

阵元分集与 SVD 降噪*

刘本永* 杨万麟

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】 针对高距离分辨(HRR)雷达系统,提出了一种抑制噪声的方法。该方法引入辅助阵元接收目标回波形成测量矩阵,首先对该矩阵作奇异值分解(SVD),建立信号子空间和噪声子空间,然后对信号进行估计并重构出噪声受抑的测量矩阵,在重构矩阵中进行同相相加,降低噪声电平,以提高噪声背景下雷达检测和识别能力。

关键词 高距离分辨雷达; 阵元分集; 矩阵奇异值分解; 降噪
中图分类号 TN959.17

现代雷达系统利用宽带技术获得距离向高分辨率,可以形成目标的距离剖面像,即一维像。所成一维像的质量随信噪比的降低而变差,影响对目标的可靠检测和识别。本文通过引入辅助阵元同时接收目标的回波形成信号测量矩阵,首先利用奇异值分解的优良抗噪能力抑制噪声,然后用阵元分集方法处理形成一维像,改善输出信噪比,以提高噪声背景下高分辨雷达的检测和识别能力。

1 奇异值分解与信号估计^[1, 2]

设 M 个通道同时接收 R 个信号 $S_j (j=1, 2, \dots, R)$ 及加性噪声 n , 其中第 i 通道的第 k 个值为

$$x_i(k) = a_{i1}S_1(k) + a_{i2}S_2(k) \dots + a_{iR}S_R(k) + n_i(k) \quad (1)$$

其中 $i=1, 2, \dots, M; k=1, 2, \dots, L$ (L 为样点数); $a_{ij} (j=1, 2, \dots, R)$ 为第 i 个通道对第 j 个信号的加权系数。其矩阵形式为^[3]

$$X = AS + N \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} X &= [x_{ik}]_{ML} & A &= [a_{ij}]_{MR} \\ S &= [S_{jk}]_{RL} & N &= [n_{ik}]_{ML} \end{aligned}$$

X 为测量矩阵。

测量矩阵的奇异值蕴含着噪声电平、信号能量、矩阵秩等信息。通过奇异值分解,可以分离出信号和抑制噪声,并重构噪声受抑后的测量矩阵。

对 X 作奇异值分解,就是寻找两个酉矩阵 U 和 V 对 X 进行变换,使得结果为一实对角矩。即

$$U^H X V = \sum \text{或 } X = U \sum V^H \quad (3)$$

式中 H 表示共轭转置,设 $M < L$, 则

$$\sum = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_M)$$

且 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_M \geq 0$

* 1998年3月3日收稿,1998年4月2日修改定稿

* 男 30岁 博士生

为 X 的奇异值或奇异谱, U 和 V 分别为 X 的左、右奇异矢, 满足

$$\begin{aligned} U^H U &= U U^H = I_M \\ V^H V &= V V^H = I_L \end{aligned}$$

若信号强于噪声, 则

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \Sigma_S & 0 \\ 0 & \Sigma_N \end{bmatrix}$$

Σ_S 的秩为 R , 对应于信号; Σ_N 的秩为 $(M-R)$, 对应于噪声。相应地有

$$U = [U_S \quad U_N] \quad (4)$$

式中 U_S 为 U 的前 R 列, 与信号相对应; U_N 为 U 的后 $(M-R)$ 列, 与噪声相对应。用 U_S 的列张成信号子空间, 则

$$S_S = U_S^H X \quad (5)$$

式(5)为对信号的估计结果。

2 阵元分集及其数据模型

设阵元(总数为 M)随意分布, 但同时接收目标回波。将各阵元的接收数据组成矩阵。对于高距离分辨雷达系统, 复杂目标在雷达视线上等效于 R 个点目标。这样, 数据模型就是用 M 个通道对 R 个信号同时采样的阵列信号模型, 即

$$X = AS + N \quad (6)$$

式中 X 为接收测量矩阵; A 为各通道对信号 S (共 R 个)的加权矩阵; N 为加性噪声。

比较式(2)和式(6)知, 可用奇异值分解方法抑制噪声 N 。

3 SVD 降噪

3.1 基于 SVD 的噪声抑制

根据上述分析, 对测量矩阵 X 作 SVD 信号分离和降噪处理, 估计的信号矩阵为

$$S_S = U_S^H X \quad (7)$$

然后重构噪声受抑的测量矩阵^[1]

$$W = U_S U_S^H X \quad (8)$$

3.2 阵元分集输出

采用特显点搜索法^[4], 在 W 中确定这样的列, 该列元素取模后方差最小。以此列为参考, 实现同相相加。设该列元素(第 k 列)是

$$w_{i,k} = A_{i,k} \exp(-j\phi_{i,k}) \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (9)$$

以第 1 天线为参考, 修正相位为

$$\Delta\phi_{i,k} = \phi_{i,k} - \phi_{1,k} \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (10)$$

则一维像为

$$H(n) = \left| \sum_{i=1}^M A_{i,n} \exp[-j(\phi_{i,n} - \phi_{i,k} + \phi_{1,k})] \right| \quad (11)$$

4 计算机模拟

设目标由两个散射中心组成, 两个散射中心具有相同的雷达散射截面(RCS), 在雷达视线

(RLS)上相距 2 m。两中心距天线阵原点分别为 R m 和 $(R+2)$ m。发射脉冲的带宽为 150 MHz, 因而距离分辨率为 1 m。模拟三种电平的加性高斯噪声, 对测量矩阵按上述方法处理, 结果如图 1~3 所示。图 1 为无噪声时的一维像, 其中图 1a 和图 1b 分别对应于单阵元接收和四阵元分集的结果, 显然两者无差别。图 2、3 分别对应于输入信噪比为 10 dB、0 dB 的情形, 其中 r 为距离, P 为归一化距离剖面像。由此可见, 用文中的方法可以有效地抑制噪声, 提高雷达检测和识别能力。

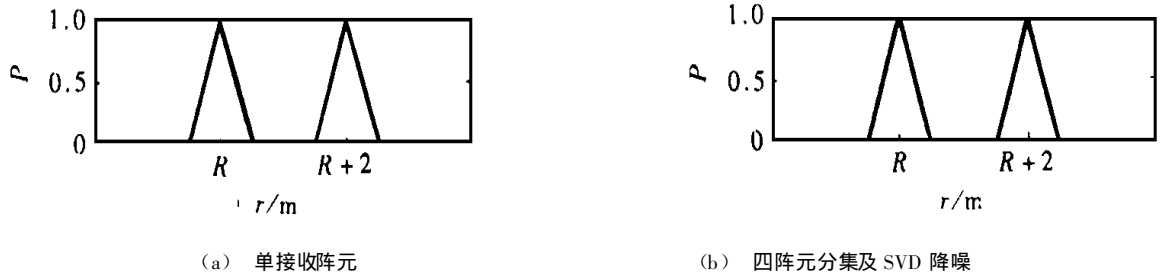


图 1 无噪声时的一维像

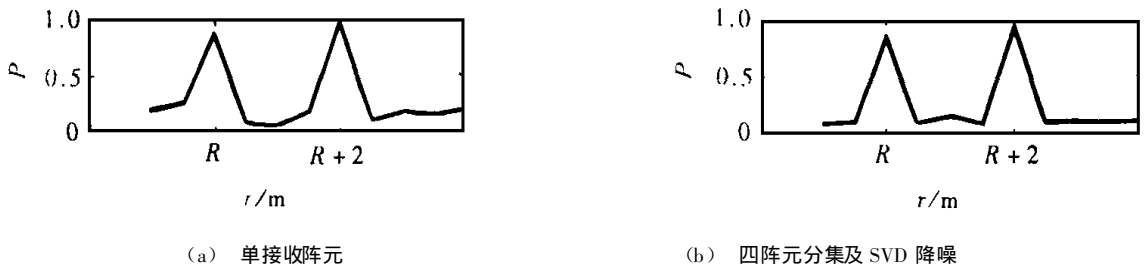


图 2 输入信噪比 $SNR = 10$ dB 时的一维像

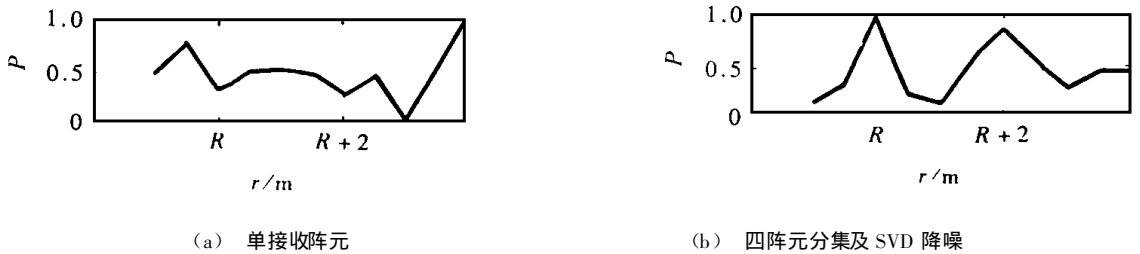


图 3 输入信噪比 $SNR = 0$ dB 时的一维像

5 结束语

本文研究了噪声环境下利用多阵元同时接收雷达回波, 以奇异值分解抑制噪声、改善高距离分辨雷达输出信号的信噪比的方法, 模拟实验表明这种方法是有效的。

参 考 文 献

- 1 Sadasivan P K, Dutt D N. SVD based technique for noise reduction in electroencephalographic signals. *Signal Processing*, 1996, 55 :179~189
- 2 Callaerts D, Vandewalls J, Sansen W *et al.* On-line algorithm for signal separation based on SVD. in Deprettere E F, ed, *SVD and Signal Processing: Algorithm, Application and Architectures*, Elsevier, Amsterdam, 1988 :269~276
- 3 魏 平,肖先赐.高分辨阵列测向系统中的基本算法性能实验. *电子科技大学学报*, 1997, 26(增刊): 108~113
- 4 Steinberg B D. Radar imaging from a distorted array: the radio camera algorithm and experiments. *IEEE Trans AP*, 1981, 29 :740~748

Receiver's Diversity and SVD-based Noise Reduction

Liu Benyong Yang Wanlin

(Dept. of Electronic Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract A novel approach of receiver's diversity for receiving echo signals scattered from a radar target is proposed, and application of singular value decomposition (SVD) to noise reduction is explored. This approach is used to enhance the ability of detection of a high resolution radar(HRR) when a target is in a noisy environment, in which the ability of detection declines. Simulated data are given and the results shows the efficiency of this method in the reduction of noise.

Key words high range resolution radar; receiver's diversity; singular value decomposition of matrix; noise reduction

编辑 黄 莘

°科研成果介绍°

短波突发实时自适应选频控制系统

主研人员: 罗承烈 黄跃新 毛劲松 吕海燕 罗 宁 陈尚勤

短波突发实时自适应选频控制系统包括 LOA、ALOA 探测信号体制研究, 自动链路建立, (ALE)方法研究, 突发通信方式下的 ALE 方法研究。该系统技术先进, 国外尚未见突发选频技术的报道, 该系统在应急通信领域有广泛的推广应用价值。

°科 卞°