

分布式多通道雷达成像技术

韩兴斌 胡卫东 郁文贤 杜小勇
(国防科技大学 ATR 重点实验室 长沙 410073)

摘要: 该文针对稀疏分布的多发射/接收阵元所形成的多通道雷达系统,提出了一种分布式多通道雷达成像技术。利用发射/接收阵元角度分集和信号分集的特点,将各个通道上的信号进行相干合成获得在目标散射函数波数域二维支撑域上的等效观测。经过支撑域整形和数据重采样,可反演出目标散射函数的二维图像。该雷达成像系统不需要庞大的天线,只需要多通道雷达的单次快拍即可成像,从而避免了 ISAR 成像中的运动补偿问题。并且由于采样点在波数上的位置已知,可对重构的目标二维散射函数进行准确地定标。文中给出了具有宽带发射信号的多通道成像系统,仿真结果表明了该系统具有很好的成像性能。

关键词: 多通道雷达; 稀疏阵列; 雷达成像

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)10-2354-05

An Imaging Technique Based on Distributed Multi-channel Radars

Han Xing-bin Hu Wei-dong Yu Wen-xian Du Xiao-yong
(ATR Key Lab. National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: This paper proposes a non-cooperative target imaging technique based on the distributed multi-channel radar system, which consists of multiple sparsely-located transmitters and receivers. By coherently processing the signals received in multiple radar channels, the wave-number samples in a plane are obtained, from which the two-dimensional reflectivity function of target is reconstructed. Due to the simultaneous formation of multi-channel echo data and coherent processing of a single "snap", it does not require large antennas, and the complicated motion compensation performed in ISAR imaging is not needed. Meanwhile, the reconstructed images are naturally scaled because the sampling locations in wave-number space are known. To validate the imaging performance, the distributed radar systems with wide-band transmitted signal are designed respectively, and the simulations are demonstrated.

Key words: Multi-channel imaging; Sparse array; Radar imaging

1 引言

固定站址的高分辨雷达探测空中非合作目标时,一般通过发射宽带信号来获得纵向距离的高分辨率,而横向距离的高分辨可用不同的方式实现。一种方式是采用实孔径技术。此时,根据天线理论,在雷达波长一定的情况下横向分辨率由天线的尺寸决定。因此,高分辨雷达为获得高的横向分辨率需要庞大的天线系统,各个天线阵元之间的相位校正困难^[1,2]。另一种实现方式采用逆合成孔径雷达(ISAR)技术,通过区分不同散射点的转动多普勒频率获得横向距离上的高分辨。但ISAR成像过程中需要补偿目标径向运动引起的相位误差,由于目标的运动信息是未知的,也难以准确地测量,而且目标的运动常常比较复杂。因此运动补偿问题一直是逆合成孔径雷达成像中的难点,也限制了ISAR技术的广泛应用。

2004年,一种新的雷达体制——多输入多输出(MIMO)雷达——受到了雷达界的关注^[3,4]。该雷达系统借鉴了通信中的多输入多输出技术,设置了多个发射阵元且发射信号相互正交。相应地,系统利用分布式配置的多个接收阵元接收目标回波信号,形成多个输入-输出通道。MIMO雷达系统利用收/发阵元的分集,可以抑制目标角闪烁对雷达性能的影响,以提高雷达的检测和跟踪性能^[5,6]。综合脉冲孔径雷达^[7,8]是一种新型的米波雷达,它也使用稀疏排列的多个发射/接收阵元,利用相互正交的发射信号,来提高对微弱目标的探测能力。上述系统都是利用多输入多输出技术提高雷达的检测和跟踪能力。文献[9]中利用稀疏排列的多个接收阵元,通过最大似然波数形成技术来提高雷达的纵向分辨率和横向分辨率,该方法的难点在于目标像中旁瓣的抑制。

本文综合利用分布式雷达体制和多输入多输出的信号处理方法,提出了一种分布式雷达多通道成像技术。

2 分布式多通道雷达的观测信号模型

设分布式多通道雷达系统收发分置,排列有 M 个发射

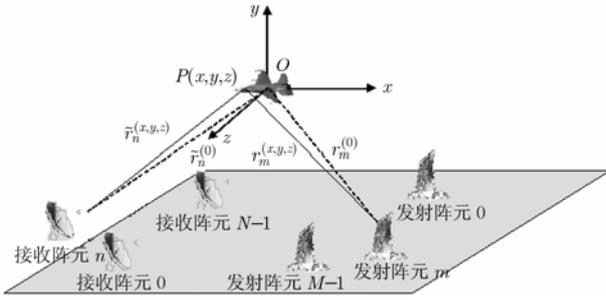


图 1 分布式多通道雷达的示意图

阵元, N 个接收阵元, 如图 1 所示。一对发射/接收阵元形成一个信号通道, 因此系统中共有 $M \times N$ 个通道。在目标上建立坐标系 XYZ , 其中坐标系的原点 O 与发射阵元 m 之间的距离为 $r_m^{(0)}$, 与接收阵元 n 之间的距离为 $\tilde{r}_n^{(0)}$ 。考察目标上的一散射点 P , 其坐标值为 (x, y, z) , P 点与发射阵元 m 之间的距离为 $r_m^{(x,y,z)}$, 与接收阵元 n 之间的距离为 $\tilde{r}_n^{(x,y,z)}$ 。设发射阵元 m 的发射信号为

$$s_m(t) = a_m(t) \text{rect}[(f - f_0)/B] \exp\{j2\pi ft\} \quad (1)$$

其中 $a_m(t)$ 为信号的复包络, f 为发射信号的频率, $\text{rect}[(f - f_0)/B]$ 为矩形窗, 这里假设各个发射信号具有相同的频带 B 和中心频率 f_0 。并且各个发射信号的复包络之间相互正交^[10], 满足下式

$$\int a_m(t) a_k^*(t + \tau) dt = \delta(\tau) \delta(m - k), \quad 0 \leq m, k \leq M - 1 \quad (2)$$

目标上散射点 P 在 t 时刻接收到的信号 $s_{x,y,z}(t)$ 为 M 个发射信号延迟后的叠加, 即

$$s_{x,y,z}(t) = \sum_{m=0}^{M-1} a_m \left[t - r_m^{(x,y,z)} / (c - v_m t / c) \right] \cdot \text{rect}[(f - f_0)/B] \cdot \exp\{j2\pi f [t - r_m^{(x,y,z)} / (c - v_m t / c)]\} \quad (3)$$

其中 c 为光速, v_m 为目标相对于阵元 m 的径向速度。到达目标位置的雷达电磁能量经目标散射后, 并由接收阵元进行接收。在高频区, 雷达目标散射特性通常可以用散射中心模型来描述。假定在所有发射阵元和接收阵元的视线方向上目标极化散射特性保持一致, 目标多中心散射模型保持不变。设接收阵元 n 接收到的雷达回波为 $\tilde{s}_n(t)$, 则有

$$\tilde{s}_n(t) = \iiint_V \sigma(x, y, z) \sum_{m=0}^{M-1} a_m \cdot \left[t - \left(r_m^{(x,y,z)} + \tilde{r}_n^{(x,y,z)} + v_m t + \tilde{v}_n t \right) / c \right] \cdot \text{rect}[(f - f_0)/B] \cdot \exp\{j2\pi f [t - (r_m^{(x,y,z)} + \tilde{r}_n^{(x,y,z)} + v_m t + \tilde{v}_n t) / c]\} \cdot dx dy dz \quad (4)$$

其中 $\sigma(x, y, z)$ 为目标散射函数, \tilde{v}_n 为目标相对于阵元 n 的径向速度。相对整个包络的长度, 由散射点位置不同和目标速

度引起包络延迟的差异较小, 通常可以忽略。并且目标的速度通常为每秒几百米, 而信号的脉冲宽度通常为微秒的量级, 因此, 由速度引起的相位变化通常可以忽略, 式(4)可化为

$$\tilde{s}_n(t) = \text{rect}[(f - f_0)/B] \sum_{m=0}^{M-1} a_m(t - r_m^{(0)}/c - \tilde{r}_n^{(0)}/c) \cdot \iiint_V \sigma(x, y, z) \exp\{j2\pi f(t - r_m^{(x,y,z)}/c - \tilde{r}_n^{(x,y,z)}/c)\} dx dy dz \quad (5)$$

N 个接收机将各自接收到的回波信号进行混频和匹配滤波处理, 得到目标的观测数据。各个接收机的结构相同, 下面以接收机 n 为例, 说明接收机的信号处理过程。首先将目标回波信号进行混频, 去掉载频项。接收机设计 M 个信号处理通道, 其中每一个通道为一个发散信号的匹配滤波器。去掉载频之后的信号通过第 k 个信号处理通道时, 由于该通道为发射信号 $a_k(t)$ 的匹配滤波器, 并根据式(2)中的正交性条件, 则信号经匹配滤波之后的输出为

$$s_n^{(k)}(t) = \int_R \tilde{s}_n(\tau) a_k^*(\tau - t) d\tau = E_{kn} \delta(t - r_m^{(0)}/C - \tilde{r}_n^{(0)}/C) \quad (6)$$

在 $t = r_m^{(0)}/C + \tilde{r}_n^{(0)}/C$ 时刻对匹配滤波器的输出进行采样, 得到采样值 E_{kn} 。多个接收机的多个通道形成观测集 $\{E_{mn}\}_{m,n=0}^{M-1,N-1}$, 其观测方程为

$$E_{mn} = \text{rect}[(f - f_0)/B] \iiint_V \sigma(x, y, z) \cdot \exp\{-j2\pi f (r_m^{(x,y,z)} + \tilde{r}_n^{(x,y,z)})/C\} dx dy dz, \quad m = 1, \dots, M, \quad n = 1, \dots, N \quad (7)$$

上述观测表达式, 给出了观测集 $\{E_{mn}\}_{m,n=0}^{M-1,N-1}$ 与目标散射函数 $\sigma(x, y, z)$ 之间的关系。

3 分布式多通道雷达成像技术

如何从观测数据集 $\{E_{mn}\}_{m,n=0}^{M-1,N-1}$ 中反演出目标的散射函数, 是分布式多通道雷达成像中的一项关键技术。

3.1 一般的三维成像模型

考察目标坐标系 XYZ 中的点 P , 如图 2 所示, 其坐标为 (x, y, z) 。设某一雷达阵元至点 P 的矢量为 \mathbf{R}^P , 至坐标原点的矢量为 \mathbf{R}^o , 坐标原点 O 至 P 点的矢量为 \mathbf{P} , 矢量 \mathbf{I}_{Los} 为目标坐标系中雷达视线方向的单位矢量, 其方位角为 α , 俯仰角为 θ 。当雷达和目标之间的距离远大于目标的尺寸时, 有下面的近似公式

$$|\mathbf{R}^P| \approx |\mathbf{R}^o| + \mathbf{P} \cdot \mathbf{I}_{\text{Los}} \quad (8)$$

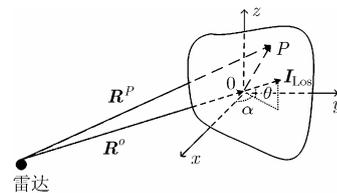


图 2 雷达目标示意图

式(8)写成标量的形式为

$$r^{(x,y,z)} \approx r^{(0)} + x \cos \theta \cos \alpha + y \cos \theta \sin \alpha + z \sin \theta \quad (9)$$

根据式(9), 观测表达式(7)可化为

$$\begin{aligned} E_{mn} = & d_{mn} \text{rect} \left[(f - f_0) / B \right] \iiint_V \sigma(x, y, z) \\ & \cdot \exp \left\{ -j2\pi \frac{f}{C} \left[x \left(\cos \theta_m^t \cos \alpha_m^t + \cos \theta_n^r \cos \alpha_n^r \right) \right. \right. \\ & + y \left(\cos \theta_m^t \sin \alpha_m^t + \cos \theta_n^r \sin \alpha_n^r \right) \\ & \left. \left. + z \left(\sin \theta_m^t + \sin \theta_n^r \right) \right] \right\} dx dy dz \\ & m = 1, \dots, M, \quad n = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (10)$$

其中 α_m^t , θ_m^t 分别为发射阵元 m 的方位角和俯仰角, 而 α_n^r , θ_n^r 分别为接收阵元 n 的方位角和俯仰角, $d_{mn} = \exp \left\{ -j2\pi \frac{f}{C} (r_m^{(0)} + \tilde{r}_n^{(0)}) \right\}$ 。根据坐标原点与各雷达的距离可对观测数据中的固定相位项 $\{d_{mn}\}_{m,n=0}^{M-1,N-1}$ 进行校正, 在不混淆的情况下将校正后的观测数据仍记为 $\{E_{mn}\}_{m,n=0}^{M-1,N-1}$ 。定义连续的波数域变量

$$\left. \begin{aligned} k_x &= f/C \left(\cos \theta^t \cos \alpha^t + \cos \theta^r \cos \alpha^r \right) \\ k_y &= f/C \left(\cos \theta^t \sin \alpha^t + \cos \theta^r \sin \alpha^r \right) \\ k_z &= f/C \left(\sin \theta^t + \sin \theta^r \right) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

则经过校正后的观测表达式(10)可写为

$$\begin{aligned} E(k_x, k_y, k_z) = & W(k_x, k_y, k_z) \iiint_V \sigma(x, y, z) \\ & \cdot \exp \left\{ -j2\pi (xk_x + yk_y + zk_z) \right\} dx dy dz \end{aligned} \quad (12)$$

其中有限的雷达信号带宽和视线方向变化范围在波数域形成窗函数

$$W(k_x, k_y, k_z) = \begin{cases} 1, & (k_x, k_y, k_z) \in \Omega \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

式中 Ω 为波数域的数据支撑域。式(12)表明, 观测集 $\{E_{mn}\}_{m,n=0}^{M-1,N-1}$ 是目标散射函数 $\sigma(x, y, z)$ 的波数域 $E(k_x, k_y, k_z)$ 的一系列采样, 可以通过傅氏反变换求得目标散射函数。

3.2 线性阵列条件下的二维成像

本文从简单的线性阵列入手分析分布式多通道雷达的成像问题。假设发射阵元和接收阵元排列在水平位置的一条直线上。不失一般性, 使得目标坐标系的 Z 轴垂直于雷达视线平面, 则 $\theta_m^t = \theta_n^r = 0$, $m = 0, 1, \dots, M-1$, $n = 0, 1, \dots, N-1$ 。于是雷达的观测表达式(12)可写为

$$\begin{aligned} E(k_x, k_y) = & W(k_x, k_y) \iint_S \sigma(x, y) \\ & \cdot \exp \left\{ -j2\pi (xk_x + yk_y) \right\} dx dy dz \end{aligned} \quad (13)$$

其中 $W(k_x, k_y)$ 为波数域采样平面上的窗函数, 空间谱域变量为

$$\left. \begin{aligned} k_x &= f/C \cdot \left(\cos \alpha^t + \cos \alpha^r \right) \\ k_y &= f/C \cdot \left(\sin \alpha^t + \sin \alpha^r \right) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

在不引起混淆的情况下将目标三维散射函数在二维成像平面上的投影仍记为 $\sigma(x, y)$ 。

但是由式(14)可知波数域的数据支撑域不是矩形, 为应用傅里叶变换重构目标像, 需要插值运算获得波数域矩形区域内的采样。由此, 可以得到线性阵列成像的基本算法:

步骤 1 计算各个观测值在波数域上的位置;

步骤 2 通过插值和补零运算, 得到波数域一个矩形区域内均匀间隔上的采样值;

步骤 3 IFFT 运算, 重构二维目标散射函数。

3.3 波数域采样点的分布规律

由于波数域函数采样的加窗效应, 采样点的位置直接影响着最后的成像结果。根据式(14)中波数矢量的定义, 可以获得关于波数域采样点的如下重要性质。

性质 1 固定一发射阵元的发射信号, 经各个接收阵元匹配接收后, 各接收阵元的观测数据正好位于波数域中的一族圆弧上, 且圆弧的圆心和半径与发射信号的波长有关。

固定一个发射阵元, 则式(14)中发射阵元的方位角 α^t 固定。并且设信号波长 $\lambda = C/f$ 为参变量, 接收阵元的方位角 α^r 为变量。考察在一定信号波长条件下, 波数域采样点的分布, 由式(14)经变换可得

$$\left(k_x - \cos \alpha^t / \lambda \right)^2 + \left(k_y - \sin \alpha^t / \lambda \right)^2 = 1 / \lambda^2 \quad (15)$$

式(15)表明对于固定的发射阵元, 在一定的信号频率下, 波数域的采样点落在一个圆上, 其圆心为 $(\cos \alpha^t / \lambda, \sin \alpha^t / \lambda)$, 半径为 $1/\lambda$ 。由于接收阵列方位角 α^r 一般仅在一个小的角度内变化, 所以采样点仅对应了圆上的一段弧。若信号频率变化, 波数域采样点对应了另外一段弧线。因此任意一个发射阵元的发射信号, 经各个阵元接收后, 观测数据在波数域上对应了一族弧线。

性质 2 固定一发射阵元的发射信号, 经各个接收阵元匹配接收后, 这些采样点会落在波数域中一族过原点的直线上, 该直线的斜率与接收阵元、发射阵元的方位角有关。

固定一个发射阵元, 则式(14)中发射阵元的方位角 α^t 固定, 并且假设接收阵元的方位角 α^r 为参变量, 信号波长 $\lambda = C/f$ 为变量。考察在一定的接收阵元方位角下, 波数域采样点的分布规律。将波数域变量的定义式(14)中的两式做比值容易得

$$k_y = \frac{\sin \alpha^t + \sin \alpha^r}{\cos \alpha^t + \cos \alpha^r} k_x = \tan \left[(\alpha_m^t + \alpha_n^r) / 2 \right] k_x \quad (16)$$

所以对于固定一个发射阵元的信号, 由某一个接收阵元获得的观测数据在波数域上对应了一条直线, 该直线与 k_x 轴的夹角为 $(\alpha_m^t + \alpha_n^r) / 2$ 。接收阵元改变, 观测数据对应了另一条直线。所以任一发射阵元的发射信号, 经各个接收阵元匹配接收后, 观测采样点在波数域上对应了一族过原点的直线。

综合上面的两个性质可知, 固定一发射阵元的发射信号, 经各个接收阵元匹配接收后, 这些采样点会分布在波数域中一族直线和一族弧线的交点上, 如图 3 波数域采样点分布规律示意图所示。发射阵元不同, 得到另一组交点。所以,

在波数域上观测采样点分布在圆弧族和过原点的直线族的交点上。

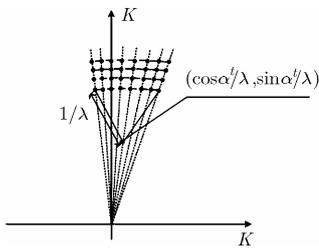


图 3 波数域采样点分布规律示意图

4 成像仿真试验

为验证上述分布式雷达多通道成像技术, 给出如下仿真试验。雷达系统中的各个发射阵元发射相同的宽带信号, 其带宽为 50MHz, 频率变化范围为 3G 至 3.05GHz。8 个发射阵元和 8 个接收阵元关于 Y^r 轴对称地排列在 X^r 轴上, 如图 4 (a)所示。相邻接收阵元之间的间距相等, 为 2500m。发散阵元 0 和接收阵元 $N/2 - 1$ 位置相同, 其它的发射阵元间隔地分布在接收阵元 $N/2 - 1$ 和接收阵元 $N/2$ 之间。发射阵元和接收阵元这样的排列规律, 使得观测数据在波数域上的采样点近似均匀地排列在一起, 保证成像具有较好的分辨率和不模糊距离。目标设定为包含 9 个散射点的理想散射体, 并且散射点的散射幅值相同。设定初始时刻, 目标中心在雷达坐标系 $X^r Y^r$ 中的坐标为 $(0, 2 \times 10^5)$ m。目标的速度为 600m/s, 其中速度矢量方向与 X^r 轴的夹角为 30° 。在目标中心位置建立目标坐标系, 其坐标轴与坐标系 $X^r Y^r$ 中的坐标轴平行。在目标坐标系中, 目标散射点的分布如图 4(b)所示。观测数据在波数域中的支撑域如图 4(c)所示, 近似为矩形。根据第 3.3 节中的成像算法, 最后得到的成像结果如图 4(d)所示。

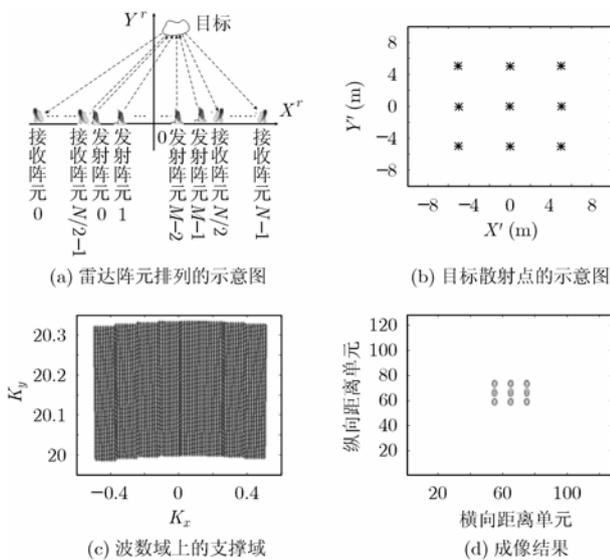


图 4 点目标理想散射体的仿真结果

5 结束语

本文提出了一种分布式多通道雷达成像技术, 该技术利用稀疏排列的多个阵元发射和接收信号, 形成多个信号通道, 将各个通道上的接收信号相干合成获得目标的二维像。该成像系统不需要庞大的天线系统, 并且由于成像数据为同一时刻目标散射回波在各个通道上的采样, 避免了 ISAR 成像中的运动补偿问题。另外, 观测数据在波数域上的采样位置是已知的, 因而可以对获得的目标二维像进行准确地定标。由于采用了多通道信号处理方式, 尚需进一步研究如下问题: (1)相位误差校正。发射阵元发射雷达信号, 由目标反射后由接收阵元接收, 整个过程中电磁波传播的路程在各个通道中存在着差异, 会在接收信号中引入相位误差。只有实现了相位校正之后, 才能进行多通道信号的相干合成。(2)线性阵列条件下的分辨率分析。成像分辨率受阵元视线方向的变化范围和发射信号的频带宽度的影响。考察它们之间的关系, 有利于整个雷达系统的设计。

参考文献

- [1] Steinberg B D, Carlson D L, and Lee W. Microwave imaging of aircraft [J]. *In Proc. IEEE*, 1988, 76(12): 1578-1592.
- [2] Steinberg B. Radar imaging from a distorted array: The radio camera algorithm and experiments [J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1981, 29(5): 740-748.
- [3] Fishler E, Haimovich A, Blum R, Chizhik D, Cimini L, and Valenzuela R. MIMO radar: an idea whose time has come [C]. *Proceedings of the IEEE Radar Conference*, Philadelphia, PA, April 2004: 71-78.
- [4] Forsythe K W, Bliss D W, and Fawcett G S. Multiple-input multiple-output (MIMO) radar: performance issues [C]. *The Thirty-Eighth Conference on Signals Systems and Computers*, California, Nov. 2004, 1: 310-315.
- [5] Fishler E, Haimovich A, Blum R, Cimini R, Chizhik D, and Valenzuela R. Performance of MIMO radar systems: advantages of angular diversity [C]. *the Thirty-Eighth Conference on Signals Systems and Computers*, California, Nov. 2004, 1: 305-309.
- [6] Bliss D W and Forsythe K W. Multiple-input multiple-output (MIMO) radar and imaging: degrees of freedom and resolution [C]. *The Thirty-Seventh Conference on Signals, Systems and Computers*, Asilomar, CA., Nov. 2003, 1: 54-59.
- [7] 保铮, 张庆文. 一种新型的米波雷达—综合脉冲和孔径雷达[J]. *现代雷达*, 1995, 17(2): 1-13.
- [8] Bao Zheng and Zhang Qing-wen. A new style metric wave radar[J]. *Modern Radar*, 1995, 17(2): 1-13.
- [8] 陈伯孝, 张守宏, 综合脉冲孔径雷达的主要特点及其“四抗”

- 性能[J]. 西安电子科技大学学报, 1997, 24(12):140-146.
- Chen Bai-xiao and Zhang Shou-hong, A study of the multiple performance for sparse-array synthetic impulse and aperture radar. *Journal of Xidian University*, 1997, 24(12): 140-146.
- [9] Kirk D R, Bergin J S, Techau P M, and Carlos J E D. Multi-static coherent sparse aperture approach to precision target detection and engagement [C]. 2005 IEEE International Radar Conference, Arlington, Virginia, USA, May 2005: 579-584.
- [10] Hai Deng, Polyphase code design for orthogonal netted radar systems [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2004, 52(11): 3126-3135.
- 韩兴斌: 男, 1977年生, 博士生, 从事雷达信号处理与目标识别方面的研究.
- 胡卫东: 男, 1967年生, 教授, 博士生导师, 主要从事数据融合、雷达目标识别的科研教学, 已发表论文十余篇.
- 郁文贤: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域有智能信息处理、目标识别、数据融合.
- 杜小勇: 男, 1976年生, 博士生, 从事雷达信号处理与目标识别方面的研究.