

基于多级维纳滤波的 MIMO 雷达自适应脉冲压缩方法

张娟 张林让 徐青 杨志伟

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 自适应脉冲压缩能够有效抑制 MIMO 雷达发射波形间的互干扰。该文提出了一种基于多级维纳滤波器(MSWF)的 MIMO 雷达自适应脉冲压缩方法,该方法利用多级维纳滤波器的前后向递推系数计算脉冲压缩滤波器的权系数。与基于最小均方误差(MMSE)的自适应脉冲压缩方法相比,该方法无需对观测数据的协方差矩阵进行估计和求逆,大大降低了计算复杂度。计算机仿真结果表明,该方法具有与 MMSE 自适应脉冲压缩方法和广义旁瓣相消(GSC)自适应脉冲压缩方法相近的脉冲压缩性能。

关键词: MIMO 雷达; 多级维纳滤波器; 自适应脉冲压缩; 低复杂度

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)05-1045-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01215

Adaptive Pulse Compression of MIMO Radar Based on MSWF

Zhang Juan Zhang Lin-rang Xu Qing Yang Zhi-wei

(National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Adaptive Pulse Compression (APC) can effectively mitigate the mutual interference between the transmitting waveforms of Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) radar. In this paper, APC of MIMO radar based on Multi-Stage Wiener Filter (MSWF) is proposed, in which, the weights of forward and backward recursion of MSWF are computed to obtain the weight coefficients of the APC. The proposed method does not involve the estimate and the inverse of the sample covariance matrix, thus indicating much lower computation complexity. The numerical results indicate that the proposed method is superior to the conventional matched filter, and performs similarly as the APC based on MMSE and GSC.

Key words: MIMO radar; Multi-Stage Wiener Filter(MSWF); Adaptive Pulse Compression(APC); Low complexity

1 引言

MIMO 雷达是近年来雷达界的研究热点,它在发射端发射的是一组正交的波形,能够在空间形成多个通道,这种波形的分集能够带来更多的雷达系统性能的改善,其中一个重要方面体现在 MIMO 雷达在接收端形成了更大孔径的虚拟阵列,改善了系统分辨率,增加了可估计的最大信源数^[1],提高了参数估计的精度^[2,3]。MIMO 雷达这些性能的提高与其发射波形的分集和接收端的信号分离有着密不可分的关系。

MIMO 雷达接收端接收的回波信号是多个收发通道回波信号的叠加,为了将各个发射波形进行有效的分离,通常在接收端采用一组针对不同发射信号的匹配滤波器组。理想的一组正交波形其任意两个波形的互相关为零,采用常规的匹配滤波器可以

有效地分离各个发射波形,然而在实际中,发射波形不可能做到完全正交,此时对于某一给定的匹配滤波器,它只能对一个波形进行匹配,其它波形就变成了干扰。为了克服各个发射波形之间的相互干扰,考虑从 MIMO 雷达接收的每个距离单元的回波信号中自适应的计算脉冲压缩滤波器的权系数。文献[4,5]针对单基地雷达和多基地雷达提出了基于最小均方误差(MMSE)准则的自适应脉冲压缩滤波器,但是该方法需要计算样本协方差矩阵并对该矩阵进行求逆,计算复杂度为 $O(K^2L + K^3L)$ 。其中 K 为脉冲压缩滤波器的窗长, L 为需要压缩的距离单元数,为了降低计算复杂度,文献[6]提出了基于广义旁瓣相消结构的 MIMO 雷达自适应脉冲压缩滤波器,相当于对样本协方差矩阵进行降维,其计算复杂度为 $O(K^2L + (K - M)^3L)$, M 为 MIMO 雷达的发射阵元数,其计算量仍然较大。

多级维纳滤波器是一种有效的降维技术,在阵列干扰抑制方面^[7]得到了广泛的应用。文献[8]指出

线性约束最小均方误差(LCMV)准则下阵列自适应波束形成的权系数可以采用多级维纳滤波器的前后向递推系数等效地进行计算。为了更加有效地降低MIMO雷达自适应脉冲压缩滤波器的计算复杂度,本文提出了基于MSWF的MIMO雷达自适应脉冲压缩滤波方法。该方法具有与MMSE APC方法和GSC APC方法相近的脉冲压缩性能,但其计算复杂度明显降低。本文第2节介绍了MIMO雷达的信号模型;第3节提出了基于MSWF的MIMO雷达自适应脉冲压缩方法,并对3种MIMO雷达自适应脉冲压缩方法的计算复杂度进行了分析;第4节给出了计算机仿真结果,验证了所提出算法的有效性。

2 MIMO雷达的信号模型

设MIMO雷达工作在窄带远场条件下,发射阵元数为 M ,接收阵元数为 N , M 个发射阵元的发射信号矢量为 $\mathbf{S} = [\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots, \mathbf{s}_M]$,其中 $\mathbf{s}_i = [s_i(0)s_i(1) \dots s_i(K-1)]^T$, K 为发射信号的长度。由此可得到第 $n(n = 0, 1, \dots, N-1)$ 个阵元天线在第 l 个距离单元

$$\mathbf{y}_n(l) = \sum_{m=1}^M \alpha_{nm} \mathbf{s}_m + \mathbf{w}_n(l) \quad (1)$$

其中 $\mathbf{y}_n(l) = [y_n(l), y_n(l+1), \dots, y_n(l+K-1)]^T$ 为接收信号的连续 K 个时间采样。 α_{nm} 是第 m 个发射阵元与第 n 个接收阵元之间的通道增益,由目标的散射强度和各个发射阵元与接收阵元之间的相位差决定。 $\mathbf{w}_n(l) = [w_n(l), w_n(l+1), \dots, w_n(l+K-1)]^T$ 为加性高斯白噪声的时间采样,假定噪声矢量 $\{\mathbf{w}_n[l]\}_{n=1}^N$ 是独立的、均值为零的复高斯变量,协方差矩阵为 \mathbf{R}_w , $\mathbf{R}_w = \sigma_w^2 \mathbf{I}_N$ 。

根据MIMO雷达的工作原理和信号处理流程,每个阵元接收的信号分别与 M 个发射信号进行匹配滤波,如果采用传统的匹配滤波器,第 n 个阵元接收的信号与第 m 个发射信号进行匹配之后的信号表示如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{nm}(l) &= \mathbf{s}_m^H \left(\sum_{i=1}^M \alpha_{ni} \mathbf{s}_i + \mathbf{w}_n(l) \right) \\ &= \alpha_{nm} \mathbf{s}_m^H \mathbf{s}_m + \sum_{i \neq m} \alpha_{ni} \mathbf{s}_m^H \mathbf{s}_i + \mathbf{s}_m^H \mathbf{w}_n(l) \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中,除了含有信号本身的自相关之外,还含有信号之间互相关的叠加。由于在实际中,发射信号不可能做到完全正交,信号之间的互相关分量不能忽略,因此,发射波形之间的相互干扰影响了常规的匹配滤波器对发射波形的分离。

3 基于MSWF的MIMO雷达自适应脉冲压缩

自适应脉冲压缩能够有效地抑制发射波形的互相关所带来的波形之间的相互干扰,它是根据雷达接收到的每个距离单元的信号自适应地计算脉冲压缩滤波器的权系数。当对某一个发射波形进行分离的时候,其它的发射波形分量就可以看作是干扰,因此自适应脉冲压缩问题可以等效为阵列信号处理中的自适应波束形成的问题。假设第 n 个阵元接收信号在第 l 个距离单元对第 m 个发射波形进行分离的自适应脉冲压缩的权系数为 $\mathbf{h}_{nm}(l)$, $\mathbf{h}_{nm}(l)$ 是一个 $K \times 1$ 的矢量,用 $\mathbf{h}_{nm}(l)$ 代替式(2)中的 \mathbf{s}_m ,则自适应脉冲压缩滤波器的输出为

$$\mathbf{Z}_{nm}(l) = \mathbf{h}_{nm}^H(l) \left(\sum_{i=1}^M \alpha_{ni} \mathbf{s}_i + \mathbf{w}_n(l) \right) \quad (3)$$

对于基于MMSE的自适应脉冲压缩,

$$\mathbf{h}_{nm}(l) = \mathbf{R}_n^{-1}(l) \mathbf{s}_m \quad (4)$$

其中 $\mathbf{R}_n(l) = E[\mathbf{y}_n(l) \mathbf{y}_n^H(l)]$ 是维数为 $K \times K$ 的矩阵,是观测数据 $\mathbf{y}_n(l)$ 的协方差矩阵。对于基于GSC的自适应脉冲压缩,权系数计算表达式为

$$\mathbf{h}_{nm}(l) = \mathbf{s}_m - \mathbf{B}(\mathbf{B}^H \mathbf{R}_n(l) \mathbf{B})^{-1} \mathbf{R}_n(l) \mathbf{s}_m \quad (5)$$

其中 $\mathbf{B} = \mathbf{I} - \mathbf{S}(\mathbf{S}^H \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^H$, \mathbf{I} 为 $K \times K$ 的单位阵。

多级维纳滤波器是一种有效的降维滤波技术,它利用一系列正交投影,将信号矢量进行多级分解,再进行多级标量维纳滤波,最后综合出维纳滤波器的输出误差信号。它得到Wiener-Hopf方程 $\mathbf{R}_x \mathbf{W}_{\text{opt}} = \mathbf{r}_{xd}$ 的渐近最优解 \mathbf{W}_{mswf} ,如果分解的级数与系统维数一样,那么 $\mathbf{W}_{mswf} = \mathbf{W}_{\text{opt}}$ 。

对于MIMO雷达的自适应脉冲压缩,如果将第 m 个发射波形 \mathbf{s}_m 看作是期望信号,那么其它 $M-1$ 个发射波形都可以看作是干扰。可以采用多级维纳滤波器对观测数据进行降维滤波,避免协方差矩阵的求逆。

于是,本文采用期望波形来初始化多级维纳滤波器的第一级基矢量, $\mathbf{u}_1 = \mathbf{s}_m / \|\mathbf{s}_m\|$ 是一个 $K \times 1$ 维的归一化互相关矢量,其中 $\|\cdot\|$ 表示矢量的范数。将MIMO雷达接收信号 $\mathbf{y}_n(l)$ 看作是多级维纳滤波器的初始观测数据 $\mathbf{X}_0(l)$,在多级维纳滤波器的第 i 级,将观测数据经过基矢量 \mathbf{u}_i 的滤波,可获得期望信号 $\mathbf{d}_i(l)$ 及其正交信号 $\mathbf{X}_i(l)$,其中 $\mathbf{u}_i = E[\mathbf{d}_{i-1}(l) \mathbf{X}_{i-1}^H(l)] / \sqrt{E[\mathbf{d}_{i-1}(l) \mathbf{X}_{i-1}^H(l)]^2}$, $\mathbf{d}_i(l) = \mathbf{u}_i^H \mathbf{X}_{i-1}(l)$, $\mathbf{X}_i(l) = \mathbf{B}_i^H \mathbf{X}_{i-1}(l)$,其中 \mathbf{B}_i 是一个 $K \times (K-1)$ 维的阻塞矩阵,它的列矢量形成了 \mathbf{u}_i 的零空间的正交基,即 $\mathbf{B}_i = \text{null}(\mathbf{u}_i)$,这里取 $\mathbf{B}_i = \mathbf{I} - \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i^H$ 。图1显示了一个相加相减结构的 K 级维纳滤波器的原理框图,

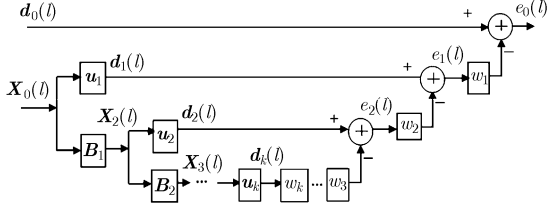


图1 多级维纳滤波器的原理框图

图中 $e_i(l)$ 表示第 i 级的估计误差信号, w_i 表示第 i 级的标量权, $w_i = E[\mathbf{d}_{i-1}(l)e_i^H(l)] / E[|e_i(l)|^2]$ 。

多级维纳滤波器的等效权矢量可以按以下递推公式求得

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{W}_{e,K-1} &= \mathbf{u}_{K-1} - \mathbf{B}_{K-1}\mathbf{w}_K \\ \mathbf{W}_{e,i} &= \mathbf{u}_i - \mathbf{B}_i\mathbf{W}_{e,i+1}\mathbf{w}_{i+1}, \quad i = K-2, \dots, 1 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

全维维纳滤波器的权矢量 $\mathbf{W}_{e,1}$ 与 $\mathbf{R}_n^{-1}(l)\mathbf{s}_m$ 等价。

经过多级维纳滤波之后, 我们可以得到基于多级维纳滤波器的 MIMO 雷达自适应脉冲压缩的权系数:

$$\mathbf{h}_{nm}(l) = \mathbf{u}_1 - w_2\mathbf{B}_1(\mathbf{u}_2 - w_3\mathbf{B}_2(\mathbf{u}_3 - w_4\mathbf{B}_3(\mathbf{u}_4 - \dots - w_K\mathbf{B}_{K-1}\mathbf{u}_K))) \quad (7)$$

其中 \mathbf{u}_i 为多级维纳滤波器的基矢量, w_i 为多级维纳滤波器的标量权。

采用多级维纳滤波器的基矢量 \mathbf{u}_i 和标量权 w_i 来求解 MIMO 雷达自适应脉冲压缩滤波器的权系数的过程总结如下:

- 步骤1 初始化 $\mathbf{u}_1 = \mathbf{s}_m / \|\mathbf{s}_m\|$, $\mathbf{X}_0(l) = \mathbf{y}_n(l)$, $\mathbf{d}_1 = \mathbf{u}_1^H \mathbf{X}_0$, $\mathbf{X}_1 = \mathbf{X}_0 - \mathbf{u}_1 \mathbf{d}_1$;
- 步骤2 前向递推算算法, 对于 $i = 2, 3, \dots, K$, $\mathbf{u}_i = E[\mathbf{d}_{i-1} \mathbf{X}_{i-1}^H] / \sqrt{E[\mathbf{d}_{i-1} \mathbf{X}_{i-1}^H]^2}$, $\mathbf{d}_i = \mathbf{u}_i^H \mathbf{X}_{i-1}$, $\mathbf{X}_i = \mathbf{X}_{i-1} - \mathbf{u}_i \mathbf{d}_i$;
- 步骤3 后向递推算算法, $e_K = \mathbf{d}_K = \mathbf{X}_{K-1}$, 对于 $i = K, K-1, \dots, 2$, $\mathbf{w}_i = E[\mathbf{d}_{i-1} e_i^H] / E[|e_i|^2]$, $e_{i-1} = \mathbf{d}_{i-1} - w_i^* e_i$;
- 步骤4 利用式(7)求解基于 MSWF 的 MIMO 雷达自适应脉冲压缩滤波器的权系数。

从上面的分析可以看出, 基于 MSWF 的 MIMO 雷达自适应脉冲压缩方法利用多级维纳滤波器的前后向递推系数计算各个距离单元回波信号的脉冲压缩滤波器的权系数, 不需要对样本数据的协方差矩阵进行估计和求逆, 计算复杂度仅为 $O(K^2L)$ 。而 MMSE 自适应脉冲压缩方法和 GSC 自适应脉冲压缩方法都涉及到协方差矩阵的估计和矩阵的求逆, 其计算复杂度分别是 $O(K^2L + K^3L)$ 和 $O(K^2L + (K-M)^3L)$ 。当发射波形的码长比较长时, 基于 MSWF 的 MIMO 雷达自适应脉冲压缩方法的计算

复杂度远远低于 MMSE 自适应脉冲压缩方法和 GSC 自适应脉冲压缩方法。

4 计算机仿真

为了验证本文提出算法的有效性, 考虑对一个含有 4 个发射阵元和 4 个接收阵元, 阵元间距为半个波长的 MIMO 雷达系统进行仿真, 发射波形采用文献[9]中设计的一组码长为 40 的相位编码信号, 4 个发射波形的自相关旁瓣峰值和互相关旁瓣峰值如表 1 所示, 由表 1 可以看出, 发射波形之间并不能满足完全正交的条件。回波信号中在第 50 个距离单元上存在一个点目标。图 2 给出了信噪比为 30 dB 时, 回波信号自适应脉冲压缩之后的波形。图 3 给出了信噪比为 3 dB 时, 回波信号自适应脉冲压缩之后的波形。

表 1 各个发射波形的自相关和互相关旁瓣峰值电平(dB)

| | S1 | S2 | S3 | S4 |
|----|----------|----------|----------|----------|
| S1 | -16.3574 | -13.7142 | -14.4067 | -13.4692 |
| S2 | -13.7142 | -16.9910 | -13.7058 | -15.0504 |
| S3 | -14.4067 | -13.7058 | -17.4191 | -13.9102 |
| S4 | -13.4692 | -15.0504 | -13.9102 | -14.7986 |

由于篇幅有限, 这里只给出了第 1 个阵元接收信号对 4 个发射波形进行自适应脉冲压缩以后的信号, 其它阵元的接收信号经过自适应脉冲压缩之后的输出波形具有类似的情况。由于 GSC APC 法具有与 MMSE APC 法相近的 MIMO 雷达自适应脉冲压缩性能^[6], 图中只给出了本文提出的 MSWF APC 法、常规匹配滤波器和 MMSE APC 法这 3 种 MIMO 雷达脉冲压缩滤波器的输出波形。从图中可以看出, 基于 MSWF 的 MIMO 雷达自适应脉冲压缩的性能要优于常规匹配滤波器, 并且具有与 MMSE 自适应脉冲压缩滤波方法相近的滤波性能, 但其计算复杂度要远小于基于 MMSE 准则的 MIMO 雷达自适应脉冲压缩方法。

5 结论

本文提出了一种基于多级维纳滤波的 MIMO 雷达自适应脉冲压缩方法, 该方法利用多级维纳滤波器的前后向递推系数计算脉冲压缩滤波器的权系数, 无需对观测数据的协方差矩阵进行估计和求逆, 大大降低了计算复杂度, 却具有与 MMSE 自适应脉冲压缩方法和 GSC 自适应脉冲压缩方法相近的脉冲压缩性能。

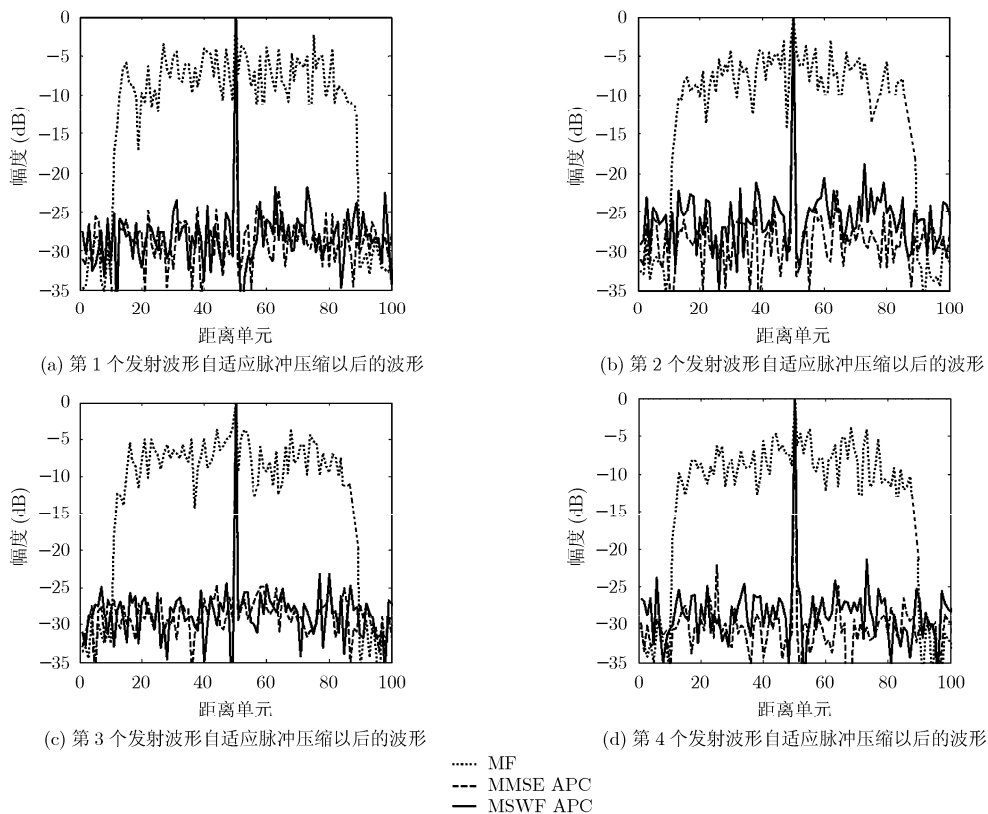


图 2 信噪比为 30 dB 时第 1 个接收阵元接收到的信号自适应脉冲压缩以后的波形

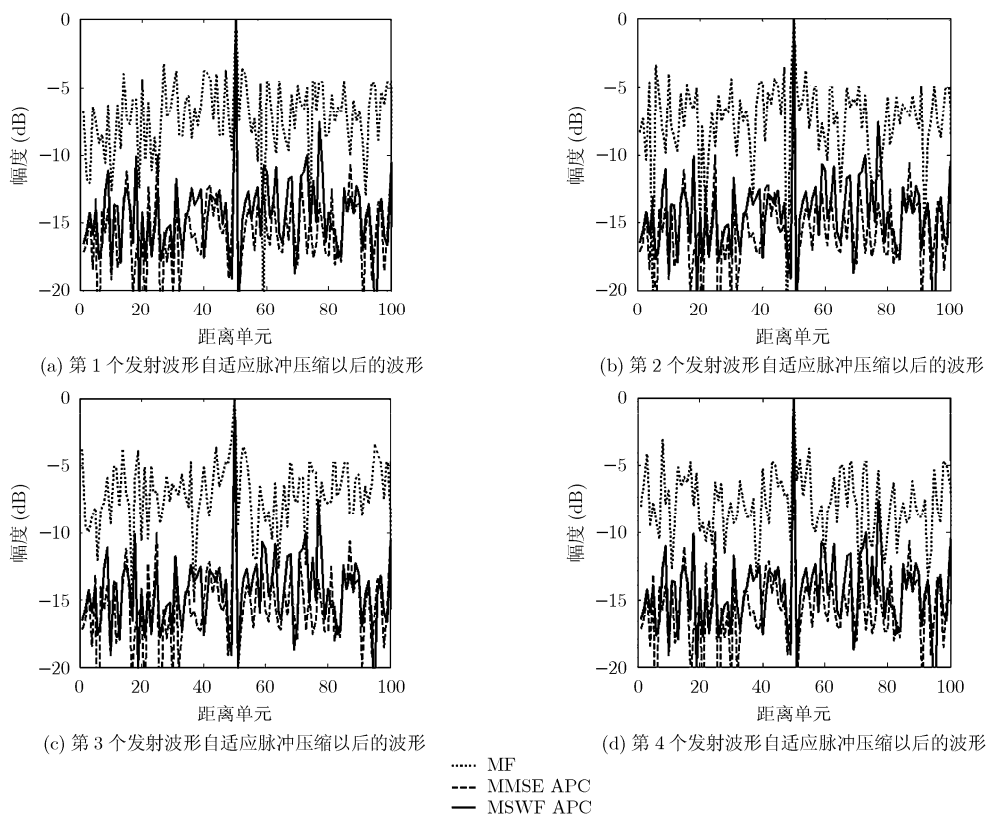


图 3 信噪比为 3 dB 时第 1 个接收阵元接收到的信号自适应脉冲压缩以后的波形

参 考 文 献

[1] Li Jian, Stoica P, Xu Lu-zhou, and Roberts W. On parameter identifiability of MIMO radar [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2007, 14(12): 968-971.

- [2] Xu Lu-zhou, Li Jian, and Stoica P. Target detection and parameter estimation for MIMO radar systems [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2008, 44(3): 927-939.
- [3] 董伟, 李建东, 吕卓, 赵林靖. 基于 MUSIC 和 ML 方法的 MIMO 系统参数估计. 电子与信息学报, 2008, 30(7): 1552-1556.
Dong Wei, Li Jian-dong, Lü Zhuo, and Zhao Lin-jing. Parameter estimation for MIMO system based on MUSIC and ML methods. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(7): 1552-1556.
- [4] Blunt S D and Gerlach K. Multistatic adaptive pulse compression[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(3): 891-902.
- [5] Blunt S D and Gerlach K. Adaptive pulse compression via MMSE estimation [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(2): 572-583.
- [6] Li N, Tang J, and Peng Y N, Adaptive pulse compression of MIMO radar based on GSC. *Electronics Letters*, 2008, 44(20): 1217-1218.
- [7] Honig M L and Goldstein J S. Adaptive reduced-rank interference suppression based on the multistage wiener filter [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2002, 50(6): 986-994.
- [8] Ricks D C, Cifuentes P G, and Goldstein J S. Adaptive beamforming using the multistage Wiener filter with a soft stop. The Thirty-Fifth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove CA, November, 2001: 1401-1406.
- [9] Deng Hai. Polyphase code design for orthogonal netted radar systems [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, 52(11): 3126-3135.
- 张娟: 女, 1979年生, 博士生, 研究方向为阵列信号处理、MIMO 雷达及自适应信号处理.
- 张林让: 男, 1966年生, 教授, 研究方向为自适应信号处理、阵列信号处理.
- 徐青: 女, 1979年生, 讲师, 研究方向为阵列信号处理、自适应信号处理.
- 杨志伟: 男, 1980年生, 讲师, 研究方向为雷达运动目标检测.