

## 一种有效的 MIMO 雷达自适应脉冲压缩方法

张 娟 张林让 刘 楠

(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:** 发射信号的分离是 MIMO 雷达的一个重要环节, 该文基于最小均方误差准则, 提出了一种有效的 MIMO 雷达自适应脉冲压缩方法, 从每个接收阵元接收到的信号中分别自适应地估计每个距离单元的脉冲压缩滤波器的权系数, 从而获得期望的脉冲压缩性能, 更好地完成发射波形的分离。该方法不仅能够抑制信号本身的距离旁瓣, 降低信号之间的互相关电平, 还对目标本身的多普勒频率具有很强的适应性。计算机仿真验证了该方法的有效性。

**关键词:** MIMO 雷达; 最小均方误差; 自适应脉冲压缩; 波形分离

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)01-0017-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2008.01509

## An Efficient Approach for Adaptive Pulse Compression of MIMO Radar

Zhang Juan Zhang Lin-rang Liu Nan

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

**Abstract:** Extraction of transmitted waveforms is an important step for MIMO radar. Based on Minimum Mean Square Error (MMSE) formulation, this paper presents a efficient approach for adaptive pulse compression filter of MIMO radar, in which weight coefficients of the filter for each individual range cell is adaptively estimated from the received signal in order to extract the transmitted waveforms better. Compared with the standard matched filter, the proposed method can suppress range sidelobe level of a transmitted waveform, and lower correlated level between different waveforms, and the algorithm's tolerance to Doppler frequency is also determined. The computer simulation proves the efficiency of the algorithm.

**Key words:** MIMO radar; MMSE; Adaptive pulse compression; Extraction of waveforms

### 1 引言

与传统雷达不同的是, MIMO 雷达在发射端发射一组相互正交的波形, 能够在空间形成多个通道, 使雷达系统的性能在很多方面得到明显的改善, 如 MIMO 雷达能够改善空间分辨率<sup>[1]</sup>, 提高参数估计的精度<sup>[2,3]</sup>, 增加可估计的最大信源数<sup>[4]</sup>等。这些性能的提高与 MIMO 雷达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。

脉冲压缩是 MIMO 雷达接收系统的一个重要组成部分, 它实现了 MIMO 雷达发射波形的分离, 在接收端形成新的导向矢量, 进而提高系统自由度。在理论上, 可以从以下两个方面实现发射波形的有效分离, (1)设计理论上完全正交的一组发射波形; (2)设计一组性能优良的脉冲压缩滤波器。理想的一组正交波形必须满足任意两个波形的互相关函数为零, 自相关函数具有很低的主副瓣比, 在实际中, 发射波形不可能做到完全正交, 有关 MIMO 雷达波形设计的文献也层出不穷<sup>[5]</sup>, 但很难设计一组波形使其满足理想正交波形的条件, 为了实现接收端

信号的分离, 必然对脉冲压缩滤波器提出了更高的要求, 传统的匹配滤波器采用发射信号时域反转之后求复共轭与接收信号卷积, 对于一个在高斯白噪声环境下固定的点目标来说, 传统的匹配滤波器能够使散射点的输出信噪比达到最大, 进而使噪声环境下散射点的检测性能达到最大, 但对于复杂目标和复杂波形来说, 传统的匹配滤波器容易造成旁瓣电平过高, 目标检测困难等问题, 文献[6]提出了一种长失配滤波器, 它以小的信噪比损失为代价在某种程度上抑制了距离旁瓣电平, 但它只局限于某些信号波形。文献[7]基于最小均方误差准则对普通单基地雷达的回波信号进行了自适应脉冲压缩, 能够有效抑制旁瓣电平, 并且指出最小均方误差准则估计滤波器的性能要优于 LS 法估计的滤波器的性能<sup>[8]</sup>。

对于 MIMO 雷达来说, 各个发射波形不能完全正交, 脉冲压缩之后的旁瓣不仅含有某一信号本身的自相关分量, 还含有与其它信号之间的互相关分量以及各个互相关分量的叠加, 匹配滤波器输出的旁瓣电平会增大, 此时, 传统的匹配滤波器已经不能满足系统的要求, 需要重新设计一种能够满足要求的脉冲压缩滤波器。本文基于最小均方误差准则,

针对 MIMO 雷达特有的回波信号模型,提出了一种有效的 MIMO 雷达自适应脉冲压缩方法,从每个接收阵元接收到的信号中分别自适应的估计每个距离单元的脉冲压缩滤波器的权系数,从而获得期望的脉压性能,更好地完成发射信号的分离。计算机仿真结果表明该方法不仅能够抑制信号本身的距离旁瓣,降低信号之间的互相关电平,还对目标的多普勒频率具有很强的适应性,使脉压之后的信号波形更接近理想正交波形匹配滤波之后的信号。

## 2 MIMO 雷达的信号模型

设 MIMO 雷达工作在窄带远场条件下,接收阵和发射阵处于同一相位中心,发射阵元数为  $M$ ,接收阵元数为  $P$ ,空间远场某一目标的波达方向为  $\theta$ ,发射导向矢量为  $\mathbf{b}(\theta)$ ,接收导向矢量为  $\mathbf{a}(\theta)$ , $M$  个发射阵元的发射信号矢量为  $\mathbf{S}(n) = [\mathbf{s}_1(n), \mathbf{s}_2(n), \dots, \mathbf{s}_M(n)]$ ,其中  $\mathbf{s}_i(n) = [\mathbf{s}_i(0)\mathbf{s}_i(1)\dots\mathbf{s}_i(N-1)]^T$ ,其中  $N$  为发射信号的长度,理想情况下,各个阵元发射信号为相互正交的一组信号,即满足

$$\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{S}(n)\mathbf{S}^H(n) = \sigma_s^2 \mathbf{I}_M \quad (1)$$

$\sigma_s^2$  为发射信号的功率,  $\mathbf{I}_M$  为  $M \times M$  的单位阵。

空间中单个目标的散射强度为  $\alpha$ ,目标的径向运动速度为  $v$ ,则由目标运动造成的多普勒频率为  $f_d = 2v/\lambda$ ,由此可得到第  $p$  个阵元天线在第  $n$  个时刻的接收信号为

$$\mathbf{y}_p(n) = \alpha \mathbf{a}_p(\theta) \mathbf{S}(n) \mathbf{b}(\theta) \exp(j2\pi f_d n) + \mathbf{w}_p(n) \quad (2)$$

其中  $\mathbf{y}_p(n)$  为第  $p$  个接收阵元的接收信号,  $\mathbf{a}_p(\theta)$  为接收导向矢量的第  $p$  个分量,  $\mathbf{w}_p(n)$  为第  $p$  个接收阵元的接收噪声,假定噪声矢量  $\{\mathbf{w}_p[n]\}_{p=1}^P$  是独立的、均值为零的复高斯变量,协方差矩阵为  $\mathbf{R}_w$ ,  $\mathbf{R}_w = \sigma_w^2 \mathbf{I}_P$ 。

令

$$\tilde{\mathbf{y}}_p(n) = [\mathbf{y}_p(n), \mathbf{y}_p(n+1), \dots, \mathbf{y}_p(n+N-1)]^T \quad (3)$$

为  $\mathbf{y}_p(n)$  在第  $n$  个时刻的连续  $N$  个时间采样,  $n = 0, 1, \dots, L-N$ ,总的快拍数为  $L$ ,令  $\mathbf{e}(n) = [\exp(j2\pi f_d n), \exp(j2\pi f_d(n+1)), \dots, \exp(j2\pi f_d(n+N-1))]^T$  则有

$$\tilde{\mathbf{y}}_p(n) = [\alpha \mathbf{a}_p(\theta) \mathbf{S}(n) \mathbf{b}(\theta)] \odot \mathbf{e}(n) + \tilde{\mathbf{w}}_p(n) \quad (4)$$

其中  $\tilde{\mathbf{w}}_p(n) = [\mathbf{w}_p(n), \mathbf{w}_p(n+1), \dots, \mathbf{w}_p(n+N-1)]^T$ ,  $\odot$  表示矩阵的 Hadamard 积。

根据 MIMO 雷达的工作原理和信号处理流程,如图 1 所示,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,每个接收阵元的接收信号分别与每个发射信号时域反转后的复共轭卷积,得到一组新的信号矢量。下

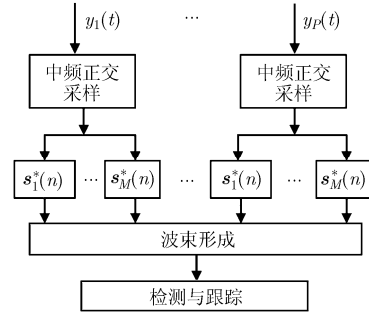


图 1 MIMO 雷达的信号处理流程图

面是第  $p$  个阵元接收的信号与第  $i$  个发射信号进行匹配之后的信号

$$\begin{aligned} Z_{pi}(n) &= \mathbf{s}_i^H(n) \tilde{\mathbf{y}}_p(n) \\ &= \alpha a_p(\theta) \mathbf{s}_i^H(n) [(\mathbf{S}(n) \mathbf{b}(\theta)) \odot \mathbf{e}(n)] + \mathbf{s}_i^H(n) \tilde{\mathbf{w}}_p(n) \\ &= \alpha a_p(\theta) b_i(\theta) \mathbf{s}_i^H(n) [\mathbf{s}_i(n) \odot \mathbf{e}(n)] + \alpha a_p(\theta) \\ &\quad \cdot \sum_{k=i}^M b_k(\theta) \mathbf{s}_i^H(n) [\mathbf{s}_k(n) \odot \mathbf{e}(n)] + \mathbf{s}_i^H(n) \tilde{\mathbf{w}}_p(n) \quad (5) \end{aligned}$$

其中  $b_k(\theta)$  为发射导向矢量的第  $k$  个分量。式(5)中,第 1 项为第  $i$  个信号的自相关分量,第 2 项为第  $i$  个信号与其它  $i-1$  个信号的互相关分量的叠加,第 3 项为噪声分量。第 1 项和第 2 项中含有目标的多普勒频率分量,多普勒频率的存在会造成常规匹配滤波器的严重失配。理想情况下,发射信号是完全正交的,式(5)中的第 2 项可以忽略,但实际工程中,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。即使是一些专门设计的正交波形,由式(5)中第 2 项引起的旁瓣电平也会很高,这里以文献[9]中设计的一组码长为 40 的相位编码信号为例,图 2 给出了第 1 个信号的自相关函数,第 1 个信号与其它 3 个信号的互相关函数以及自相关函数与各个互相关函数叠加之后的波形,可以看出互相关电平为 -7 dB,叠加以后的最高旁瓣电平为 -3 dB 左右。此时,传统的匹配滤波器对发射信号的分离效果会很差,需要寻求一种新的自适应脉冲压缩滤波器对各个发射信号进行有效的分离。

## 3 MIMO 雷达自适应脉冲压缩

设第  $p$  个接收阵元上第  $i$  个匹配滤波器的权系数为  $\mathbf{h}_{pi}(n)$ ,则滤波器的输出为

$$\mathbf{X}_{pi}(n) = \mathbf{h}_{pi}^H(n) \tilde{\mathbf{y}}_p(n) \quad (6)$$

基于最小均方误差准则构造代价函数

$$\mathbf{P}(n) = E[|\mathbf{X}_{pi}(n) - \mathbf{h}_{pi}^H(n) \tilde{\mathbf{y}}_p(n)|^2] \quad (7)$$

其中  $E[\cdot]$  表示数学期望。求得

$$\mathbf{h}_{pi}(n) = (E[\tilde{\mathbf{y}}_p(n) \tilde{\mathbf{y}}_p^H(n)])^{-1} E[\tilde{\mathbf{y}}_p(n) \mathbf{X}_{pi}^*(n)] \quad (8)$$

其中  $*$  表示复共轭运算,将  $\tilde{\mathbf{y}}_p(n)$  从式(4)中代入,并且假设期望的脉冲压缩以后的输出  $\mathbf{X}_{pi}^*(n)$  与噪声和

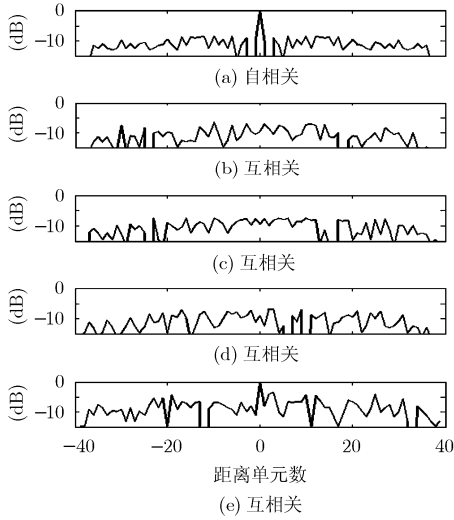


图 2 发射信号的自相关与互相关

其它发射信号无关, 则有

$$\mathbf{h}_{p_i}(n) = k(\mathbf{C}(n) + \mathbf{R}_w)^{-1}[\mathbf{s}_i(n) \odot \mathbf{e}(n)] \quad (9)$$

其中  $\mathbf{R}_w = E[\mathbf{w}_p(n)\mathbf{w}_p^H(n)]$  为噪声协方差矩阵,  $k = \alpha\alpha_p(\theta)\mathbf{X}_{p_i}(n)$ 。

$$\mathbf{C}(n) = |\alpha|^2 \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^M \mathbf{b}_i(\theta)\mathbf{b}_k^*(\theta) \sum_{g=-N+1}^{N-1} \tilde{\mathbf{s}}_i(g, n)\tilde{\mathbf{s}}_k^H(g, n) \quad (10)$$

其中

$$\tilde{\mathbf{s}}_i(g, n) = \begin{cases} \left[ \underbrace{0, \dots, 0}_g, \mathbf{s}_i(0), \mathbf{s}_i(1)e^{j2\pi f_d}, \dots, \mathbf{s}_i(N-g-1)e^{j2\pi(N-g-1)f_d} \right]^T, & n > 0 \\ \left[ \mathbf{s}_i(-n)e^{j2\pi(-n)f_d}, \dots, \mathbf{s}_i(N-1)e^{j2\pi(N-1)f_d}, \underbrace{0, \dots, 0}_g \right]^T, & n \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

从式(10)可以看出,  $\mathbf{C}(n)$  是半正定矩阵,  $\mathbf{R}_w$  为正定矩阵, 因此  $\mathbf{C}(n) + \mathbf{R}_w$  为正定矩阵, 是可逆的。

由于在计算过程中缺乏距离像  $\mathbf{X}_{p_i}(n)$  的先验知识, 因此初始的距离像的估计可以采用传统的匹配滤波器来获得。

整个算法分为以下几个步骤:

(1) 采用式(5)中传统匹配滤波器来估计脉冲压缩滤波器输出的初始值,  $\mathbf{X}_{p_i}^0(n) = \mathbf{Z}_{p_i}(n)$ ;

(2) 利用式(10)计算  $\mathbf{C}(n)$ , 利用式(9)计算  $\mathbf{h}_{p_i}(n)$ , 再利用式(6)来估计当前脉冲压缩滤波器的输出  $\mathbf{X}_{p_i}^l(n)$ , 其中  $l$  为迭代次数;

(3) 重复第(2)步, 直到达到系统期望的主副瓣比和脉冲压缩滤波器的输出波形。

迭代次数越多, 脉冲压缩滤波器的输出的性能

越好, 但是计算量也会越大。

## 4 计算机仿真

为了证明该算法的有效性, 对上述算法进行了仿真, 仿真时, 目标为点目标, MIMO 雷达包含 4 个发射阵元和 4 个接收阵元, 发射阵与接收阵处于同一相位中心。发射信号采用文献[9]中设计的一组码长为 40 相位编码信号, 整个仿真过程迭代了 3 次, 以下对 3 种情况下传统匹配滤波器的性能和本文提出方法的性能分别进行了比较和分析。第 1 种情况为目标静止, 信噪比为 40 dB; 图 3 给出了第 1 个阵元接收到的信号分别对 4 个发射信号进行分离的结果。由图 3 可以看出第 1 个发射信号经过常规的匹配滤波器之后, 最高副瓣电平为 -2.5 dB, 而经过本文的自适应脉冲压缩方法之后, 最高副瓣电平可下降到 -17.2 dB, 第 2 个发射信号经过两种不同方法分离之后的最高副瓣电平分别为 -3 dB 和 -20.5 dB, 第 3 个信号分离之后的最高副瓣电平分别为 -2.9 dB 和 -20 dB, 第 4 个信号经过两种不同方法分离之后的最高副瓣电平分别为 -3.5 dB 和 -24.3 dB。与传统匹配滤波器相比, 本文提出的方法使得 MIMO 雷达脉冲压缩滤波器的输出信号的最高副瓣电平下降到原来的 1/7。

第 2 种情况为目标静止, 信噪比为 0 dB, 图 4 给出了第 1 个阵元接收到的信号对每个发射信号的分离结果。第 1 个发射信号经过两种方法分离之后的最高副瓣电平分别为 -1.6 dB 和 -10.3 dB, 第 2 个发射信号分离之后的最高副瓣电平分别为 -1.8 dB 和 -11.3 dB, 第 3 个发射信号分离之后的最高副瓣电平分别为 -3.5 dB 和 -21.4 dB, 第 4 个发射信号经过两种不同方法分离之后的最高副瓣电平分别为 -3.1 dB 和 -18.8 dB。与传统匹配滤波器相比, 本文提出的方法使输出信号的最高副瓣电平下降到原来的 1/6。

第 3 种情况取信噪比为 40 dB, 且目标存在多普勒频移的情形, 目标的多普勒频率为 1000 Hz。图 5 给出了第 1 个阵元接收到的信号分别对每个发射信号的分离结果。由图中可以看出, 多普勒频率的存在导致了匹配滤波器的严重失配, 目标所在的距离单元出现了偏移, 本文提出的自适应脉冲压缩滤波器能够很好的将发射信号分离出来, 在第 40 个距离单元处出现明显的峰值, 并且最高副瓣电平只有 -18 dB 左右。说明本文提出的方法对多普勒频率具有很好的适应性。

## 5 结束语

对于 MIMO 雷达来说, 各个发射波形很难做到

完全正交，脉冲压缩之后的旁瓣不仅含有某一信号本身的自相关分量，还含有与其它信号之间的互相关分量，此时，传统的匹配滤波器已经不能满足系统的要求，需要重新设计一种能够满足要求的脉冲压缩滤波器。本文提出的 MIMO 雷达自适应脉冲压缩方法，是基于最小均方误差准则，从每个接收阵

元接收到的信号中分别自适应地估计每个距离单元的脉冲压缩滤波器的权系数，从而获得期望的脉压性能，更好地完成发射信号的分离。该方法不仅能够抑制信号本身的距离旁瓣，降低信号之间的互相关电平，还具有很好的多普勒适应性，使脉压之后的信号波形接近理想正交波形匹配滤波之后的信

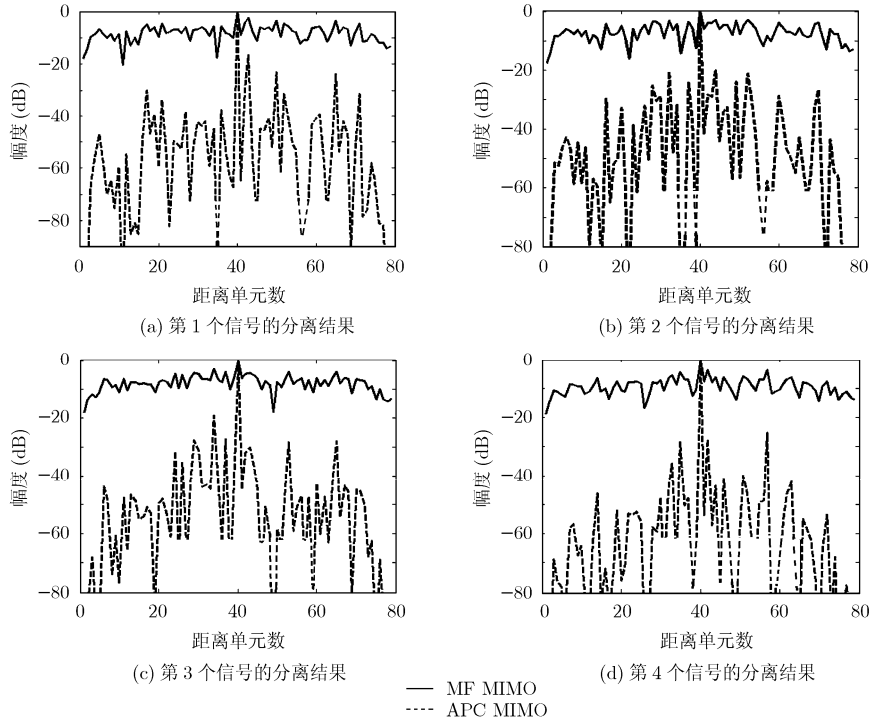


图 3 信噪比为 40 dB 时 第 1 个阵元的接收信号对各个发射信号的分离结果

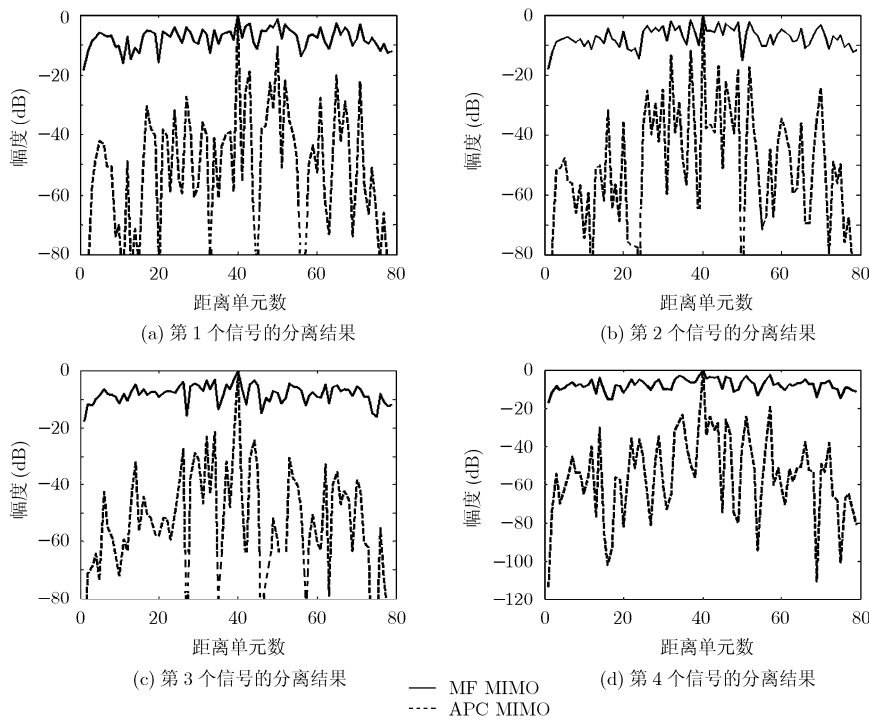


图 4 信噪比为 0 dB 时 第 1 个阵元的接收信号对各个发射信号的分离结果

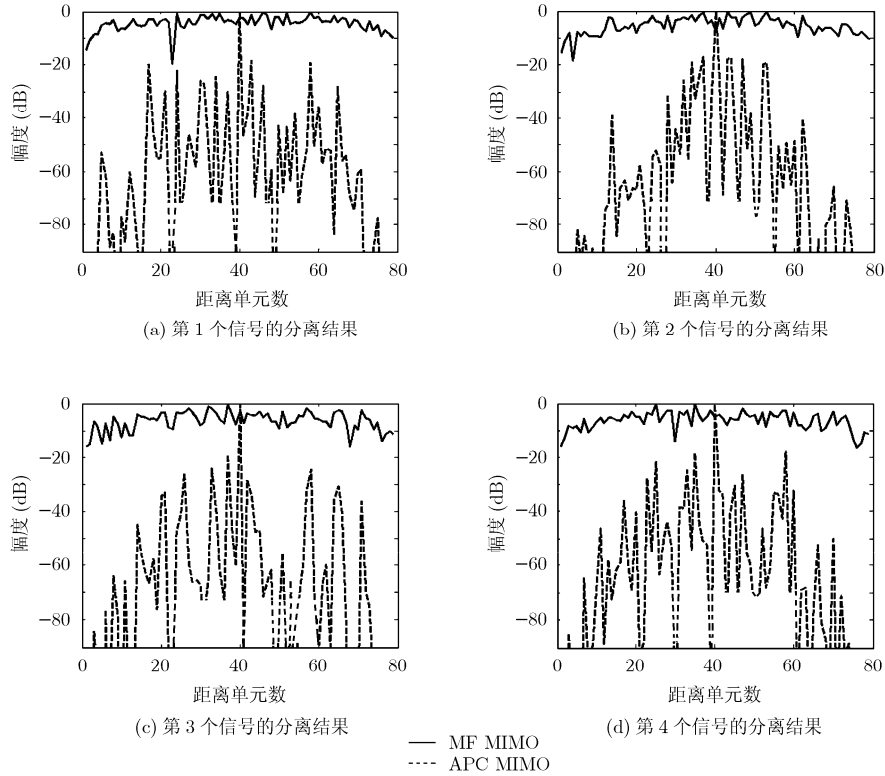


图 5 信噪比为 40 dB，目标运动时第 1 个阵元的接收信号对各个发射信号的分离结果

号。计算机仿真验证了该方法的有效性。

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. Adaptive techniques for MIMO radar [C]. *IEEE International Conference on Radar*, Shanghai, 2006: 258-262.

[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, Li 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] Bliss D W and Forsythe K W. Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) radar and imaging: Degrees of freedom and resolution [C]. *IEEE Thirty-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*. California, 2003, 1(9): 54-59.

[5] Yang Yang and Blum R S. MIMO radar waveform design based on mutual information and minimum mean-square

error estimation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 43(1): 330-343.

[6] Blinchikoff H J. Range sidelobe reduction for the quadriphase codes [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 39(2): 711-718.

[7] Blunt S D and Gerlach K. Adaptive compression via MMSE estimation [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(2): 572-583.

[8] Song S M, Kim W M, Park D, and Kim Y. Estimation theoretic approach for radar pulse compression processing and its optimal codes [J]. *Electronic Letters*, 2000, 36(3): 250-252.

[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。

刘 楠: 男, 1981年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理、阵列信号处理。