

发射分集 MIMO 雷达融合成像处理方法

王怀军 许红波 朱宇涛 粟毅

(国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘 要: 发射分集 MIMO 雷达具有潜在的高分辨成像能力, 但成像时存在高旁瓣问题。为分析它的成像性能, 该文首先建立了发射分集 MIMO 雷达的成像模型。通过空间频谱的支撑区分布, 阐明了分集成像的高分辨性能, 并着重分析了其旁瓣特性。基于谱外推的思想, 提出了一种发射分集 MIMO 雷达融合成像处理方法, 该方法能够实现 MIMO 雷达高分辨成像同时具有良好的旁瓣性能。仿真实验验证了该文所提方法的有效性。

关键词: MIMO 雷达; 发射分集; 融合成像; 空间频谱

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)01-0007-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2008.01809

Fusion Imaging Method for MIMO Radar with Transmit Diversity

Wang Huai-jun Xu Hong-bo Zhu Yu-tao Su Yi

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: MIMO radar with transmit diversity has the potential of high-resolution imaging, but the imaging results suffer from huge sidelobes. In order to analyze the imaging performance of MIMO radar, this paper establishes an imaging model firstly. The high-resolution ability of diversity is demonstrated from spatial spectral coverage, and the sidelobe performance of diversity image is analyzed in particular. Based on spectral extrapolation, a fusion imaging method for MIMO radar with transmit diversity is proposed. This method can achieve high-resolution images with good sidelobe performance. Finally, simulations are performed in order to validate the effectiveness of the proposed method.

Key words: MIMO radar; Transmit diversity; Fusion imaging; Spatial spectrum

1 引言

雷达技术的迅速发展使得传统雷达观念、体系结构不断得到更新, 同时现代雷达日益增加的任务和挑战也催生出许多先进雷达体制。MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 雷达^[1-3]就是近年来引入到雷达领域中的一种全新雷达体制, 有着广泛的应用前景。MIMO 雷达的收发阵列以空间卷积^[4]形式实现对目标的实时采样, 能够得到远多于实际阵元数目的观测通道和自由度^[5]。通过联合处理多通道回波数据, MIMO 雷达在检测定位、空间高分辨、参数辨识、及抗截获等多方面^[2,3,6,7]相对于传统雷达显著提高了雷达性能, 而其中利用空间高分辨能力实现对空中目标的成像探测是 MIMO 雷达技术的一个重要研究内容。

从空间频谱的角度看, 雷达成像就是要获取目标空间频谱一定的支撑区分布, 通过傅里叶反演来得到目标的图像^[8]。发射阵列分集配置的 MIMO 雷达有能力获取大角度的空间谱域支撑区分布, 从而

利用较少的收发天线数目就可实现高分辨成像。但当 MIMO 雷达发射阵列分集配置时目标空间频谱支撑区会出现空缺, 这将导致成像结果中高旁瓣产生, 严重影响成像质量。围绕解决发射分集 MIMO 雷达成像中的高旁瓣问题, 文章以下的内容安排为: 第 2 节首先建立了发射分集 MIMO 雷达成像模型, 分析了分集成像的旁瓣特性。为了实现 MIMO 雷达高分辨低旁瓣成像, 第 3 节提出基于谱外推的融合成像方法。第 4 节进行了成像仿真实验, 点散射目标模型的成像结果验证了本文所提方法的有效性。最后对全文进行了总结。

2 成像性能分析

2.1 成像模型

M 发 N 收 MIMO 雷达对 2 维目标进行成像探测, 其中发射阵列分集配置, 接收阵列密集布阵, 如图 1 所示。

图 1 中 L 表示接收阵列的孔径长度, d_t 和 d_r 分别表示发射阵元间距和接收阵元间距, α_m 和 θ 则表示目标相对于发射阵元 m 和整个接收阵列的方向角。定义发射阵元 $m(m = 1, 2, \dots, M)$ 的位置坐标为

2008-12-29 收到, 2009-09-21 改回

国家部委基金项目资助课题

通信作者: 王怀军 nuddt_wanghuaijun@tom.com

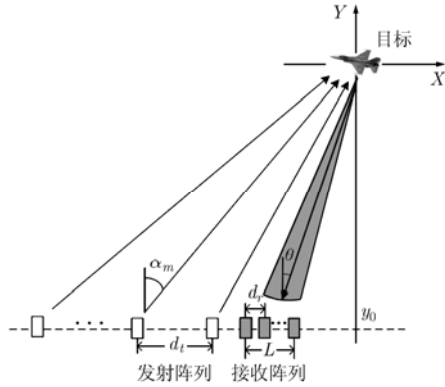


图 1 MIMO 雷达成像示意图

$(x_{t,m}, y_0)$, 接收阵元的位置坐标为 $(x_{r,n}, y_0)$, 目标函数为 $f(x, y)$, 则接收端通过正交分选后, 由发射阵元 m 发射, 接收阵元 n 接收的基带回波信号可以表示为

$$r_m(x_{r,n}, \omega) = \iint f(x, y) e^{-j(\omega + \omega_0)(r_{t,m} + r_{r,n})/c} dx dy \quad (1)$$

式(1)中 c 表示光速, ω_0 为载频, $r_{r,n} = \sqrt{(x_{r,n} - x)^2 + (y_0 - y)^2}$ 表示目标到接收阵元 n 的距离, $r_{t,m} \approx r'_{t,m} + x \sin \alpha_m + y \cos \alpha_m$ (其中 $r'_{t,m} = \sqrt{x_{t,m}^2 + y_0^2}$) 为发射阵元 m 到目标距离的远场表示式。对式(1)作关于变量 $x_{r,n}$ (假设为连续变量)的空间傅里叶变换, 可得

$$R_m(k_{rx}, k) = e^{jy_0 \sqrt{k^2 - k_{rx}^2} - j r'_{t,m} k} \cdot \iint f(x, y) e^{-j[x(k_{rx} + k \sin \alpha_m) + y(\sqrt{k^2 - k_{rx}^2} + k \cos \alpha_m)]} dx dy \quad (2)$$

其中 $k = (\omega + \omega_0)/c$ 。式(2)又可表示为目标空间频谱的对应形式^[9]:

$$\hat{R}_m(k_{rx}, k) = F(k_{rx} + k \sin \alpha_m, \sqrt{k^2 - k_{rx}^2} + k \cos \alpha_m) \quad (3)$$

其中 $\hat{R}_m(k_{rx}, k) = R_m(k_{rx}, k) e^{j r'_{t,m} k - j y_0 \sqrt{k^2 - k_{rx}^2}}$, $F(k_x, k_y)$ 为目标函数的 2 维空间傅里叶变换。式(3)中的波散射关系为

$$\left. \begin{aligned} k_x &= k_{rx} + k \sin \alpha_m \\ k_y &= \sqrt{k^2 - k_{rx}^2} + k \cos \alpha_m \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

最后, 对式(3)进行 2 维逆傅里叶变换即可得到目标的空间分布图像。

2.2 旁瓣特性

由于 MIMO 雷达系统有 M 个发射阵元, 式(3)其实包含 M 个空间频谱表达式, 这样目标谱域的支撑区也相应由 M 个填充区域组成, 每个填充区域的范围可以通过式(4)来确定。

图 2 简单示意了 $M = 2$ 时空间谱域支撑区的分布。根据式(4), 各个填充区域是以发射波数矢量 $(k \sin \alpha_m, k \cos \alpha_m)$ 为圆心, 以 k 为半径的一系列扇弧

组成。发射阵列分集配置将扩展支撑区的分布范围, 由此得到大角度的谱域填充, 进而实现高分辨成像。一般在发射分集情况下有 $d_t \gg d_r$, 而且通常满足 $d_t > L$, 这样发射分集 MIMO 雷达虽然可以得到大的方位谱宽, 但是方位向却存在频谱缺失, 如图 2 中填充区域 1 和区域 2 之间的间隙部分, 这将严重影响成像结果的旁瓣特性。

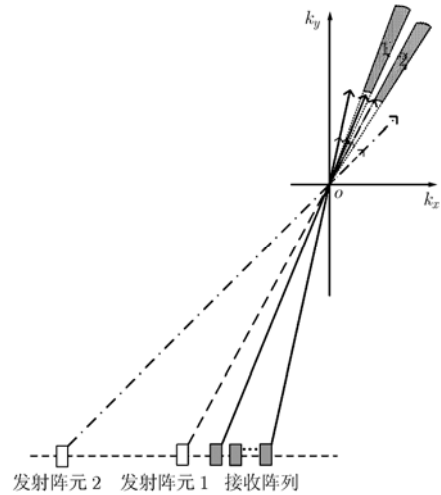


图 2 空间频谱支撑区分布

由于支撑区的间隙出现在方位向, 下面仅以 1 维情况下的空间频谱来说明频谱空缺对成像性能的影响, 这时谱域的 2 维支撑区分布函数使用 1 维孔径函数 $A(k_x)$ 来代替。为简便又能说明问题, $A(k_x)$ 表示为以下形式:

$$A(k_x) = \begin{cases} 1, & k_{x,\min} \leq |k_x| \leq k_{x,\max} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

其中 $k_{x,\max} > k_{x,\min} > 0$, 这时式(5)实际上是由两个有间隙的矩形窗组成, 分别对应两个发射阵元的填充区域孔径分布。这一孔径函数的傅里叶反演为

$$a(x) = \frac{4}{x} \cos \frac{(k_{x,\max} + k_{x,\min})x}{2} \sin \frac{(k_{x,\max} - k_{x,\min})x}{2} \quad (6)$$

对式(5)积分时 $(-k_{x,\min}, k_{x,\min})$ 这个区间是置零处理的, 这会导致冲激响应函数 $a(x)$ 的高旁瓣产生。例如, 式(6)中的参数设置为 $k_{x,\min} = 0.2\pi$, $k_{x,\max} = \pi$ 时, $a(x)$ 的峰值旁瓣比(PSLR)约为 -6.2 dB, 可见其旁瓣电平很高, 并且随着其空缺部分长度的增加, PSLR 会越来越高。

3 融合成像方法

为了得到高质量的成像结果, 发射分集 MIMO 雷达必须采用融合成像的处理方法, 而融合成像的关键在于如何处理其多个存在间隙的空间频谱填充

区域。目前关于缺失频谱的处理方法有很多，如 Super-SVA^[10]，GAPES^[11]等等，但本质上这些方法都是基于谱估计技术来预测缺失频谱的。因此，本文下面也将基于谱外推的思想来实现融合成像。

3.1 空间频谱的预处理

通过式(4)的波散射关系可以看出，MIMO 雷达空间谱域支撑区的分布是非常复杂的。式(3)中 $\hat{R}_m(k_{rx}, k)$ 的变量 k_{rx} 和 k 是均匀分布的，因为接收阵列是均匀线阵，同时距离向也是均匀采样，这样实际中的空间傅立叶变换可以通过 FFT 来实现，但由于 k_{rx} 和 k 是耦合在一起的，IFFT 成像之前首先需要解耦合。另外对于不同发射阵元的距离和方位向频谱分布(即 k_y 和 k_x)都是不均匀的，这是由发射波数矢量 $(k \sin \alpha_m, k \cos \alpha_m)$ 的不同所造成的，频谱外推前需要对各个填充区域进行统一的均匀化。融合成像首先需要解决这两个问题，下面将通过插值方法来处理。

2维频谱 $\hat{R}_m(k_{rx}, k)$ 均匀离散化为 $I \times J$ 的2维矩阵形式 $\{\hat{R}_m(k_{rx,i}, k_j)\}_{i,j=1}^{I,J}$ ，而后确定统一的均匀频率序列 $\{k_{x,p}\}_{p=1}^P$ 和 $\{k_{y,q}\}_{q=1}^Q$ ，对各个发射阵元的填充区域进行均匀化处理。均匀化可以通过插值来完成，而具体待插值变量 k_{rx} 和 k 可由式(4)求得

$$\left. \begin{aligned} k_{rx} &= \frac{k_{x,p}^2 \sin \alpha_m + 2k_{x,p}k_{y,q} \cos \alpha_m - k_{y,q}^2 \sin \alpha_m}{2k_{y,q} \cos \alpha_m + 2k_{x,p} \sin \alpha_m} \\ k &= \frac{k_{x,p}^2 + k_{y,q}^2}{2k_{y,q} \cos \alpha_m + 2k_{x,p} \sin \alpha_m} \end{aligned} \right\} (7)$$

插值处理后的2维频谱可以表示为

$$R(k_{x,p}, k_{y,q}) = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \hat{R}_m(k_{rx,i}, k_j) h(k_{rx} - k_{rx,i}, k - k_j) \quad (8)$$

式(8)是多个谱域填充区域的联合表示形式，其中 $h(x, y)$ 表示2维插值核函数。插值核函数的选择有很多种，如三角函数、样条函数等等。

3.2 AR 模型谱外推

基于自回归(AR)模型的谱外推技术已被用于高分辨雷达成像^[12,13]，并取得了很好的效果。AR模型是一种基于线性谱估计的全极点模型，利用它来对成像系统获取的频域数据进行距离或方向的外推，从而改善成像时的距离或方位分辨率。经过预处理后，MIMO雷达的空间频谱已经去除了距离向和方位向的2维耦合，这时2维频谱的相位与频率序列 $k_{x,p}$ 和 $k_{y,q}$ 是线性的关系，所以利用AR模型来预测MIMO雷达谱域的缺失频谱将是合理的。

2维频谱 $\{R(k_{x,p}, k_{y,q})\}_{p,q=1}^{P,Q}$ 在距离向上是没有间隙的，但在方位向上则是由 M 个填充区域组成，这

可以通过频率序列 $\{k_{x,p}\}_{p=1}^P$ 的下标表示为 M 个区间： $(B_1, E_1), (B_2, E_2), \dots, (B_M, E_M)$ ，满足 $1 = B_1 < E_1 < B_2 < E_2 < \dots < B_M < E_M = P$ ，在区间内部频谱是存在的，而在区间之间则是缺失的，即 $\{R(k_{x,p}, k_{y,q_0})\}_{p=E_m}^{B_{m+1}} = 0$ ，其中 k_{y,q_0} 为任意的距离向频率序列取值。AR模型谱外推就是要对相邻两个区间分别进行前后向预测来估计它们之间的缺失频谱，即对 (B_m, E_m) 区间进行前向预测，对 (B_{m+1}, E_{m+1}) 区间进行后向预测来内插 $[E_m, B_{m+1}]$ 之间的数据。前后向预测模型可以表示如下：

$$R_L(k_{x,p}, k_{y,q_0}) = -\sum_{i=1}^L a_L(i) R(k_{x,p-i}, k_{y,q_0}), \quad p = E_m, E_m + 1, \dots, B_{m+1} - 1, B_{m+1} \quad (9)$$

$$R_H(k_{x,p}, k_{y,q_0}) = -\sum_{i=1}^H a_H^*(i) R(k_{x,p+i}, k_{y,q_0}), \quad p = B_{m+1}, B_{m+1} - 1, \dots, E_m + 1, E_m \quad (10)$$

式(9)为前向预测模型， L 和 $a_L(i)$ 分别表示其阶数和系数；式(10)为后向预测模型， H 和 $a_H^*(i)$ 表示它的阶数和系数。模型的系数可以利用Burg算法^[14]求得，模型的阶数则可利用最终预测误差(FPE)准则或阿凯克信息准则(AIC)^[14]来估计，这里不做过多的叙述。

理论分析和实际经验均表明，信号外推长度越大，预测误差就会越大。由此， $[E_m, B_{m+1}]$ 之间的数据可以取为式(9)和式(10)加权和^[13]的形式：

$$R(k_{x,p}, k_{y,q_0}) = \frac{B_{m+1} - p}{B_{m+1} - E_m} R_L(k_{x,p}, k_{y,q_0}) + \frac{p - E_m}{B_{m+1} - E_m} R_H(k_{x,p}, k_{y,q_0}) \quad (11)$$

改变距离频率 k_{y,q_0} 的取值，使其遍历整个距离频率序列 $\{k_{y,q}\}_{q=1}^Q$ ，从而得到区间 $[E_m, B_{m+1}]$ 上的预测数据。对各个间隙区间都进行上述的AR模型谱外推处理，最终将得到完整的空间频谱支撑区域，而后进行融合反演成像，从而得到高分辨低旁瓣的成像结果。

4 成像仿真实验

为了验证MIMO雷达融合成像方法的有效性，本节将通过点散射目标模型进行仿真实验，实验中MIMO雷达收发阵列共线排布(位于直角坐标系中直线 $y = 10000$ m)。发射阵列包含3个发射阵元，横向坐标分别为-120 m，0 m和120 m，接收阵列则分布于横向上 $[-30, 30]$ m 区间内，间距为1 m。目标分别采用单散射点和多散射点模型，单点目标位于直角坐标系的原点，多点目标包含4个散射点，分别位于边长为3 m以原点为中心的正方形的4个顶点。发

射信号为同频带的正交相位编码信号^[15], 中心频率 10 GHz, 带宽 150 MHz。

由于发射阵列分集配置, MIMO 雷达系统所获取的 2 维空间频谱在方位向是有缺失的。单点目标情况下, 经过预处理后的 2 维频谱如图 3 所示。图 3 中矩形框 1, 矩形框 2 和矩形框 3 分别对应 3 个发射阵元的填充区域, 可以看出它们之间是有间隙的。为此, 采用 AR 模型谱外推的方法预测图 3 中的缺失频谱, 结果见图 4。

由图 4 可以看出, 经过 AR 模型外推后图 3 中的空缺区域已经被去除, 填充区域 1, 2, 3 连接成一个没有间隙的大矩形区域。分别对外推前和外推后的 2 维频谱进行傅里叶反演成像, 成像结果如图 5 所示。

由于外推前的频谱是有缺失的, 这将会影响成像结果的旁瓣性能(见图 5(a), 5(b)), 图 5(a) 中单点目标像主瓣的方位向两侧出现了很强的旁瓣, 这会使得强目标响应的旁瓣掩盖或干扰附近弱目标的主瓣。图 5(b) 中多目标成像结果的旁瓣性能更差, 这时多个目标的强旁瓣相互叠加在一起, 情况严重时很难分辨出目标真实的空间分布情况。图 5(c) 和图 5(d) 分别为频谱外推后单点目标和多点目标的成像结果, 其旁瓣性能得到了明显改善, 外推前成像结果中的强旁瓣干扰得到较好的抑制。为了进一步衡量成像结果的旁瓣特性, 下面来考察单点目标的距离/方位向剖面结果。

图 6 为点目标成像结果的距离和方位向剖面分布, 由于谱外推是沿方位向进行, 并没有改变距离向谱域支撑区的分布, 所以距离向的分布结果没有发生变化。方位向的缺失频谱外推后得到补偿, 从图 6(b) 中可以看出, 方位向旁瓣性能得到了改善。分别计算频谱外推前和外推后成像结果的空间分辨率、峰值旁瓣比(PSLR)和积分旁瓣比(ISLR), 其中空间分辨率取为冲激响应的 3 dB 主瓣宽度, 计算结果见表 1。

表 1 成像质量参数

	外推前	外推后
距离向分辨率(m)	1.0	1.0
方位向分辨率(m)	0.9	0.9
距离向 PSLR(dB)	-13.3	-13.3
方位向 PSLR(dB)	-5.9	-15.8
距离向 ISLR(dB)	-10.2	-10.2
方位向 ISLR(dB)	-3.5	-12.9

由于频谱外推是对频谱支撑区的缺失部分进行补偿, 支撑区的横纵向扩展并没有改变, 所以外推前与外推后的空间分辨率是一致的, 同时距离向的 PSLR 和 ISLR 也都没有发生变化。而外推前方位向频谱的缺失导致其方位向 PSLR 和 ISLR 分别高达 -5.9 dB 和 -3.5 dB, 外推后则降低为 -15.8 dB 和 -12.9 dB。比较上述成像质量参数可以看出, 基于 AR 模型谱外推的融合成像方法取得了好的成像结果。

5 结论

发射分集 MIMO 雷达能够实现对空中目标的大角度空间采样, 具有高分辨成像的潜能, 但发射分集同时也导致成像时存在高旁瓣的问题。为了解决这个问题, 本文以 MIMO 雷达的成像模型为切入点, 分析了发射分集条件下目标空间频谱的分布情况, 阐明了高旁瓣产生的原因, 而后提出了基于谱外推的 MIMO 雷达融合成像处理方法, 该方法对解耦合后的 2 维空间频谱进行了方位向的内插外推处理, 得到了完整的空间频谱支撑区分布。最后的成像仿真实验验证了这种融合成像处理方法的有效性。

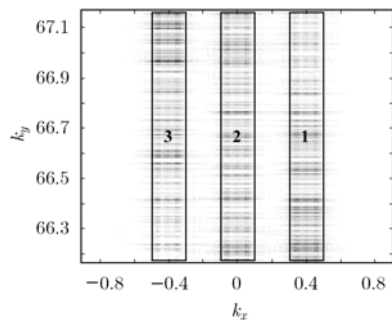


图 3 预处理后的空间频谱

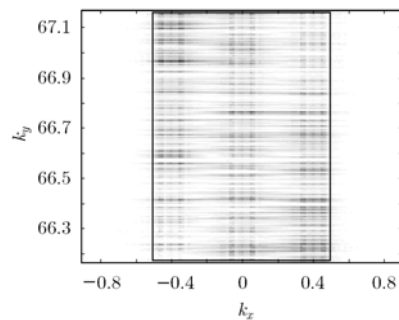


图 4 谱外推后的空间频谱

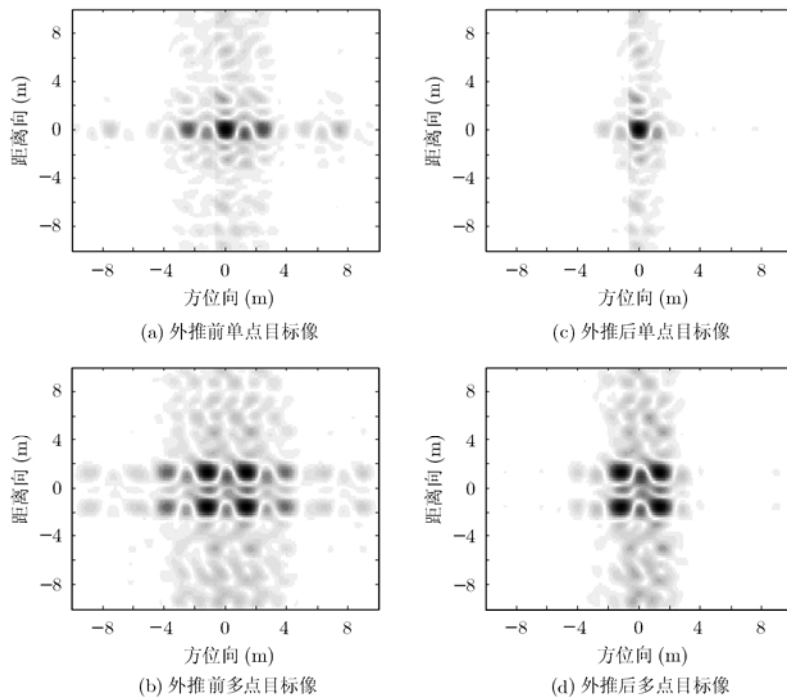


图 5 成像结果

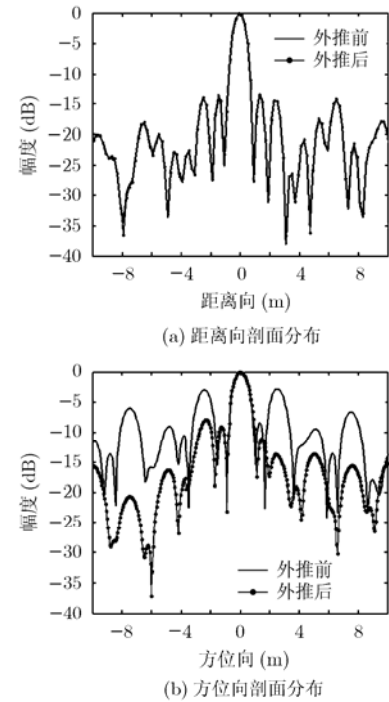


图 6 点目标成像剖面图

参 考 文 献

- [1] Fishler E, Haimovich A, and Blum R, *et al.* MIMO radar: an idea whose time has come. Proceedings of the IEEE Radar Conference, Philadelphia, PA, Apr. 2004: 71-78.
- [2] Li J and Stoica P. MIMO radar with colocated antennas. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, 24(5): 106-114.
- [3] Haimovich A M, Blum R S, and Cimini L J. MIMO radar with widely separated antennas. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(1): 116-129.
- [4] Robey F C, Coutts S, and Weikle D, *et al.* MIMO radar theory and experimental results. Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, System and Computers, California, Nov 2004: 300-304.
- [5] Li J, Stoica P, and Zheng X. Signal synthesis and receiver design for MIMO radar imaging. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(8): 3959-3968.
- [6] Wang H J and Su Y. Narrowband MIMO radar imaging with two orthogonal linear T/R arrays. The 9th international conference on signal processing proceedings, Beijing, Oct. 2008: 2513-2516.
- [7] Li J, Xu L, and Stoica P, *et al.* Range compression and waveform optimization for MIMO radar: A Cramer-Rao bound based study. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(1): 218-232.
- [8] Murch R D and Chan T K K. Improving microwave imaging by enhancing diffraction tomography. *IEEE Transactions on Microwave and Techniques*, 1996, 44(3): 379-388.
- [9] 王怀军, 粟毅, 朱宇涛, 等. 基于空间谱域填充的MIMO雷达成像研究. *电子学报*, 2009, 37(6): 1242-1246.
- [10] Stankwitz H C and Kosek M R. Sparse-aperture fill for SAR using super-SVA, Proceedings of the IEEE National Radar Conference, Ann Arbor, MI, USA, May 1996: 70-75.
- [11] Larsson E G, Stoica P, and Li J. Amplitude spectrum estimation for two-dimensional gapped data. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, 50(6): 1343-1354.
- [12] Nuthalapati R M. High resolution reconstruction of ISAR images. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1992, 28(2): 462-472.
- [13] Moore T G, Zuerndorfer B W, and Burt E C. Enhanced imagery using spectral-estimation-based techniques. *Lincoln Laboratory Journal*, 1997, 10(2): 171-186.
- [14] 皇甫堪, 陈建文, 楼生强. 现代数字信号处理. 北京: 电子工业出版社, 2003: 220-222.
Huang Fu-kan, Chen J W, and Lou S Q. Modern Digital Signal Processing. Beijing: Publishing house of electronics industry, 2003: 220-222.
- [15] Deng H. Polyphase code design for orthogonal netted radar systems. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, 52(11): 3126-3135.

王怀军: 男, 1980年生, 博士生, 从事雷达成像与阵列设计的研究。

许红波: 男, 1979年生, 博士生, 从事阵列信号处理的研究。

朱宇涛: 男, 1980年生, 博士生, 从事ISAR成像的研究。

粟毅: 男, 1961年生, 教授, 博士生导师, IEEE会员, 主要从事信号处理、雷达系统、遥感信息处理的研究。