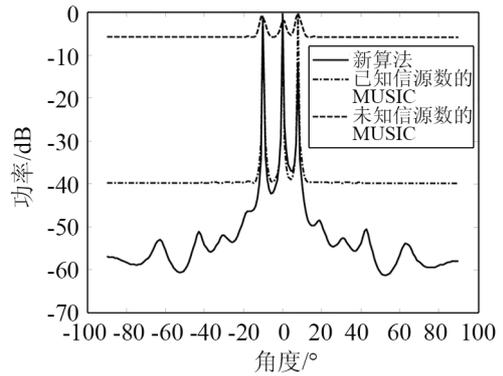


图 3 非相干算法比较(信号信噪比为 30dB)
Fig.3 Comparison of different approaches (noncoherent signal, SNR=30dB)

间距为半波长,目标信号角度为 0° 、 10° ,噪声是均值为 0、方差为 1 的高斯非相干噪声。子阵数为 12,信噪比从 0~30 dB 变化时,做 1000 次蒙特卡罗仿真实验,两目标都能检测的概率如图 4。

图 4 是门限为 -12 dB 时两目标同时检测到的检测概率,在 10 dB 以上的检测概率达到 98%。由于基于空间平滑直接数据域方法的高分辨算法在循环处理数据时加入了噪声扰动,降低了信噪比,因此在小信噪比情况下虚警概率较高,但在系统允许范围内。

(3) 相干情况下与 MUSIC 比较

参数设置为: 23 元均匀线列阵,阵元间距为半波长,目标信号角度为 -10° 、 0° 、 8° ,子阵数为 12,目标信噪比均为 20 dB,噪声是均值为 0、方差为 1 的高斯非相干噪声。功率谱图如图 5 所示。

由图 5 可见,在相干情况下,MUSIC 算法基本不能分辨目标,而基于空间平滑直接数据域方法的高分辨算法仍有稳定的分辨能力。

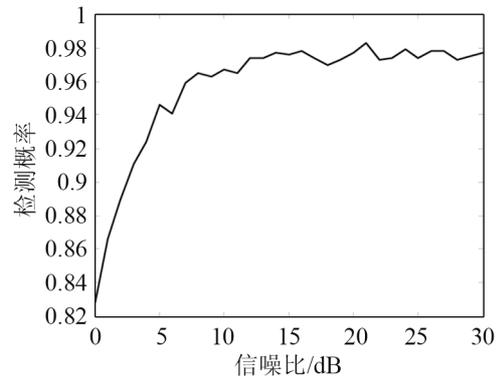


图 4 两目标的检测概率(门限为 -12 dB)
Fig.4 Detection probability of dual targets (threshold -12 dB)

5 结论

基于空间平滑直接数据域方法的高分辨算法

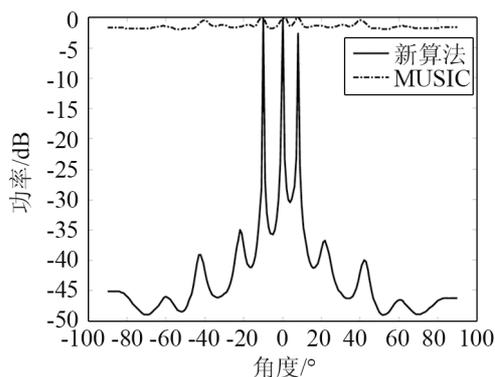


图5 相干信号算法比较(信噪比为 20dB)
Fig.5 Comparison of different approaches
(coherent signal, SNR 20dB)

克服了 MUSIC 需要大快拍数、信源数目先验信息、不能解相干的缺点, 利用一个快拍的数据, 可以达到 98% 的检测概率, 满足了雷达和声纳分辨目标要求, 但在处理过程中加入了噪声进行扰动, 降低了信噪比, 在低信噪比情况下虚警概率较高, 不过可控制在系统允许的范围内。

由于这种方法避免了样本协方差矩阵求逆, 求解简单, 适合实时处理。因此在声纳和雷达等小快拍信号数处理场合有着很好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Schmit R O. A signal subspace approach to multiple emitter location and spectral estimation[D]. Stanford University, 1981.
- [2] 秦洪峰, 黄建国, 刘科伟. 高分辨方位估计方法的稳健性研究[J]. 声学技术, 2003, 22(2): 98-101.
QING Hongfeng. HUANG Jianguo, LIU Kewei. Robustness of high-resolution direction-of-arrival estimation algorithm [J]. Technical Acoustics, 2003, 22(2): 98-101.
- [3] 戴征坚, 李志舜. 基于空间平滑处理的稳健宽带高分辨方位估计算法[J]. 声学技术, 2005, 24(4): 250-253.
DAI Zhengjian, LI Zhishun. Robust wideband high-resolution direction of arrival estimation based on spatial smoothing[J]. Technical Acoustics, 2005, 24(4): 250-253.
- [4] 文小琴, 韩崇昭, 韩红. 自适应天线的一种直接数据域处理方法[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(12): 2703-2705.
WEN Xiaoqin, HAN Chongzhao, HAN Hong. Direct data domain approach to adaptive antennas[J]. Journal of system simulation, 2004, 16(12): 2703-2705.
- [5] William A Gardner. Cyclostationarity in communications and Signal Processing[M]. Piscataway, New Jersey, IEEE Press, 1994.
- [6] 幸高翔, 蔡志明. 可变等效孔径直接数据域方法[J]. 海军工程大学学报. 2009, 21(2): 23-26.
XING Gaoxiang, CAI Zhiming. Variable equivalent aperture direct data domain method[J]. Journal of Naval University of Engineering. 2009, 21(2): 23-26.
- [7] Madurasinghe D. Data domain beamforming with flexible adaptation[J]. Electronics letters, 2004, 40(11): 687-689.