

MIMO 雷达的相干脉冲串检测性能

屈金佑 张剑云

(电子工程学院信息系 合肥 230037)

摘要: 该文基于 Swerling I 和 Swerling II 目标模型, 在 Neyman-Pearson 准则下, 研究空间分集 MIMO(多输入多输出)雷达发射相干脉冲串时的检测方法和性能。该文的检测方法及性能为 MIMO 雷达和传统雷达提供了一个统一的框架。仿真结果表明, 随着相干脉冲串数目的增加, 目标的检测性能更好; 同时, 与传统雷达不同, 空间分集 MIMO 雷达对 Swerling I 型目标的检测性能优于 Swerling II 型目标。

关键词: MIMO 雷达; 空间分集; 充分统计量; Neyman-Pearson 准则; 相干脉冲串

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)02-0378-04

Detection Performance of MIMO Radar for Coherent Pulses

Qu Jin-you Zhang Jian-yun

(Electronic Engineering Institute, Heifei 230037, China)

Abstract: The detection performance of spatial diversity Multiple-Input Multiple-Output(MIMO) radar for Swerling I and Swerling II target is analyzed based on coherent pulses. The detection method provides an unified frame for conventional radar and the MIMO radar. Simulation results demonstrate that MIMO radar can get better detection performance when more coherent pulses is used. In contrast with conventional radar, the detection performance of MIMO radar in Swerling I target outperforms Swerling II target.

Key words: Multiple-Input Multiple-Output(MIMO) radar; Spatial diversity; Sufficient statistic; Neyman-Pearson criterion; Coherent pulses

1 引言

MIMO 雷达^[1]是 2003 年来提出的一种新体制雷达, 从空间分集角度上来说, MIMO 雷达方案有收发全不分集方案^[2]、仅发射端分集方案^[1]和收发全分集方案^[3]; 从波形分集角度上来说, MIMO 雷达采用正交波形^[3]或者部分相关波形^[4]; 从信号处理方式来说, MIMO 雷达可采用相干^[5]处理和非相干^[3]处理方式。MIMO 雷达当前研究的重点包括波形设计^[6], 模糊函数^[7], 波束赋形^[4,8], 检测性能分析^[3,9], 空时自适应信号处理^[10]等。

文献[1]采用发射分集和波形分集技术提高了雷达的抗信号截获性能、速度分辨率和弱目标检测能力, 并降低了系统前端对频率稳定性、相位噪声和系统杂散的指标要求; 文献[2]采用正交波形研究了单基地雷达的定位问题, 由于正交波形能虚拟阵元, 扩展了阵列孔径, 使得目标定位的分辨率和精度得以提高。MIMO 雷达检测性能分析是当前 MIMO 雷达研究的一个热点。文献[3]采用非相干信号处理方式研究了多基地 MIMO 雷达的信号检测性能, 其结论表明空间分集能够有效克服目标 RCS 闪烁, 提高目标检测性能; 文献[10]研究了单脉冲条件下, 空间分集 MIMO 雷达对分布式信源的检测问题, 并说明只要存在 2 个以上的独立观测分量,

MIMO 雷达可以有效地对抗目标的 RCS 闪烁。本文研究空间分集 MIMO 雷达在发射相干脉冲串时对 Swerling I 和 Swerling II 型目标的检测问题。

本文的结构如下: 第 2 节介绍空间分集 MIMO 雷达在相干脉冲串下的信号模型; 第 3 节推导空间分集 MIMO 雷达在 Swerling I 型目标时的检测性能; 第 4 节推导空间分集 MIMO 雷达在 Swerling II 型目标时的检测性能; 第 5 节给出仿真结果, 并对结果进行了对比分析; 第 6 节是结束语。

2 问题描述

假设空间分集 MIMO 雷达具有 M 发射站, N 个接收站, 每站发射 L 个相干脉冲串, 接收的脉冲回波采用中心式检测。假设第 m 个雷达发射站的发射的第 l 个脉冲为

$$s_{m,l}(t) = s_m(t' + lT), \quad -T/2 \leq t' \leq T/2, \quad m = 1, \dots, M \quad (1)$$

式中 t 和 t' 分别对应慢时间和快时间, $s_m(t)$ 为第 m 个发射站的基带波形。则单目标观测时, 第 n 个接收站接收的第 l 次脉冲的回波信号为

$$y_{n,l}(t - \tau) = \sum_{m=0}^{M-1} \sigma_{n,m,l} / \sqrt{M} s_{m,l}(t - \tau) \exp(j\varphi_n + j\phi_m) \cdot \exp(j2\pi f_{D_{n,m}}(t - \tau)) + w_{n,l}(t) \quad (2)$$

其中每个发射信号的幅度为 $1/\sqrt{M}$, 以确保所有发射信号的能量归一化。将式(1)代入式(2)有

$$y_{n,l}(t-\tau) = \sum_{m=0}^{M-1} \sigma_{n,m,l} / \sqrt{M} s_m(t'+lT-\tau) \cdot \exp(j\varphi_n + j\phi_m) \exp(j2\pi f_{D_{n,m}} T) \cdot \exp(j2\pi f_{D_{n,m}}(t'-\tau)) + w_{n,l}(t'+lT) \quad (3)$$

式中 $n=1, \dots, N$, $l=1, \dots, L$, 假设 $w_{n,l}(t)$ 为零均值复白高斯过程, 表示接收第 l 个脉冲回波时的噪声, $\sigma_{n,m,l}$ 为第 m 个发射站发射的第 l 个脉冲经目标反射后的到第 n 个接收站的回波复振幅, 对于空间分集 MIMO 雷达, 有: $\sigma_{n,m,l}, \sigma_{n_0,m_0,l}$ 相互独立, 对 $\forall n \neq n_0$ 或 $\forall m \neq m_0$ 。 φ_n 和 ϕ_m 是与目标位置、第 n 个接收站位置和第 m 个发射站位置有关相移, 它们是 MIMO 雷达导向矢量的元素^[3], $f_{D_{n,m}}$ 为目标对第 n 个接收站和第 m 个发射站的多普勒频移, 对于空间分集 MIMO 雷达一般具有多普勒频率扩展的特点。

假设具有精确的目标位置和速度等先验信息, 则丢掉(或补偿)导向矢量和多普勒频率有关项^[9]有

$$y_{n,l}(t-\tau) = \sum_{m=0}^{M-1} \sigma_{n,m,l} / \sqrt{M} s_m(t'+lT-\tau) \cdot \exp(j2\pi f_{D_{n,m}} T) + w_{n,l}(t'+lT) \quad (4)$$

在 MIMO 雷达中, 若采用正交的发射波形, 即

$$\int s_m(t) s_k^*(t) dt = \delta_{mk} \quad (5)$$

那么, 对每个接收站的接收信号通过一个匹配滤波器组进行匹配滤波后可将各发射信号进行分离, 得

$$y_{n,m,l} = \int y_{n,l}(t-\tau) s_{m,l}^*(t-\tau) dt = 1/\sqrt{M} \sigma_{n,m,l} x_{n,m,l} + w_{n,m,l} \quad (6)$$

其中 $x_{n,m,l} = \exp(j2\pi f_{D_{n,m}} T)$, 将所有接收站接收的回波串进行匹配滤波器分离后的输出写成向量形式有

$$\mathbf{y} = H_{0/1} / \sqrt{M} \boldsymbol{\sigma} \odot \mathbf{x} + \mathbf{w} \quad (7)$$

其中 $H_{0/1} = 0$ 或 1 , 分别表示目标不存在或存在, \odot 为 Schur 积。

$$\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_{1,1,1}, \dots, \sigma_{1,1,L}, \sigma_{1,2,1}, \dots, \sigma_{1,2,L}, \dots, \sigma_{1,M,1}, \dots, \sigma_{1,M,L}, \dots, \sigma_{N,M,1}, \dots, \sigma_{N,M,L}]^T \quad (8)$$

$$\mathbf{x} = [x_{1,1,1}, \dots, x_{1,1,L}, x_{1,2,1}, \dots, x_{1,2,L}, \dots, x_{1,M,1}, \dots, x_{1,M,L}, \dots, x_{N,M,1}, \dots, x_{N,M,L}]^T \quad (9)$$

$$\mathbf{y} = [y_{1,1,1}, \dots, y_{1,1,L}, y_{1,2,1}, \dots, y_{1,2,L}, \dots, y_{1,M,1}, \dots, y_{1,M,L}, \dots, y_{N,M,1}, \dots, y_{N,M,L}]^T \quad (10)$$

\mathbf{w} 与 $\boldsymbol{\sigma}$, \mathbf{x} 具有类似的结构, 且 \mathbf{w} 与 $\boldsymbol{\sigma}$ 相互独立。根据式(7), 显然, $w_{n,m,l}$ 仍然服从复白高斯分布, 并假设为 $\mathbf{w} \sim CN(0, \sigma_w^2 \mathbf{I}_{NML \times NML})$ 。

下面研究式(7)在 Swerling I 和 Swerling II 型目标模型下的检测问题。

3 Swerling I 型目标的检测

假设 L 个脉冲在一次扫描内, 而目标服从 Swerling I 模型时, 一次扫描内的脉冲回波复振幅完全相同, 即 $\sigma_{n,m} = \sigma_{n,m,l}, \forall l=1, \dots, L$, 式(8)可写为

$$\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_{1,1} \mathbf{1}_{1 \times L}, \sigma_{1,2} \mathbf{1}_{1 \times L}, \dots, \sigma_{1,M} \mathbf{1}_{1 \times L}, \dots, \sigma_{N,M} \mathbf{1}_{1 \times L}]^T = [\boldsymbol{\sigma}_s \otimes \mathbf{1}_{1 \times L}]^T \quad (11)$$

其中 $\boldsymbol{\sigma}_s = [\sigma_{1,1}, \sigma_{1,2}, \dots, \sigma_{1,M}, \sigma_{2,1}, \dots, \sigma_{N,M}] = \boldsymbol{\sigma}_R + i\boldsymbol{\sigma}_I$, $\boldsymbol{\sigma}_R$ 为向量 $\boldsymbol{\sigma}_s$ 的实部, $\boldsymbol{\sigma}_I$ 为 $\boldsymbol{\sigma}_s$ 的虚部, \otimes 为张量积, $\boldsymbol{\sigma}_s$ 为相互独立的复高斯随机向量, 并假设为 $\boldsymbol{\sigma}_s \sim CN(0, \sigma_s^2 \mathbf{I}_{NM \times NM})$ 。将回波复振幅相同的各回波写在一个向量中, 则各向量分块表示为

$$\mathbf{x} = [\mathbf{x}_{11}^T, \mathbf{x}_{12}^T, \dots, \mathbf{x}_{NM}^T]^T, \quad \mathbf{y} = [\mathbf{y}_{11}^T, \mathbf{y}_{12}^T, \dots, \mathbf{y}_{NM}^T]^T, \quad \mathbf{w} = [\mathbf{w}_{11}^T, \mathbf{w}_{12}^T, \dots, \mathbf{w}_{NM}^T]^T \quad (12)$$

其中

$$\mathbf{x}_{nm} = [x_{n,m,1}, \dots, x_{n,m,L}]^T, \quad \mathbf{y}_{nm} = [y_{n,m,1}, \dots, y_{n,m,L}]^T, \quad \mathbf{w}_{nm} = [w_{n,m,1}, \dots, w_{n,m,L}]^T, \quad \mathbf{y}_{nm} = 1/\sqrt{M} \sigma_{m,n} \mathbf{x}_{nm} + \mathbf{w}_{nm} \quad (13)$$

下面计算似然比, 由于似然比中的常系数最终可并入检测门限中, 因而, 计算中无关系数均并入 k_0 、 k 、 η_0 中, 为简化表达省略积分。

$$f(\mathbf{y}/H_0) = k_0 \exp\left[-\frac{\mathbf{y}^H \mathbf{y}}{\sigma_w^2}\right] \quad (14)$$

$$f(\mathbf{y}/H_1) = \int \int f(\mathbf{y}/H_1, \boldsymbol{\sigma}_R, \boldsymbol{\sigma}_I) f(\boldsymbol{\sigma}_R, \boldsymbol{\sigma}_I) d\boldsymbol{\sigma}_R d\boldsymbol{\sigma}_I = k_0 \int \int \exp\left[-\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \left(\left(\mathbf{y}_{nm} - 1/\sqrt{M} \sigma_{m,n} \mathbf{x}_{nm}\right)^H \cdot \left(\mathbf{y}_{nm} - 1/\sqrt{M} \sigma_{m,n} \mathbf{x}_{nm}\right) \cdot (\sigma_w^2)^{-1}\right)\right] f(\boldsymbol{\sigma}_R, \boldsymbol{\sigma}_I) d\boldsymbol{\sigma}_R \cdot d\boldsymbol{\sigma}_I = k_0 \exp\left[-\frac{\mathbf{y}^H \mathbf{y}}{\sigma_w^2}\right] \exp\left[\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \frac{|\mathbf{x}_{nm}^H \mathbf{y}_{nm}|^2}{k}\right] \quad (15)$$

在式(15)的推导中, 先将式(14)代入, 再将各独立的随机变量进行分离, 然后进行单个随机变量的积分, 对于单个随机变量的积分可直接利用结论 1, 其描述如下:

结论 1 假设 $\sigma \sim CN(0, \sigma_t^2)$, $w \sim CN(0, \sigma_w^2)$, $H_1: y = 1/\sqrt{M} \sigma x + w$, 则

$$f(y/H_1) = k_0 \exp\left[-\frac{y^* y}{\sigma_w^2}\right] \exp\left[\frac{y^* x}{k}\right] \quad (16)$$

证明略。

根据式(14), 式(15)得对数似然比为

$$\lg \frac{f(\mathbf{y}/H_1)}{f(\mathbf{y}/H_0)} = \eta_0 + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |\mathbf{x}_{nm}^H \mathbf{y}_{nm}|^2 \quad (17)$$

所以, 得充分统计量为

$$T_1(\mathbf{y}) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |\mathbf{x}_{nm}^H \mathbf{y}_{nm}|^2 \quad (18)$$

注意到, $\mathbf{x}_{nm}^H \mathbf{y}_{nm}$ 为一个复高斯随机变量, 在 H_0 和 H_1 假设下的方差分别为 $L\sigma_w^2$, $L^2\sigma_t^2/M + L\sigma_w^2$, 则得到充分统计量的分布为

$$\left. \begin{aligned} H_0: T_1(\mathbf{y}) / (L\sigma_w^2/2) &\sim \chi_{2NM}^2 \\ H_1: T_1(\mathbf{y}) / (L^2\sigma_t^2/(2M) + L\sigma_w^2/2) &\sim \chi_{2NM}^2 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

其中 χ_{2NM}^2 为自由度为 $2NM$ 的中心化 χ^2 分布。则虚警概率和检测概率分别为

$$P_{fa} = \Pr\{T_1(\mathbf{y}) > \gamma_1 / H_0\} = Q_{\chi_{2NM}^2} \left(\frac{\gamma_1}{L\sigma_w^2/2} \right) \quad (20)$$

$$P_d = \Pr\{T_1(\mathbf{y}) > \gamma_1 / H_1\} = Q_{\chi_{2NM}^2} \left(\frac{\gamma_1}{L^2\sigma_t^2/(2M) + L\sigma_w^2/2} \right) \quad (21)$$

其中 γ_1 表示检测门限, 它根据式(20)得到, $Q_{\chi^2}(x) = \int_x^\infty p(t)dt$, $p(t)$ 为 χ^2 的概率密度。

4 Swerling II 型目标的检测

当目标服从 Swerling II 模型时, 各脉冲相互独立, 则 $\sigma_{n,m,l_0}, \sigma_{n,m,l}$ 相互独立, 对 $\forall l \neq l_0$, 进一步假设, $\sigma_{n,m,l}, \sigma_{n_0,m_0,l_0}$ 相互独立, 对 $\forall n \neq n_0$ 或 $\forall m \neq m_0$ 或 $\forall l \neq l_0$, 此时

$$f(\mathbf{y} / H_0) = k_0 \exp\left(-\frac{\mathbf{y}^H \mathbf{y}}{\sigma_w^2}\right) \quad (22)$$

$$f(\mathbf{y} / H_1) = k_0 \exp\left(-\frac{\mathbf{y}^H \mathbf{y}}{\sigma_w^2}\right) \exp\left(\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L \frac{|x_{n,m,l}^* y_{n,m,l}|^2}{k}\right) \quad (23)$$

上式的推导类似式(15)并利用了结论 1, 那么对数似然比为

$$\lg \frac{f(\mathbf{y} / H_1)}{f(\mathbf{y} / H_0)} = \eta_0 + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L |x_{n,m,l}^* y_{n,m,l}|^2 \quad (24)$$

得充分统计量为

$$T_2(\mathbf{y}) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L |x_{n,m,l}^* y_{n,m,l}|^2 \quad (25)$$

易知, 在 H_0 和 H_1 假设下的方差分别为 σ_w^2 , $\sigma_t^2 / M^2 + \sigma_w^2$, 则得到充分统计量的分布为

$$\left. \begin{aligned} H_0: T_2(\mathbf{y}) / (\sigma_w^2/2) &\sim \chi_{2NML}^2 \\ H_1: T_2(\mathbf{y}) / (\sigma_t^2/(2M) + \sigma_w^2/2) &\sim \chi_{2NML}^2 \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

则虚警概率和检测概率分别为

$$P_{fa} = \Pr\{T_2(\mathbf{y}) > \gamma_2 / H_0\} = Q_{\chi_{2NML}^2} \left(\frac{\gamma_2}{\sigma_w^2/2} \right) \quad (27)$$

$$P_d = \Pr\{T_2(\mathbf{y}) > \gamma_2 / H_1\} = Q_{\chi_{2NML}^2} \left(\frac{\gamma_2}{\sigma_t^2/(2M) + \sigma_w^2/2} \right) \quad (28)$$

式中 γ_2 为检测门限。

5 仿真结果

假设虚警概率 $P_{fa} = 10^{-6}$, 定义信噪比为 $SNR = 10 \lg(\sigma_t^2/\sigma_w^2)$, 本文采用检测概率随信噪比的变化曲线来描述检测性能。

实验 1 传统雷达的检测性能 首先, 考虑 MIMO 雷达采用 1 发 1 收(传统雷达)配置时的检测性能, 对发射脉冲数为 1, 4, 8 时, 得到的检测性能曲线如图 1 所示。

图 1 中实线表示 Swerling I 型目标, 虚线表示 Swerling II 型目标, 线条上的方框表示 1 个脉冲, 圆表示 4 个脉冲, 无任何标识表示 8 脉冲。从图 1 可以看出:

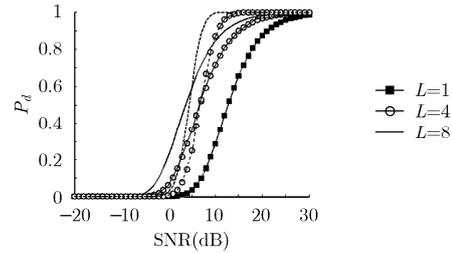


图 1 传统雷达的检测性能

(1)对于单脉冲检测($L=1$)时, 目标服从 Swerling I 和 Swerling II 型模型的两条检测概率-信噪比曲线重合, 说明它们具有相同的检测性能;

(2)随着用于检测的脉冲串数的增加, Swerling I 和 Swerling II 型目标的检测性能都得到改善;

(3)对于多脉冲检测时, 当 $P_d > 0.4$ 时, 慢起伏目标检测时需要的信噪比大于快起伏目标, 说明对 Swerling II 型目标的检测性能优于 Swerling I 型目标。这是由于: 对于传统雷达, 慢起伏目标的回波在同一扫描周期是完全相关的, 如果第 1 个脉冲的振幅小于检测门限, 则相继的脉冲也不会超过门限, 要发现目标只有提高信噪比; 在快起伏时脉冲间不相关, 相继的脉冲幅度会有较大变化, 第 1 个脉冲不超过门限, 相继的脉冲有可能超过门限而被检测, 在多脉冲情况下, 其检测性能得以平均, 故对 Swerling I 目标的检测性能差于 Swerling II 目标的检测性能。

实验 2 MIMO 雷达的检测性能 假设 MIMO 雷达采用 4 发 5 收配置, 其余参数不变, 重新进行仿真, 得 MIMO 雷达的检测性能如图 2。从图 2 可以看出:

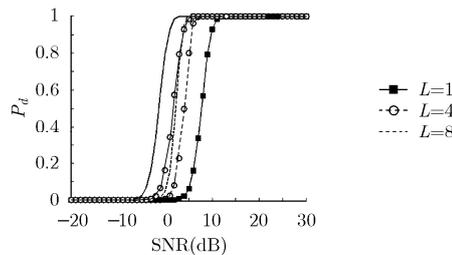


图 2 MIMO 雷达的检测性能

(1)对于传统雷达得到的结果(1)和结果(2), 在 MIMO 雷达中同样成立;

(2)对于多脉冲检测, 达到相同的检测概率, Swerling I 型目标需要的信噪比更低, 说明空间分集 MIMO 雷达 Swerling I 型目标检测性能优于 Swerling II 型目标, 与传统雷达的检测性能恰恰相反(图 1 结论)。由于 MIMO 雷达采用多发多收, 其检测器能进行时域(脉冲间相干)和空域(扫描间非相干)能量积累, 由于 MIMO 雷达采用了空间分集技术, 致使不同收发路径的回波复振幅互相独立, 此时, 若某接收站的回波幅度较小, 不足以检测, 而其它接收站的回波幅度

可能较大, 因而, 确保了所有接收站的回波幅度均值趋于恒定, 克服了目标的 RCS 闪烁, 在这方面空间分集 MIMO 雷达对快、慢起伏目标具有相同的优势; 进一步, 比较两检测器, 可发现 T_1 和 T_2 在空域上(对 n 和 m) 都是进行能量的非相干积累, 但在时域上(对 l) 检测器 T_1 对慢起伏目标进行相干累积, 而检测器 T_2 对快起伏目标是进行非相干累积, 因而, 空间分集 MIMO 雷达对 Swerling I 型目标的检测性能优于 Swerling II 型目标。

通过仿真可知, 在多脉冲检测时, MIMO 雷达对 Swerling I 型的目标的检测性能改善更多, 说明 MIMO 雷达对 Swerling I 型目标更加有优势。

6 结束语

本文建立了 MIMO 雷达多脉冲检测的数学模型, 并推导了空间分集 MIMO 雷达对 Swerling I 和 Swerling II 型目标在 NP 准则下的检测概率, 并用数值计算的方法对两种目标的检测性能进行了对比分析, 得到与传统雷达相反的结论。但仍有许多问题值得进一步的研究: 本文在推导过程中, 假设了目标参数(位置和速度)已知, 噪声方差已知, 今后的研究中应考虑各种参数未知时的检测性能; 进一步研究目标服从其它起伏模型时的检测性能; 对于扫描间独立和脉冲间独立是两种极端情况, 实际的目标起伏模型介于两者之间, 此时的检测性能也值得进一步的研究; 随机相位脉冲串下 MIMO 雷达的检测性能等。

参 考 文 献

- [1] Rabideau D J and Parker P. Ubiquitous MIMO multifunction digital array radar. Conference Record of the Thirty-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, New York, Nov 9-12, 2003: 1057-1064.
- [2] Bekkerman I and Tabrikian J. Target detection and localization using MIMO radars and sonars [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2006, 54(10): 3873-3883.
- [3] Fishler E, Haimovich A, and Blum R S, *et al.*. Spatial diversity in radars-models and detection performance [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2006, 54(3): 823-838.
- [4] Fuhrmann D R and Antonio G S. Transmit beamforming for MIMO radar systems using partial signal correlation. Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, New York, 2004: 295-299.
- [5] Lehmann N H, Haimovich A M, and Blum R S, *et al.*. High resolution capabilities of MIMO radar. ACSSC '06. Fortieth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, New York, Oct, 2006: 25-30.
- [6] White L B and Ray P S. Signal design for MIMO diversity systems. Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, New York, Nov. 2004: 973-977.
- [7] San Antonio G, Fuhrmann D R, and Robey F C. MIMO radar ambiguity functions [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2007, 1(1): 167-177.
- [8] San Antonio G and Fuhrmann D R. Beampattern synthesis for wideband MIMO radar systems. 1st IEEE International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing, New York, Dec 13-15, 2005: 105-108.
- [9] 戴喜增, 彭应宁, 汤俊. MIMO 雷达检测性能[J]. *清华大学学报*, 2007, 47(1): 88-91.
Dai Xi-zeng, Peng Ying-ning, and Tang Jun. Detection performance of MIMO radar [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2007, 47(1): 88-91.
- [10] Xu Luzhou, Li Jian, and Stoica P. Adaptive techniques for MIMO radar. Fourth IEEE Workshop on Sensor Array and Multi-channel Processing, Waltham, MA, USA, July 12-14, 2006: 258-262.

屈金佑: 男, 1981 年生, 博士生, 研究兴趣为阵列信号处理、统计信号处理和 MIMO 雷达。

张剑云: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员, 雷达分委会委员, IEEE 会员, 主要研究方向为雷达及目标环境模拟、雷达信号处理、高速信号处理。