

基于 MIMO 噪声雷达的高速运动目标检测

陈金立 顾红 苏卫民

(南京理工大学电子工程与光电技术学院 南京 210094)

摘要: 针对传统体制雷达对高速运动目标不能进行长时间有效相参积累检测问题, 该文提出了一种基于MIMO噪声雷达的高速运动目标检测方法。该方法利用MIMO噪声雷达在短时间内输出的多路回波数据进行相参并行处理来取代回波数据的长时间相参积累检测, 以避免距离走动, 径向速度变化以及反射截面积(RCS)快起伏等非平稳因素对目标检测的影响, 有效实现了多个高速运动目标的无模糊检测。仿真结果验证了MIMO噪声雷达在高速运动目标检测方面的优越性。

关键词: MIMO 雷达; 噪声雷达; 高速运动目标检测

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)06-1350-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00839

High Speed Moving Target Detection Using MIMO Noise Radar

Chen Jin-li Gu Hong Su Wei-min

(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: It is difficult for the traditional radar to detect effectively the high speed moving target with the long time coherent integration method. In this paper, Multi-Input Multi-Output (MIMO) noise radar, in which the parallel coherent processing of the multi-channel echo data in a short time is exploited to replace the long time coherent integrative detection, is used for high speed moving target detection. Thus the detection performance of MIMO noise radar may not be affected by the range migration, the radial velocity variety and the fast Radar Cross-Section (RCS) fluctuation. Then the multiple high speed moving targets can be effectively detected without range ambiguities with MIMO noise radar. Simulations verify the superiority of MIMO noise radar on high speed moving target detection.

Key words: MIMO radar; Noise radar; High-speed moving target detection

1 引言

传统体制雷达一般通过长时间的多脉冲相参积累检测(如脉冲压缩和多普勒处理等)来提高雷达对弱小目标的检测性能。现代国防越来越多地受到高速武器的威胁, 例如高速飞行的导弹和无人侦察机等; 在航天领域, 随着人类太空活动日益频繁, 高速飞行的空间碎片也越来越多, 这对卫星和飞船等也构成了不小的威胁。目标的超高速运动会使目标的径向距离变化率(径向速度)呈现出较高次幂的变化, 同时使目标在回波积累时间内跨多个距离单元运动^[1,2]。因此, 目标的高机动性会导致传统脉冲压缩和多普勒处理无法聚焦信号能量, 从而无法实现有效的谱峰检测和参数估计。为了使高速运动目标

的回波信号能够长时间有效相参积累, 人们提出的方法有检测前跟踪技术^[3], 基于时频分析的积累检测方法^[4]以及基于包络插值移位补偿算法^[5]等。但是, 这些算法的计算量太大, 不利于工程应用, 而且在低信噪比情况下它们的相参积累实现困难, 导致其积累效率比较低, 此外这些算法需要保证目标的反射截面积(RCS)在较长时间内保持恒定, 但是高速运动目标由于其位置和姿态角变化迅速, 导致其RCS快起伏^[6], 因此在长时间内认为高速运动目标的RCS恒定是不切实际的。

文献[7]提出了一种分布式雷达多通道成像技术, 它通过单次快拍空间并行采样取代逆合成孔径雷达(ISAR)中长时间多脉冲采样, 从而避免了时间上的多脉冲采样对不同时刻观测回波的运动补偿问题。由于目标在很短的时间内距离走动不会超过半个距离单元, 径向速度变化和RCS波动也是很微小的, 即可以认为在短时间内目标的回波信号在相同

2009-06-03 收到, 2009-12-01 改回

国家自然科学基金(60672075)资助课题

通信作者: 陈金立 cheng820803@yahoo.com

的距离单元上是相参的,可以有效地进行相参积累^[8,9]。因此,除了对回波信号进行长时间多脉冲相参积累检测外,在短时间内对雷达输出的多路回波数据进行相参并行处理也是一条可行的途径。基于此想法,结合最近发展起来的MIMO(Multiple-Input Multiple-Output)雷达技术^[10-13],本文研究了基于MIMO噪声雷达的高速运动目标检测方法。MIMO雷达的结构与传统阵列雷达类似,都是采用多个发射和接收天线。MIMO雷达由于其发射阵列的发射信号相互正交,因此在空间不形成高增益的窄波束;而在接收端可以形成大的虚拟阵列孔径,能提高雷达的角度分辨力以及最大可检测的目标数量^[11]。MIMO噪声雷达由于其发射信号的无周期性、随机性以及发射波束的全向性,因此不会产生周期性的距离模糊并具有良好的低截获性能^[12]。

本文首先建立了超高速运动目标的MIMO噪声雷达的回波信号模型,然后利用脉冲压缩-波束形成方法^[13],对短时间内输出的多路回波数据进行相参并行处理,以避免距离走动、径向速度变化和RCS波动等非平稳因素对目标检测的影响,有效实现了多个高速运动目标的无模糊检测,最后仿真结果验证了该方案的可行性。

2 高速目标的MIMO噪声雷达回波信号模型

如图1所示,单基地MIMO雷达的发射和接收阵列为均匀线阵,由 M 个发射阵元和 N 个接收阵元组成,其中发射阵元间距和接收阵元间距分别记为 d_t 和 d_r 。在图1中,以雷达中心为坐标原点建立2维直角坐标系,假设高速运动目标作匀速直线飞行,它的起始位置坐标为 (x_0, y_0) ,速度矢量为 $\mathbf{V} = (v_x, v_y)$,其中 v_x, v_y 分别为目标速度 \mathbf{V} 在 x 轴和 y 轴上的投影,取 v_x 和 v_y 分别指向 x 轴和 y 轴正向时为正,反之取负。则目标相对于雷达的瞬时距离可近似表示为

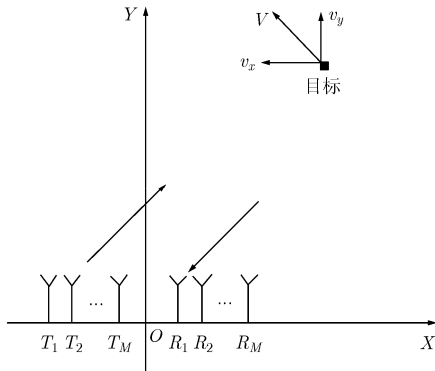


图1 单基地MIMO雷达结构示意图

$$R(t) = \sqrt{(x_0 + v_x t)^2 + (y_0 + v_y t)^2} \quad (1)$$

对式(1)求导,可得目标的瞬时径向距离变化率(径向速度)为

$$\frac{dR(t)}{dt} = \frac{(x_0 + v_x t)v_x + (y_0 + v_y t)v_y}{\sqrt{(x_0 + v_x t)^2 + (y_0 + v_y t)^2}} \quad (2)$$

因此高速运动目标的瞬时多普勒频率为

$$f_d(t) = -\frac{2}{\lambda} \cdot \frac{dR(t)}{dt} = -\frac{2}{\lambda} \cdot \frac{(x_0 + v_x t)v_x + (y_0 + v_y t)v_y}{\sqrt{(x_0 + v_x t)^2 + (y_0 + v_y t)^2}} \quad (3)$$

式中 λ 为载波波长。

MIMO噪声雷达的各发射阵元同时发射相互正交的窄带噪声调频信号,它们具有相同的载频 f_0 和信号带宽 B 。第 m 个发射阵元的发射信号可表示为^[14]

$$s_m(t) = \sqrt{\frac{P_T}{M}} \exp\{j[2\pi f_0 t + \theta_m(t)]\} \quad (4)$$

式中 f_0 为载波频率; P_T 为MIMO雷达的总发射功率; $\theta_m(t) = 2\pi K_{FM} \int_0^t e_m(t') dt'$,其中 K_{FM} 为调频斜率, $e_m(t')$ 为零均值、广义平稳的高斯调制噪声。

假设高速运动目标位于发射和接收阵列的远场位置,其中目标相对发射阵列和接收阵列的方位角为 θ ,那么接收阵列的目标回波信号可表示为

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{A}(\theta) \alpha \mathbf{B}^T(\theta) \mathbf{S}(t - \text{tr}(t)) e^{j2\pi f_d(t)t} + \boldsymbol{\omega}(t) \quad (5)$$

式中 $\mathbf{r}(t) = [r_1(t), r_2(t), \dots, r_N(t)]^T$ 为接收阵列的输出信号矢量; $(\cdot)^T$ 表示矩阵或矢量的转置; α 表示目标的散射系数; $\mathbf{S}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)]^T$ 为发射阵列在时刻 t 的发射信号矢量; $\mathbf{A}(\theta) = [1, e^{-j(2\pi/\lambda)d_t \sin\theta}, \dots, e^{-j(2\pi/\lambda)(N-1)d_t \sin\theta}]^T$ 是一 $N \times 1$ 维矢量,称之为接收引导矢量; $\mathbf{B}(\theta) = [1, e^{-j(2\pi/\lambda)d_r \sin\theta}, \dots, e^{-j(2\pi/\lambda)(M-1)d_r \sin\theta}]^T$ 是一 $M \times 1$ 维矢量,称之为发射引导矢量; $\text{tr}(t) = 2R(t)/c$ 为雷达接收到的目标回波信号相对于发射信号的延时; $f_d(t)$ 为瞬时多普勒频率; $\boldsymbol{\omega}(t) = [\omega_1(t), \omega_2(t), \dots, \omega_N(t)]^T$ 为在时刻 t 的噪声矢量,它的各元素相互独立,服从零均值复高斯分布,即 $\boldsymbol{\omega}(t) \sim N^c(0, \sigma_w^2 \mathbf{I}_N)$ 。

3 MIMO噪声雷达的高速运动目标检测

在长时间多脉冲积累时,高速运动目标的回波信号易出现距离走动、径向速度变化以及RCS波动,这就使得目标能量扩散,尤其当回波信号的信噪比很低时,目标易湮没在噪声背景中。一般情况下,在足够短时间内,高速运动目标的距离走动不会超过半个距离单元以及径向速度变化和RCS波动也是很微小的,即可以认为在短时间内目标的回

波信号可以进行有效地相参积累。对一帧短时间回波信号进行采样, 设 AD 采样频率等于噪声调频信号的带宽, 即 $f_s = B = 1/\tau$, 其中 τ 为采样间隔时间, 那么经混频、低通滤波以及 AD 采样后的接收阵列回波信号矢量可表示为

$$\mathbf{r}(k) = \sqrt{\frac{P_T}{M}} \mathbf{A}(\theta) \alpha \sum_{m=1}^M e^{-j(2\pi/\lambda)(m-1)d_t \sin \theta} \cdot \exp[j\theta_m(k-r)] e^{j2\pi f_d(k)k\tau} + \boldsymbol{\omega}(k) \quad (6)$$

式中 r 为距离和延时 τ 所对应的目标距离门。各接收阵元采样后的回波数据以脉冲压缩长度 P 分组, 然后送入脉冲压缩器组 $PC_m(m=1,2,\dots,M)$ 中, 如图 2 所示, 其中子脉冲压缩器 $PC_{m,1}$ - $PC_{m,N}$ 的参考信号都为 $s'_m(k) = \exp[-j\theta_m(k)]$, 即对应第 m 个发射阵元的发射信号。那么接收阵列的第 l ($l=1,2,\dots,L$) 组回波矢量数据与第 i 距离门上的参考信号 s'_m 脉冲压缩后(即脉冲压缩器组 PC_m 输出)可表示为

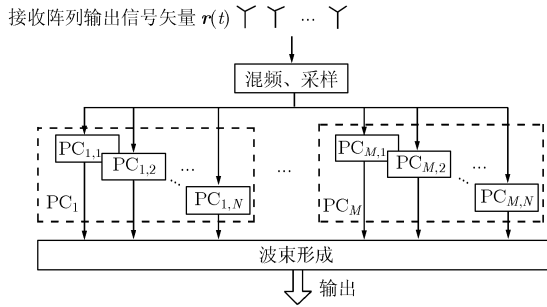


图 2 脉压-波束形成示意图

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{m,i}(l) &= \sum_{p=0}^{P-1} \mathbf{r}[(l-1)P+p] \cdot s'_m[(l-1)P+p-i] \\ &\approx \sqrt{\frac{P_T}{M}} \mathbf{A}(\theta) \alpha e^{-j(2\pi/\lambda)(m-1)d_t \sin \theta} \\ &\quad \cdot \sum_{p=0}^{P-1} \exp\{-j\theta_m[(l-1)P+p-i] \\ &\quad + j\theta_m[(l-1)P+p-r]\} \cdot e^{j2\pi f_d[(l-1)P+p]k\tau} \\ &\quad + \sum_{p=0}^P \boldsymbol{\omega}[(l-1)P+p] \\ &\quad \cdot \exp\{-j\theta_m[(l-1)P+p-i]\} \end{aligned} \quad (7)$$

将 M 个脉冲压缩器组在第 i 距离门上输出数据顺序排列, 可得

$$\mathbf{R}_i(l) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{1,i} \\ \vdots \\ \mathbf{R}_{M,i} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{P_T}{M}} \mathbf{B}(\theta) \otimes \mathbf{A}(\theta) \odot \mathbf{D} + \mathbf{Z}(l) \quad (8)$$

式中 \otimes 和 \odot 分别表示 Kronecker 乘积和 Hadamard

$$\text{乘积; } \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{D}_M \end{bmatrix}, \text{ 其中 } \mathbf{D}_m = \alpha \sum_{p=0}^{P-1} \exp\{-j\theta_m[(l-1)P+p-i] + j\theta_m[(l-1)P+p-r]\} \cdot e^{j2\pi f_d[(l-1)P+p]k\tau} \mathbf{1}_N,$$

$$\mathbf{1}_N \text{ 为 } N \times 1 \text{ 维的全 1 矢量; } \mathbf{Z}(l) = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_1(l) \\ \vdots \\ \mathbf{Z}_M(l) \end{bmatrix}, E\{\mathbf{Z}(l)\}$$

$$\mathbf{Z}^H(l)\} = P\sigma_w^2 \mathbf{I}, \text{ 其中 } \mathbf{I} \text{ 为 } MN \times MN \text{ 的单位矩阵, } \mathbf{Z}_m(l) = \sum_{p=0}^P \boldsymbol{\omega}[(l-1)P+p] \cdot \exp\{-j\theta_m[(l-1)P+p-i]\}.$$

对式(8)的输出数据进行波束形成, 可得

$$G_i(\hat{\theta}) = (\mathbf{B}(\hat{\theta}) \otimes \mathbf{A}(\hat{\theta}))^H \mathbf{R} \mathbf{x}_i (\mathbf{A}(\hat{\theta}) \otimes \mathbf{B}(\hat{\theta})) \quad (9)$$

式中 $\mathbf{R} \mathbf{x}_i = (1/L) \mathbf{R}_i \mathbf{R}_i^H$ 为 \mathbf{R}_i 的协方差矩阵, 其中 L 为快拍数, $(\cdot)^H$ 表示矩阵的共轭转置。由式(9)可知, 当 $i=r$ 且 $\hat{\theta}=\theta$ 时, $G_i(\hat{\theta})$ 会产生很高的峰值, 其他情况下不会产生峰值或峰值很低。这里也可以采用一些超分辨率谱估计方法(如 Music^[15], Esprit^[16]等)来代替波束形成方法, 以获得更高的方位角分辨力。由上面分析可知, 脉冲压缩-波束形成方法不利用 DFT 处理来实现相参积累, 因此目标在不同速度分辨单元间走动不会影响算法的处理增益。通过脉冲压缩-波束形成处理后, 可以获得目标的径向距离和方位角测量值, 即可得到目标在 2 维坐标平面上的坐标值。目标的多普勒频率测量可以采用以下方法: 根据目标位置估计值来构造在目标距离门上的参考信号, 然后分别与对应的回波信号进行脉冲压缩处理, 再把脉冲压缩数据同向累加后作 FFT 处理就能获得目标的多普勒频率, 即

$$\hat{f}_d = \arg \max_{f_d} \left\{ \left| \text{FFT} \left[(\mathbf{B}(\hat{\theta}) \otimes \mathbf{A}(\hat{\theta}))^H \mathbf{R}_i(l) \right]_{i=r, \hat{\theta}=\theta} \right| \right\} \quad (10)$$

由于进行 FFT 处理的数据时长较短, 多普勒频率估计精度不会很高^[17]。为了提高多普勒频率估计精度, 可采用线性调频 Z 变换^[17](CZT 算法)对多普勒频率附近区间进行频谱细化, 来得到较高精度的多普勒频率估计值。

这里, 一帧短时间回波信号的长度以及脉压长度 P 的选取与目标的最大径向运动速度 V_{\max} 以及信号带宽 B 有关。与传统噪声雷达类似^[14], MIMO 噪声雷达的多普勒容限只取决于脉压器组中单个脉压器的宽度 $T_R = P\tau = P/B$,

$$f_{d \max} = \frac{1}{2P\tau} = \frac{B}{2P} \quad (11)$$

按采样定理, 雷达只能测定小于 $f_{d \max}$ 的目标, 因此

$$\frac{2V_{\max}}{\lambda} < f_{d\max} = \frac{B}{2P} \quad (12)$$

为了使高速运动目标在短时间内的运动不超过半个距离单元,那么一帧回波信号长度 $T_B = PL\tau$ 应满足如下关系^[9],

$$V_{\max}T_B = V_{\max}PL\tau < \frac{1}{2} \cdot \frac{C}{2B} \quad (13)$$

4 仿真分析

为了验证单基地MIMO噪声雷达在高速运动目标检测方面的优越性,文中分析比较了MIMO雷达、传统阵列雷达以及单基地雷达的多目标检测性能。设置MIMO雷达载波频率 $f_0 = 10$ GHz,则其工作波长 $\lambda = 0.03$ m。发射阵元数 $M=10$,阵元间距 $d_t = 5\lambda$,各发射阵元同时发射相互正交的窄带噪声调频连续波信号,信号带宽 $B = 25$ MHz;接收阵元数 $N=40$,阵元间距 $d_r = \lambda/2$ 。定义回波信噪比 $SNR = 10\lg(P_T |\alpha|^2 / \sigma_w^2)$ 。假设目标可能的最高径向速度 $V_{\max} = 10$ km/s,根据式(12)和式(13)设置脉冲压缩器宽度 $T_R = 0.64$ μ s,一帧短时间回波信号处理长度 $T_B = 51.2$ μ s。其中传统阵列雷达对应发射阵元数 $N=1$ 的情况,单基地雷达对应发射和接收阵元数 $M=N=1$ 的情况。为了比较一致,3种雷达的发射总功率 P_T 相等,传统阵列雷达的一帧回波信号处理长度与MIMO噪声雷达一致,而单基地雷达的一帧回波信号处理长度应选为 $40 \times T_B = 2.048$ ms。假设存在3个高速运动的目标,参数设置见表1,其中 R_T 表示目标离雷达的径向距离。假设目标运动在相同的

表1 目标参数设置

目标序号	1	2	3
坐标位置 (x,y)(km)	(20,21)	(14.5,25.12)	(18.899,21.996)
速度矢量 (v_x, v_y)(m/s)	(-5000,-4000)	(-6000,-7000)	(-7500,-6000)
(R_T, θ) (km, °)	(29, 43.60)	(29.005, 29.99)	(29, 40.67)
信噪比 SNR (dB)	-25	-23	-25

距离单元上时其 RCS 保持不变,而位于不同距离单元上时其 RCS 会发生变化。

上述 3 种噪声雷达由于其发射信号的无周期性、随机性,因此都不会产生周期性的距离模糊。由图 3(a)和 3(b)可知,对于单基地雷达,由于高速运动目标在长时间多脉冲积累时除了在不同距离单元间走动,还要在不同速度分辨单元间走动以及其 RCS 也会发生波动,从而导致传统脉冲压缩和多普勒处理无法有效聚焦信号能量,此时目标几乎湮没在杂噪分量中,无法进行有效的谱峰检测和参数估计。从图 3(c), 3(d), 3(e)和 3(f)可知,MIMO 噪声雷达和传统阵列雷达虽然都可以把在短时间内输出的多路回波数据进行相参并行处理来取代回波数据的长时间相参积累检测,以避免距离走动、径向速度变化以及 RCS 快起伏这些非平稳因素对目标检测的影响,但是传统阵列雷达的角度分辨能力比较

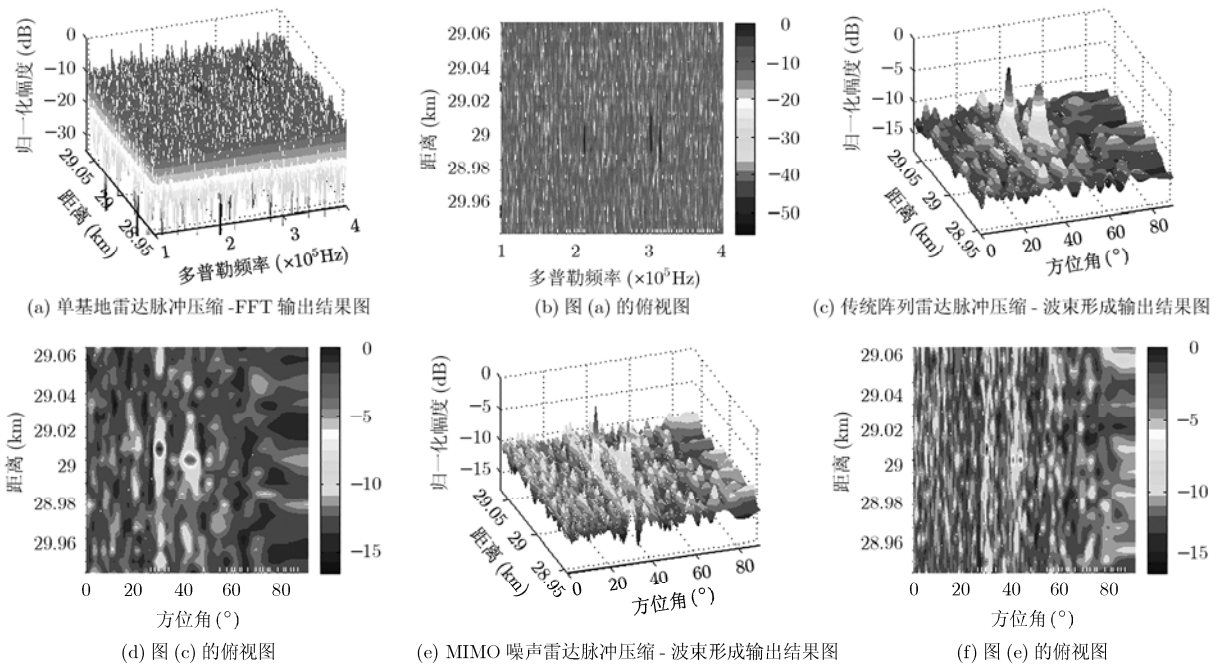


图3 3种雷达的多个高速运动目标检测结果

差,无法分辨两邻近目标(如目标 1 和目标 3),而 MIMO 噪声雷达由于在接收端可以形成大的虚拟阵列孔径^[1],因此它的角度分辨力要远高于传统阵列雷达,能准确分辨出两邻近目标。相比其他两种雷达, MIMO 噪声雷达由于能获得更高分辨力和精度的目标方位角估计^[1],因此能对密集的高速运动目标进行高精度定位。

5 结论

高速运动目标是现代雷达目标探测中遇到的一种新情况。由于目标的超高速运动,其在长时间内的回波信号易受距离走动、径向速度变化以及 RCS 快起伏等非平稳因素影响,因此传统雷达无法进行有效的长时间多脉冲相参积累检测。本文将一种新体制雷达——MIMO 噪声雷达应用于高速运动目标的检测。文中利用 MIMO 噪声雷达在短时间内输出的多路回波数据进行相参并行处理来取代回波数据的长时间相参积累检测,从而避免了一些非平稳因素对目标检测的影响,有效实现了多个高速运动目标的无模糊检测。MIMO 噪声雷达由于其发射信号的无周期性、随机性以及发射波束的全向性,因此不会产生周期性的距离模糊并具有良好的低截获性能和电子对抗能力,具有一定的工程应用价值和前景。

参 考 文 献

- [1] Chen J J, Chen J, and Wang S L. Detection of ultra-high speed moving target based on matched Fourier transform[C]. International conference on radar, Shanghai, China, 2006: 1-4.
- [2] 冯德军, 王雪松, 肖顺平, 等. 高速目标解调频处理的相位特性及其补偿[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(4): 916-920.
Feng De-jun, Wang Xue-song, and Xiao Shun-ping, *et al.* Phase signatures and compensating approach to moving target echoes by dechirping processing [J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2008, 30(4): 916-920.
- [3] 莫力. 雷达微弱目标长时间积累检测算法的研究. [博士论文], 北京: 北京理工大学, 2004.
Mo Li. Researches on radar weak target detection through long-term integration. [Ph.D.dissertation], Beijing: Beijing Institute of Technology, 2004.
- [4] 王俊. 微弱目标信号积累检测的方法研究. [博士论文], 西安: 西安电子科技大学, 1999.
Wang Jun. Researches on the detection of weak targets by signal integration. [Ph.D. dissertation], Xi'an: Xidian University, 1999.
- [5] 陈远征, 朱永锋, 赵宏钟, 等. 基于包络插值移位补偿的高速运动目标的积累检测算法研究[J]. 信号处理, 2004, 20(4): 387-390.
Chen Yuan-zheng, Zhu Yong-feng, and Zhao Hong-zhong, *et al.* Detection algorithm research of high velocity moving target based on the envelope interpolation [J]. *Signal Processing*, 2004, 20(4): 387-390.
- [6] Skolnik M I. Radar Handbook, Second Edition [M]. New York: McGraw-Hill, 1990, Chapter 11.
- [7] 韩兴斌, 胡卫东, 郁文贤, 等. 分布式多通道雷达成像技术[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(10): 2354-2358.
Han Xing-bin, Hu Wei-dong, and Yu Wen-xian, *et al.* An imaging technique based on distributed multi-channel radars[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2007, 29(10): 2354-2358.
- [8] 孙立宏, 王俊. 高速运动雷达弱小目标检测方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(2): 257-260.
Sun Li-hong and Wang Jun. Detection algorithm for radar high speed weak targets [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(2): 257-260.
- [9] 张顺生, 曾涛. 基于 Keystone 变换的微弱目标检测[J]. 电子学报, 2005, 33(9): 1675-1678.
Zhang Shun-sheng and Zeng Tao. Weak target detection based on Keystone transform[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(9): 1675-1678.
- [10] Haimovich A M, Blum R S, and Leonard J, *et al.* MIMO radar with widely separated antennas [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(1): 116-129.
- [11] Li J and Stoica P. MIMO radar with colocated antennas [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, 24(5): 106-114.
- [12] Gray D A and Capria A. MIMO noise radar – matched filters and coarrays[C]. IEEE Radar Conference, Roma, Italy, 2008: 1-6.
- [13] Liu B, He Z, and Zeng J. Receiving signal processing of MIMO radar based on transmitting diversity[C]. 6th International Conference on ITS Telecommunications, Chengdu, China, 2006: 1224-1227.
- [14] Liu G S, Gu H, and Su W M. The development of random signal radars[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(3): 770-777.
- [15] Schmidt R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1986, 34(3): 276-280.
- [16] Roy R and Kailath T. ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Process*, 1989, 37(7): 984-995.
- [17] 王世一. 数字信号处理[M]. 修订版, 北京: 北京理工大学出版社, 1997, 151-156.
Wang Shi-yi. Digital Signal Processing[M]. Revised Edition, Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1997: 151-156.

陈金立: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为MIMO雷达信号处理技术等。
顾红: 男, 1967年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为快速数字信号处理、随机信号雷达等。
苏卫民: 男, 1959年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为自适应信号处理、外辐射源雷达等。