

文章编号: 1001- 2486(2010) 06- 0021- 05

泛探雷达时- 空级联目标检测与 DOA 估计算法*

鲍庆龙, 张月, 吴桐, 陈曾平

(国防科技大学 ATR 重点实验室, 湖南长沙 410073)

摘要: 针对“泛探”雷达, 提出了一种时- 空级联目标检测和 DOA 估计算法, 该方法首先利用基于 DFT 的数字波束形成技术完成阵元空间到波束空间的转换, 然后对协方差矩阵的迹做门限检测, 最后采用多级维纳滤波的子空间分解法进行到达角估计。仿真结果表明, 本文提出方法对比长时间相参积累和单脉冲比幅测角方法具有较好的时域检测和测向能力。

关键词: 泛探雷达; 时- 空级联; 多级维纳滤波

中图分类号: TP958 **文献标识码:** A

Joint Time-Space Target Detection and DOA Estimation Algorithm on Ubiquitous Radar

BAO Qing long, ZHANG Yue, WU Tong, CHEN Zeng ping

(ATR Key Laboratory, Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A joint time space target detection and DOA estimation algorithm on ubiquitous radar is proposed. First, data received by antenna array was transformed from array space to beam space by digital beam forming based on DFT. Then, the time domain detection was performed with the trace of covariance matrix. In the end, the direction of arrival was estimated by multistage Wiener filter. The simulation results show that the method proposed by this paper has a better performance on time domain detection and precision of DOA.

Key words: ubiquitous radar; time space; multistage Wiener filter

“泛探雷达”(ubiquitous radar)最初由 Skolnik 提出, 核心思想是“随时探测各处”(ubiquitous), 在覆盖空间范围内提供连续不间断的多种功能。如图 1 所示, 泛探雷达不具有扫描式的发射波束, 而是持续不断地照射某一观测区域, 如扇形区域, 甚至于全方向, 而在接收端利用 DBF 技术形成同时接收多波束覆盖整个观测区域, 针对每路波束的输出进行同样的信号处理流程。必要时, 泛探雷达可对各路波束的输出结果进行融合处理, 以获取更多的目标信息^[1-4]。

对于单路波束的信号处理算法, 泛探雷达可以借鉴常规雷达的处理流程, 如脉冲压缩、MTI、MTD、CFAR 等, 但在同时多功能和对目标方位精确测量等信号处理方面也存在自身的特殊性。清华大学提出一种基于固定波束形成+ 相邻波束单脉冲比幅测角的目标检测流程。当系统参数的选取(如波长和阵元数)或者阵列输出加权导致接收波束较宽时以及由于瑞利限的存在时, 采用此方法的目标方位测量精度有限^[5]。

为解决目标方位测量精度问题, 本文结合 8 阵元数字阵列雷达样机试验系统, 提出一种基于空间谱估计的时- 空级联目标检测方法, 首先利用接收数据协方差矩阵的迹进行时域检测, 然后利用空时二维数据估计目标反射回波信号的到达角, 从而完成对目标的距离、方位测量。仿真结果表明, 该方法不但

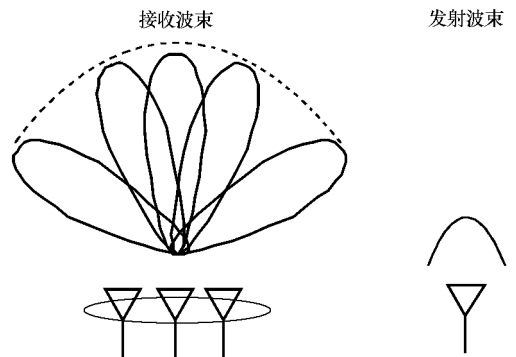


图 1 泛探雷达发射/接收波束示意图

Fig. 1 Transmit/Receive beam forming of ubiquitous radar

* 收稿日期: 2010- 09- 10

基金项目: 国家部委基金资助项目(51307060401)

作者简介: 鲍庆龙(1981-), 男, 博士生。

具有较低的可检测信噪比,同时具有超分辨的方位分辨力。

1 基于空间谱估计的时-空级联目标检测算法

文献[5]给出了一种适于泛探雷达的检测方法,即先通过数字波束形成方法形成一组覆盖观测空域的固定波束,对每个波束进行长时间相参积累,然后对过检测门限的目标进行相邻波束比幅测角,从而完成目标检测。该方法对每个波束的处理方法相同,仅在测角时对每个波束的处理结果进行融合。

本文结合阵列信号处理的思想,提出一种基于阵列接收数据协方差矩阵迹的时域检测方法,然后对检测结果做 DOA 估计,从而完成对目标的距离、方位测量。图 2 为基于空间谱估计的目标检测算法示意图。

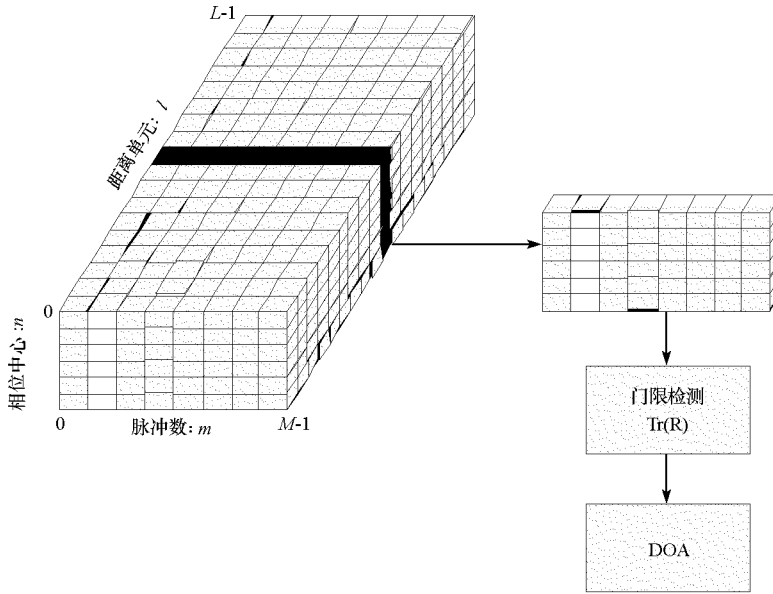


图 2 时-空级联的目标检测与 DOA 估计算法示意图
Fig. 2 Joint time-space target detection and DOA estimation algorithm structure

时域检测

1.1 基于协方差矩阵迹的时域检测

假设 N 元等距线阵,阵元间距为 d ,远场 P 个期望信号以平面波入射(波长为 λ),到达角分别为 θ_k ($k=1, 2, \dots, P$),则阵列接收到的数据为

$$X(t) = AS(t) + n(t) \quad (1)$$

式中 $X(t)$ 为 $N \times 1$ 阵列接收数据向量, $X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T$ 。 $[\]^T$ 表示矩阵转置, $n(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_N(t)]^T$ 。 $S(t)$ 为信号复包络向量, $S(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_P(t)]^T$, $s_k(t)$ 为第 k 个信源的复包络。 A 为阵列流形矢量, $A = [\alpha(\theta_0), \alpha(\theta_1), \dots, \alpha(\theta_P)]$, 其中 $\alpha(\theta_k) = [1, e^{j\beta_k}, \dots, e^{j(N-1)\beta_k}]^T$, ($k=1, 2, \dots, P$) 为第 k 个信源的导向矢量, 其中 $\beta_k = 2\pi d/\lambda \sin\theta_k$ 。阵列的协方差矩阵定义为

$$R_x = E[X(t)X^H(t)] = AR_sA^H + \sigma_n^2 I \quad (2)$$

其中 $R_s = E[S(t)S^H(t)]$ 为信号复包络协方差矩阵, I 为 N 维单位矩阵, σ_n^2 为阵元噪声功率。则 $\text{tr}(R_x) = N\sigma_n^2 + \sum_{k=1}^P \lambda_k$, ($k=1, 2, \dots, P$)。 λ_k 为 R_s 的第 k 个特征值。由于特征值本身即表征信号/噪声功率^[7-8], 因此可利用协方差矩阵的迹进行时域检测。

$$\begin{aligned} & H_1 \\ \text{tr}(\mathbf{R}_x) & > \text{threshold} \\ & < \\ & H_0 \end{aligned} \quad (3)$$

时域检测的门限

设 $A_c = \sqrt{\text{tr}(\mathbf{R}_x)}$, 又 $\text{tr}(\mathbf{R}_x) = \sum_{i=1}^N |x_i(t)|^2$, 则 A_c 可看作阵元接收数据非相参积累后信号的幅度。对 A_c 做恒虚警检测, 常值 K_0 由式(4)确定^[15]。

$$P_{fa} = \frac{1}{(1+K_0)^{Mn_p}} \sum_{k=0}^{n_p-1} \frac{1}{k!} \frac{\Gamma(Mn_p+k)}{\Gamma(Mn_p)} \left(\frac{K_0}{1+K_0}\right)^k \quad (4)$$

文献[5]的目标检测流程中先形成一组固定指向的波束, 然后对每个波束的数据做时域检测。对于单目标, 由于目标通常不会落在方向图最大指向方位, 故落在某波束内时会有能量损失(最大 3dB); 对于多目标, 若目标落在多个波束内, 则检测时无法利用全部信号能量。而采用 A_c 作为检测参数, 由于利用了接收到某距离维上全部信号能量, 因此检测性能理论上优于固定波束形成后的对每一波束的时域检测性能。

3 降维处理后时域检测

在实际应用中, 阵列的阵元数往往很多, 例如相控阵雷达, 其阵元数可能成百上千甚至上万, 如果进行全自适应处理, 则所需的运算量与存储量极大, 并且收敛性极差, 工程中难以应用。通常采用降维的方式, 将接收数据由阵元空间变换到波束空间进行信号处理。

由 N 维阵列形成 M 个波束, 其数学描述为用一个 $M \times N$ 维的变换矩阵 T 作用于接收阵列数据, 从而得到一个新的波束输出数据 $Y(t)$, 则

$$\begin{aligned} Y(t) &= TX(t) \\ R_y &= E[Y(t)Y^H(t)] = TAR_sA^HT^H + \sigma_n^2TT^H \end{aligned} \quad (5)$$

当采用基于 DFT 的波束形成方法时, $TT^H = I^{M \times M}$, 则式(5)可表示为

$$\begin{aligned} R_y &= T'R_sT'^H + \sigma_n^2I \\ T' &= TA \end{aligned} \quad (6)$$

因此, 采用基于 DFT 方法做阵元空间到波束空间变换的降维处理后, 仍可依式(3)对其做时域检测。

3 基于多级维纳滤波的 DOA 估计

子空间类分解算法是阵列信号处理中重要的组成部分, 是阵列信号无源定位的重要方法。1979年, Schmidt 提出了 MUSIC (Multiple Signal Classification) 超分辨算法, 开创了子空间类算法研究的新河^[6-7]。MUSIC 算法的计算量主要集中在对观测数据二阶统计量的子空间类分解上。多级维纳滤波算法利用对期望信号的前向正交投影的递推估计出信号及噪声子空间, 完成对观测数据二阶统计量的分解。利用乘法和加法过程代替协方差矩阵的分解过程, 计算量降低到 $O(M^2N)$, 便于 FPGA、DSP 等实现阵列信号的实时处理^[8-13]。

借鉴文献[12]的做法, 基于多级维纳滤波(MWF)同时进行辐射源数目估计和 DOA 估计。

(1) 初始化: $d_0(k) = x_i(k)$, $1 \leq i \leq M$

$$X_0(k) = X(k)$$

(2) FOR $i = 1, 2, \dots, M$

$$\hat{r}_{x_i d_i} = E[X_{i-1}(k)d_{i-1}^H(k)]; \beta_i = \|r_{x_i d_i}\|_2 = \sqrt{r_{x_i d_i}^H r_{x_i d_i}}; h_i = \frac{r_{x_i d_i}}{\|r_{x_i d_i}\|_2}$$

$$d_i(k) = h_i^H X_{i-1}(k); X_i(k) = X_{i-1}(k) - h_i d_i(k);$$

END FOR

(3) 确定信号子空间估计需要的滤波器阶数

$$\bar{\Delta} = \beta_{\max} - \beta_{\min} / (M - 1)$$

FOR $i = 1, 2, \dots, M$

$$\Delta \sigma_i(i) = |\beta_{M-i+1} - \beta_{M-i}|$$

IF $\Delta \sigma_i(i) > \mu \cdot \bar{\Delta}$ THEN $P' = M - i$; BREAK;

END IF

END FOR

(4) 计算信号子空间和噪声子空间

$$\Pi = \text{span}\{h_1, h_2, \dots, h_{P'}\}, \Pi^\perp = \text{null}\{h_1, h_2, \dots, h_{P'}\}$$

(5) 取 $d'_0(k) = x_j(k), i \neq j$, 重复步骤一到步骤四, 得到噪声子空间 Π'^\perp

(6) 根据两个不同的噪声子空间构造经典 MUSIC 谱, 通过谱峰搜索可以得到两组方向估计结果

$$\Theta_1^\perp = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_K\}, \Theta_2^\perp = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{K'}\}, \text{其中 } K \geq P, K' \geq P$$

(7) 选择结果相同的方向作为真实信源的估计, 以同时完成信源数目和方向的同时估计。

4 实验结果与分析

设置仿真条件如下: 8 阵元均匀线阵(ULA), 载频 1.25GHz, 带宽 2MHz, 脉冲重复周期为 1ms, 阵元间距为信号中心频率对应波长的一半, 射频直接采样频率为 1.04GHz, CPI 为 32ms, 蒙特卡洛仿真次数为 100 次, 信噪比定义为单个阵元上单个信号与噪声的功率之比。

假设一个速度为 100m/s 的运动目标, 方位为 10° , 基于协方差矩阵迹的时域检测结果如图 3 所示, 可以看出, 当 $K_0 = 1.3, P_D = 0.5$ 时, 最小可检测信号输入信噪比为 -39dB 。

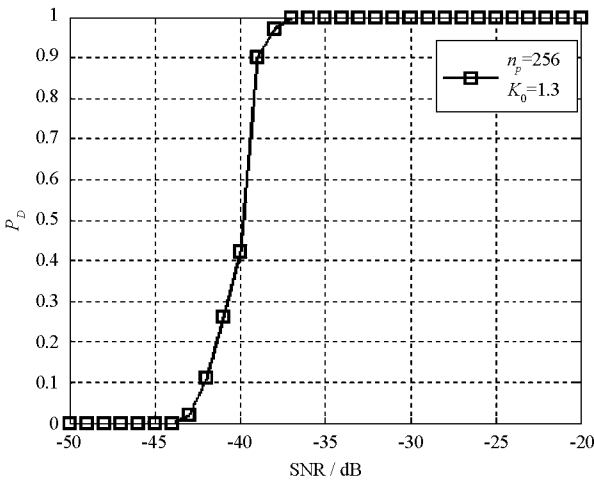


图 3 时域检测概率曲线

Fig. 3 Probability of detection versus single pulse SNR

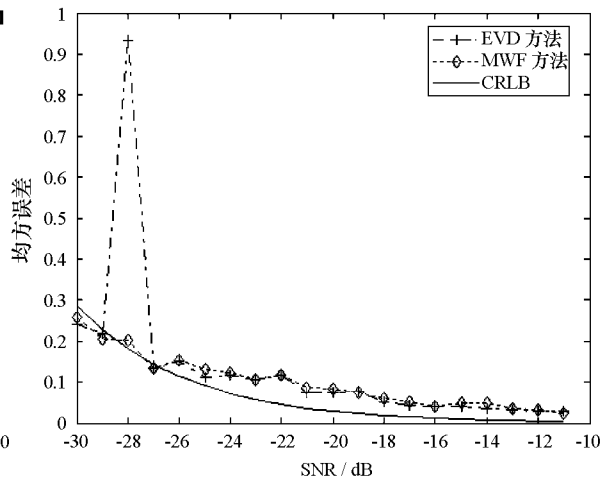


图 4 不同信噪比下 DOA 精度变化曲线

Fig. 4 Precision of DOA estimation versus single pulse SNR

假设一个方位为 10° 、任一距离的目标, DOA 估计误差随信噪比变化曲线如图 4 所示。从图中可以看出, 当信噪比高于 -25dB 时, 基于特征值分解(EVD)和 MWF 方法的空间谱估计精度基本上是相同的, 且逼近 Cramer Rao 下限。

以 L 波段 16 阵元 DAR 雷达实测数据为例, 该雷达通过基于 FFT 的 DBF 方法形成一组固定波束覆盖 $-45^\circ \sim 45^\circ$ 空域。图 5 为采用接收数据协方差矩阵迹的时域检测效果图, 选取任一过门限距离点的二维数据做 DOA 估计, 图 6 为对目标方位的测量结果。

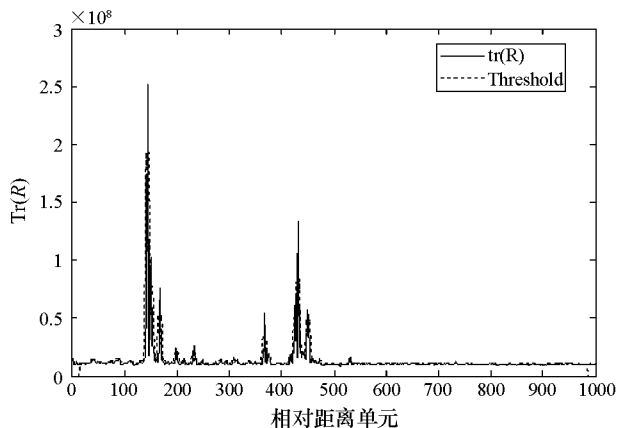


图 5 16 阵元 DAR 实测数据检测结果
Fig. 5 Detection result based on the measured data of 16 elements DAR system

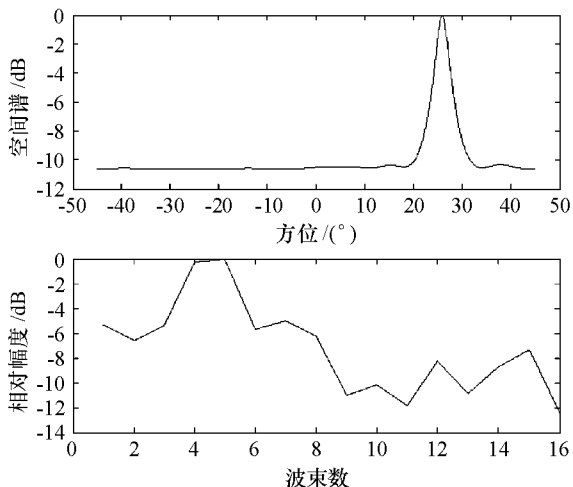


图 6 某距离维 DOA 估计结果与 DBF 后目标所处波束对比
Fig. 6 Results of DOA estimation and DBF based on a certain snapshot

5 结束语

本文提出了一种用于泛探雷达的时-空级联目标检测算法。首先,利用接收数据协方差矩阵的迹作为时域检测参数,尽可能有效的利用阵列接收到回波信号的能量;其次,采用基于 MWF 的空间谱估计方法测量目标方位,由于采用了 MWF 方法进行子空间分解,能极大降低空间谱估计算法的运算量,并能满足目标检测算法的实时性要求。仿真结果表明本文提出算法在低信噪比情况下仍具有较高的检测概率和较精确的测角精度。

参考文献:

- [1] Skolnik M. Improvements for Air surveillance Radar[C]//The Record of the 1999 IEEE Radar Conference, 1999: 18- 21.
- [2] Rabileau D J, Parker P. Ubiquitous MIMO Multifunction Digital Array Radar Signals[C]// Conference Record of the Thirty Seventh Asilomar Conference on Systems and Computers, 2003, (1): 1057- 1064.
- [3] Alier J J, White R M, Kretschmer F F, et al. Ubiquitous Radar: An Implementation Concept[J]. Proceedings of the IEEE Radar Conference, 2004: 65- 70.
- [4] Skolnik M. Attributes of the Ubiquitous Phased Array Radar[C]//IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, 2003: 101- 106.
- [5] 汤小为, 汤俊, 彭应宁, 等. 一种新体制雷达——“泛探”雷达的关键技术研究[C]//第十届全国雷达学术年会, 2008.
- [6] Zoltowski M D, Kautz G M, Silverstein S D. Beamspace Root MUSIC[J]. IEEE Trans. On SP, 1993, 41(1): 501- 504.
- [7] 王永良, 等. 自适应阵列信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [8] 王永良, 等. 空间谱估计理论与算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [9] Honig M L, Goldstein J S. Adaptive Reduced-rank Interference Suppression Based on the Multistage Wiener Filter [J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(6): 986- 994.
- [10] Singh R. Comments on “Adaptive Reduced-rank Interference Suppression Based on the Multistage Wiener Filter” [J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53(3): 399- 400.
- [11] 丁前军, 王永良, 张永顺. 一种多级维纳滤波器的快速实现算法: 迭代相关相减算法[J]. 通信学报, 2005, 26(12): 1- 7.
- [12] 黄磊, 吴顺君, 张林让. 快速子空间分解方法及其维数的快速估计[J]. 电子学报, 2005, 33(6): 977- 981.
- [13] 包志强. 一种信源个数与波达方向联合估计的新算法[J]. 电子学报, 2006, (12): 2170- 2174.
- [14] 安志娟. 一种新的基于 Krylov 子空间的快速子空间分解[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(1): 29- 32.
- [15] Majafza B R, Elsherbeni A Z. Matlab Simulations for Radar Systems Design[M]. Chapman and Hall/CRC, 2004.