

杂波加噪声环境下 MIMO 雷达检测性能分析^①

隋凯凯, 李宏, 李欣欣

(西北工业大学 电子信息学院, 西安 710129)

摘要: MIMO 雷达采用空间分集和波形分集技术, 使其在目标检测等方面与传统雷达相比有明显的优势, 逐渐成为了一个未来雷达方向的研究热点. 本文在杂波与自身噪声都存在的条件下, 给出了 MIMO 雷达检测模型, 导出检测性能的理论公式, 并且在多脉冲积累的条件下与相控阵雷达做仿真比较, 得出当信噪比大于 10dB 时, MIMO 雷达有着明显的优势.

关键词: MIMO 雷达; 相控阵雷达; 空间分集; 波形分集; 检测性能

MIMO Radar Detection Performance Analysis in Clutter and Noisy Environments

SUI Kai-Kai, LI Hong, LI Xin-Xin

(College of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: MIMO radar has obvious advantage of the target detection performance compared with the traditional radar by using space diversity and waveform diversity technology, and becomes a research hot spot of future radar. In this paper, author gives the MIMO radar detection model based on the condition of clutter and noise, and deduces the theoretical formula of the detection performance. Its detection performance is compared with phased array radar under the multiple pulse accumulation conditions. The simulation result shows that when the SNR more than 10 dB, MIMO radar has obvious advantages.

Key words: MIMO radar; phased array radar; space diversity; waveform diversity; detection Performance

Fishler 在 2004 年首次提出 MIMO 雷达^[1]的概念后, MIMO 雷达以其在目标探测, 反隐身, 反探测以及角度估计等方面的优势迅速成为各国学者的研究热点. 2006 年, Fishler^[2]研究了单脉冲条件下 MIMO 雷达在噪声背景中的目标检测问题, 建立了 MIMO 雷达的窄带目标模型与信号模型. 文献[3]基于杂波与噪声同时存在的背景, 对该体制雷达与相控阵雷达进行了仿真比较分析. 同时为了进一步提高检测性能, 文献[4]着重研究了 MIMO 雷达与传统相控阵雷达多脉冲条件下的检测性能. 本文在上述文献的基础上, 针对瑞利起伏目标, 建立了 MIMO 雷达多脉冲条件下高斯杂波加高斯噪声背景中的检测模型, 导出了检测性能的理论公式, 最后将其与相控阵雷达在不同信噪比条件下的目标检测性能进行仿真比较, 得出了有关结论.

1 MIMO及相控阵雷达信号模型

1.1 分布源目标模型

考虑到目标的空间特性, MIMO 雷达需要使用一种新的雷达目标模型——分布源模型^[5-7], 其模型如下所示:

$$r(t) = \sqrt{W/M} \text{diag}[a(x_0, y_0)] H \text{diag}[b(x_0, y_0)] s(t - \tau) + n(t) \quad (1)$$

W 为雷达的发射功率, M 、 N 分别为发射天线数目和接收天线数目. $r(t) = [r_1, \dots, r_N(t)]^T$ 表示在各种接收单元上接收信号的集, 而用 $s(t) = [s_1(t), \dots, s_M(t)]^T$ 表示来自许多发射单元的发射信号的集.

1.2 单脉冲、杂波加噪声背景下雷达信号模型

在单脉冲, 白噪声条件下的两种雷达信号模型^[8]的基础上, 推导两种体制雷达在多脉冲条件下的信号模型如下:

^① 基金项目:西北工业大学研究生创业种子基金(Z2013069)

收稿时间:2013-03-27;收到修改稿时间:2013-04-22

MIMO 雷达:

$$r(t) = \sqrt{\frac{W}{M}} H_\alpha s(t-\tau) + \sqrt{\frac{W}{M}} H_c s(t-\tau) + n_c(t) \quad (2)$$

相控阵雷达:

$$r(t) = \sqrt{\frac{W}{M}} \alpha N M s(t-\tau) + \sqrt{\frac{W}{M}} c N M s(t-\tau) + n(t) \quad (3)$$

式中 H_α 为目标信道矩阵 ($N \times M$ 矩阵), 令向量 $\alpha = [\alpha_{11}, \dots, \alpha_{1M}, \alpha_{21}, \dots, \alpha_{NM}]^T$ 包含 H_α 中的所有元素, 则 $\alpha \sim CN(0, \sigma_\alpha^2 I_{MN})$, I_{MN} 为 $MN \times MN$ 的单位矩阵, H_c 为杂波信道矩阵 ($N \times M$ 矩阵), 令向量 $c = [c_{11}, \dots, c_{1M}, c_{21}, \dots, c_{NM}]^T$ 包含 H_c 中的所有元素, 则 $c \sim CN(0, \sigma_c^2 I_{MN})$, $n_c(t) = [n_{1c}(t), \dots, n_{Nc}(t)]^T$ 为加性噪声, 若第 j 个接收阵元对应的第 k 发射信号的通道噪声, 则 $n_{jk}(t)$ 为一零均值, 复高斯随机噪声, 其相关函数 $R_n(\tau) = \sigma_n^2 \delta(\tau)$, W 为发射信号能量.

2 MIMO及相控阵雷达检测性能

2.1 单脉冲、杂波加噪声背景下检测性能分析

2.1.1 MIMO 雷达检测性能分析

用 x 表示 $NM \times 1$ 矢量, 则 $[x]_{iN+j} = \int r_i(t) s_j(t-\tau) dt$, 也就是, x 是一组匹配滤波器的输出, 在零假设下, x 是一个零均值, 相关矩阵为 $\sigma_n^2 I_{MN}$ 的复随机变量. 而在另一个假设下, 则为相关矩阵为 $(W/M + \sigma_n^2) I_{MN}$ 的复随机变量. 这导致下列测试统计的分布得出匹配滤波器组的输出为:

$$X = \begin{cases} \sqrt{\frac{W}{M}} c + n & H_0 \\ \sqrt{\frac{W}{M}} (\alpha + c) + n & H_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中 $\alpha \sim CN(0, \sigma_\alpha^2 I_{MN})$, $c \sim CN(0, \sigma_c^2 I_{MN})$, $n \sim CN(0, \sigma_n^2 I_{MN})$, 从而检验统计量服从如下分布:

$$T = \|X\|^2 = \begin{cases} \left(\frac{W}{2M} \sigma_c^2 + \frac{\sigma_n^2}{2}\right) x_{2MN}^2 & H_0 \\ \left(\frac{W}{2M} (\sigma_c^2 + \sigma_\alpha^2) + \frac{\sigma_n^2}{2}\right) x_{2MN}^2 & H_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中, x_{2MN}^2 表示 $2MN$ 个自由度的 x^2 随机变量. 虚警概率、检测概率和门限是相联系的.

虚警概率可表示为:

$$P_{rFA} = P(T > \delta / H_0) = P\left(\left(\frac{W}{2M} \sigma_c^2 + \frac{\sigma_n^2}{2}\right) x_{2MN}^2 > \delta\right) = P\left(x_{2MN}^2 > \frac{2M\delta}{E\sigma_c^2 + M\sigma_n^2}\right) \quad (6)$$

其门限:

$$\delta = \left(\frac{W}{2M} \sigma_c^2 + \frac{\sigma_n^2}{2}\right) F_{x_{2MN}^2}^{-1}(1 - P_{rFA}) \quad (7)$$

确定 δ 式中 $F_{x_{2MN}^2}^{-1}$ 表示 $2MN$ 个自由度的一个 x^2 随变量的逆累积分布函数. 检测概率给出为:

$$P_D = P(T > \delta / H_1) = P\left(\left(\frac{W}{2M} (\sigma_c^2 + \sigma_\alpha^2) + \frac{\sigma_n^2}{2}\right) x_{2MN}^2 > \delta\right) = 1 - F_{x_{2MN}^2} \frac{\frac{W}{M} \sigma_c^2 + \sigma_n^2}{\frac{W}{M} (\sigma_c^2 + \sigma_\alpha^2) + \sigma_n^2} F_{x_{2MN}^2}^{-1}(1 - P_{rFA}) \quad (8)$$

2.1.2 相控阵雷达检测性能分析

设 $x = \int r^H(t) a(\theta) s(t-\tau) dt$ 是时一空匹配滤波器的

输出. 对于相控阵系统的最佳检测器结果是对 θ 方向控制的波束形成器后接一个简单的线性滤波. 最佳检测器与所用的发射机控制矢量 \tilde{b} 无关. 使这矢量最佳化将构成最佳的相控阵系统. 相控阵雷达的匹配滤波器输出为:

$$X = \begin{cases} \sqrt{\frac{W}{m}} N M c + n & H_0 \\ \sqrt{\frac{W}{m}} N M (\alpha + c) + n & H_1 \end{cases} \quad (9)$$

式中 变量 $\alpha \sim CN(0, \sigma_\alpha^2)$, $c \sim CN(0, \sigma_c^2)$, $n \sim CN(0, \sigma_n^2)$, 从而检验统计量服从如下分布

$$T = |X|^2 = \begin{cases} \left(\frac{W}{2M} M^2 N^2 \sigma_c^2 + \frac{N \sigma_n^2}{2}\right) \chi_2^2 & H_0 \\ \left(\frac{W}{2M} M^2 N^2 (\sigma_c^2 + \sigma_\alpha^2) + \frac{N \sigma_n^2}{2}\right) \chi_2^2 & H_1 \end{cases} \quad (10)$$

式中 χ_2^2 为自由度为 2 的 χ^2 分布. 其虚警概率、门限和检测概率分别为:

$$P_{fa} = P(T > \delta / H_0) = P\left(\chi_2^2 > \frac{2\delta}{W M N^2 \sigma_c^2 + N \sigma_n^2}\right) \quad (11)$$

$$\delta = \left(\frac{W M N^2 \sigma_c^2 + N \sigma_n^2}{2}\right) F_{\chi_2^2}^{-1}(1 - P_{rFA}) \quad (12)$$

$$P_D = P(T > \delta / H_1) = P\left(\frac{W M N^2 (\delta_c^2 + \delta_a^2) + N \delta_n^2}{2} \chi_2^2 > \delta\right) = 1 - F_{\chi_2^2} \frac{W M N \delta_c^2 + \delta_n^2}{W M N (\delta_c^2 + \delta_a^2) + \delta_n^2} F_{\chi_2^2}^{-1}(1 - P_{rFA}) \quad (13)$$

2.2 多脉冲、杂波加噪声背景下两种雷达检测性能分析

雷达脉冲积累有检波前积累跟检波后积累, 这里采用检波前积累方法. 对于施威林 II 型的目标, 脉冲之间是相互独立的.

MIMO 雷达:

$$r(t) = \begin{cases} K\sqrt{\frac{W}{M}}H_c s(t-\tau) + n_c(t) & H_0 \\ K\sqrt{\frac{W}{M}}H_\alpha s(t-\tau) + K\sqrt{\frac{W}{M}}H_c s(t-\tau) + n_c(t) & H_1 \end{cases} \quad (14)$$

相控阵雷达:

$$r_i(t) = \begin{cases} n_i(t) & H_0 \\ NMK\sqrt{\frac{W}{M}}H_{i\alpha} s_i(t-\tau) + n_i(t) & H_1 \end{cases} \quad (15)$$

由相参脉冲积累的概念^[9,10]可知 K 个脉冲积累可以使信噪比提高 K 倍, 可以得出简单的不失一般意义的脉冲积累情况下检测概率如下:

MIMO 雷达:

$$P_D = 1 - F_{\chi^2_{2MN}} \left(\frac{WK^2}{M} \frac{\sigma_c^2 + \sigma_n^2}{(\sigma_c^2 + \sigma_\alpha^2) + \sigma_n^2} F_{\chi^2_{2MN}}^{-1}(1 - P_{FA}) \right) \quad (16)$$

相控阵雷达:

$$P_D = 1 - F_{\chi^2_{2K^2W}} \left(\frac{K^2WMN}{K^2WNM} \frac{\sigma_c^2 + \sigma_n^2}{(\sigma_c^2 + \sigma_\alpha^2) + \sigma_n^2} F_{\chi^2_{2K^2W}}^{-1}(1 - P_{FA}) \right) \quad (17)$$

3 仿真分析

M, N 分别表示发射和接收阵元数, 为了简化问题, 令 $W=1, M=N=4, P_{fa} = 10^{-6} \text{ dB}$ 同时定义信噪比 $SNR = \sigma_\alpha^2 / \sigma_n^2$, 信杂比 $SCR = \sigma_\alpha^2 / \sigma_c^2$. 加入 MISO 体制雷达($N=1$)进行检测性能比较:

表 1 三种体制雷达不同 SNR 条件下的检测概率

SCR	SNR=8 dB			SNR=10 dB			SNR=12 dB		
	MIMO	相控阵	MISO	MIMO	相控阵	MISO	MIMO	相控阵	MISO
0dB	0.0116	0.0010	0.0035	0.0237	0.0010	0.0043	0.0391	0.0010	0.0049
3dB	0.0596	0.0093	0.0304	0.1464	0.0096	0.0419	0.2627	0.0097	0.0518
5dB	0.1207	0.0335	0.0886	0.3039	0.0344	0.1283	0.5223	0.0351	0.1630
10dB	0.2836	0.2546	0.3620	0.6489	0.2653	0.5241	0.9017	0.2723	0.6486
15dB	0.3688	0.5765	0.5560	0.7769	0.6040	0.7611	0.9684	0.6222	0.8836
20dB	0.3998	0.7637	0.6296	0.8147	0.8018	0.8356	0.9806	0.8270	0.9400
25dB	0.4100	0.8368	0.6537	0.8262	0.8791	0.8577	0.9836	0.9071	0.9542
30dB	0.4132	0.8615	0.6614	0.8298	0.9053	0.8645	0.9845	0.9343	0.9583

将其表现在图上:

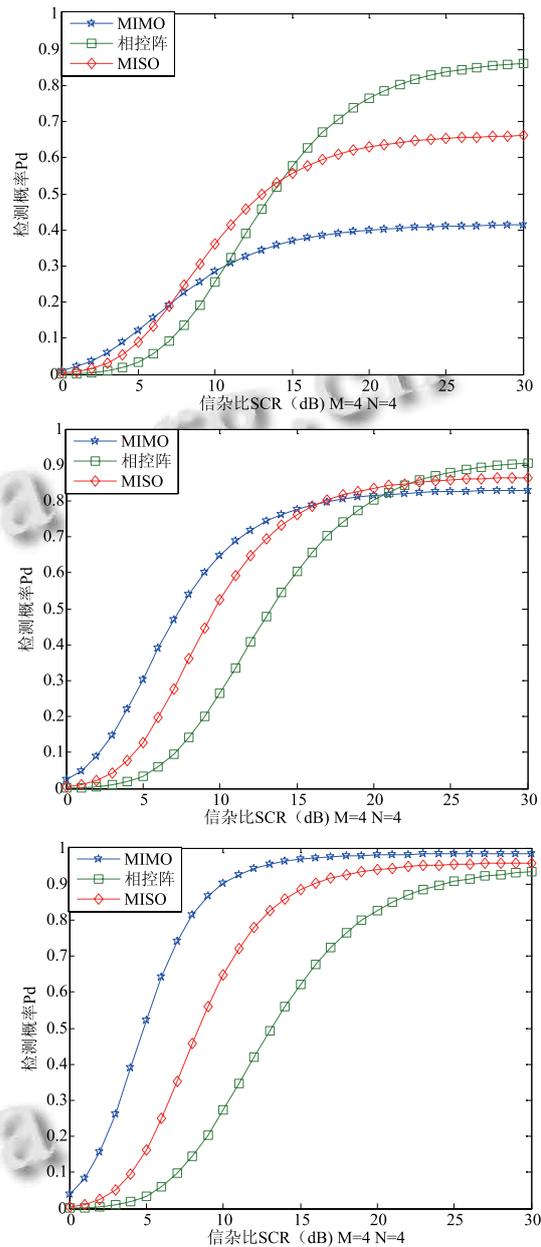


图 1 SNR=8、SNR=10 和 SNR=12dB 时三种雷达检测性能比较

从表 1 和图 1 可得出, 随着信噪比的不断增大, MIMO 雷达的检测性能会显著增强. 当信噪比大于等于 10dB 时, MIMO 雷达的检测性能要明显优于相控阵雷达, 且信噪比越大, 性能优势越明显; 而信噪比小于 8dB 时, MIMO 雷达的检测性能逊于相控阵雷达. 原因是当信噪比较高时, 噪声对目标检测的影响较小. 由于 MIMO 雷达采用了 MN 个独立通道, 虽然每个独立通道的信号能量与杂波能量都是随机起伏的, 但通

过综合各通道的输出, 能量得到平均, 其随机起伏性明显减小, 所以其目标检测性能较好, 而传统相控阵雷达是单通道体制的, 就不具备这个优点; 相反, 当信噪比较低时, 噪声对目标检测的影响明显变大, 由于 MIMO 雷达的多通道特性, 其总噪声能量是各通道噪声能量之和, 所以噪声大小对其检测性能的影响明显. 而相控阵体制雷达因为其单通道特性, 所以噪声对检测性能的影响就要小得多.

表 2 三种体制雷达不同脉冲积累下的检测概率

SCR	K=2			K=3			K=4		
	MIMO	相控阵	MISO	MIMO	相控阵	MISO	MIMO	相控阵	MISO
0dB	0.0074	0.0010	0.0030	0.0277	0.0010	0.0045	0.0473	0.0010	0.0052
3dB	0.0337	0.0092	0.0246	0.1764	0.0096	0.0448	0.3238	0.0097	0.0560
5dB	0.0653	0.0328	0.0694	0.3637	0.0346	0.1384	0.6209	0.0353	0.1781
10dB	0.1504	0.2476	0.2780	0.7377	0.2675	0.5822	0.9579	0.2749	0.6966
15dB	0.1973	0.5584	0.4344	0.8559	0.6097	0.8023	0.9920	0.6290	0.9205
20dB	0.2150	0.7387	0.4973	0.8875	0.8097	0.8730	0.9962	0.8364	0.9661
25dB	0.2209	0.8091	0.5186	0.8968	0.8879	0.8932	0.9970	0.9176	0.9764
30dB	0.2228	0.8329	0.5254	0.8996	0.9144	0.8993	0.9973	0.9451	0.9792

表现在图上:

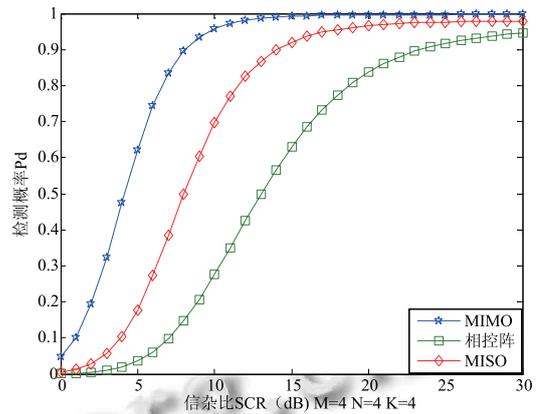
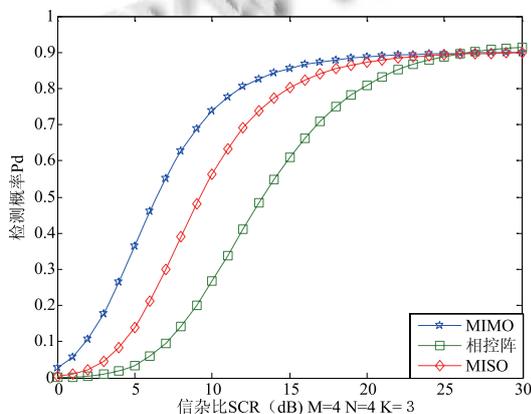
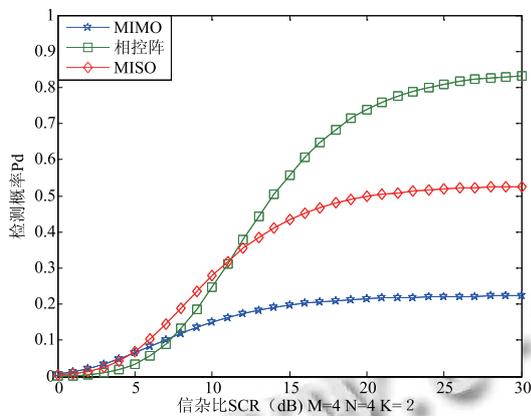


图 2 脉冲数 K=2、K=3 和 K=4 时三种雷达检测性能比较

很明显, 经过脉冲积累后, MIMO 雷达的检测性能得到明显改善.

4 结语

通过仿真分析可知 MIMO 雷达单脉冲背景下其低信噪比检测性能相比其他两种体制的雷达较差, 但在高信噪比条件下其显示了较优的检测性能. 通过脉冲积累, MIMO 雷达的检测性能明显提高, 两种体制雷达检测性能均得到提高. 对于本文所建立的 MIMO 雷达的各种信号模型, 其实是相对实际情况简化的模型, 实际情况远比文中所建立的模型复杂. 如何建立更接近实际的信号模型并进一步研究雷达各方面的性能还需不断探索.

参考文献

- 1 Fishler E, Haimovich A, Blum R, Cimini L, Chizhik D, Valenzuela R. MIMO radar: An idea whose time has come. Proc. of the IEEE Int. Conf. on Radar, April Philadelphia, PA, 2004.
- 2 Fishler E, Haimovich A, Blum R, et al. Spatial Diversity in Radars-Models and Detection Performance. IEEE Trans. on Signal Processing, 2006, 54(3): 823-838.
- 3 王敦勇, 马晓岩, 袁俊泉, 王党卫. 杂波环境下 MIMO 雷达对起伏目标的检测性能分析. 空军雷达学院学报, 2007, (9): 259-262.
- 4 王敦勇, 马晓岩, 袁俊泉, 等. 雷达与相控阵雷达的多脉冲检测性能比较. 雷达科学与技术, 2007, 5(6): 405-409.

(下转第 101 页)

参考文献

- 1 中国计算机安全.2012WEB 应用防护与数据安全高峰论坛杭州举行. [2012-05-24]. <http://sec.chinabyte.com/406/12342906.shtml>.
- 2 中国软件网. 慧眼数据库审计系统的技术原理 [2011-04-26].http://www.soft6.com/v9/2011/pldj_0426/150594.html.
- 3 瑞星网. 数据安全防“脱库”解决方案 [2012-01-13]. <http://www.rising.com.cn/newsletter/news/2012-01-13/9744.html>.
- 4 CIO 时代网. 浅析数据库安全现状及其安全审计 [2011-05-17].<http://www.ciotimes.com/infrastructure/sjk/49737.html>.
- 5 计世网. 慧眼数据库审计系统浮出的内幕 [2011-04-25].http://soft.ccw.com.cn/news/htm2011/20110425_925262.shtml
- 6 赛迪网. 数据库信息安全需求紧迫面临严峻挑战 [2010-02-01].http://tech.ccidnet.com/art/1105/20100201/1991923_1.html.
- 7 王振辉,王振铎.一种安全登录子系统的设计与实现.科学与技术工程,2012,12(22):1671-1815.
- 8 陈晨,陈怀楚,高国柱,等.基于 oracle 数据库的数据审计系统的设计与实现.实验技术与管理.2005,22(12):76-79.
- 9 魏权利,李丽萍.数据库触发器技术在 Web 软件中的应用.微型机与应用,2011,30(9):3-5.
- 10 TechTarget 数据库网站.数据库安全审计手册 [2012-05-14].<http://www.searchdatabase.com.cn/guide/databaseaudit.htm>.
- 11 MSDN.SQL Server 系统表.[http://msdn.microsoft.com/zh-cn/library/ms179932\(v=SQL.90\).aspx](http://msdn.microsoft.com/zh-cn/library/ms179932(v=SQL.90).aspx).
- 12 唐小丹.基于中心节点的数据库跟踪审计系统.计算机应用与软件,2011,28(10):159-162.
- 13 李亿红,徐韧,程祥圣.基于 XML 和 Webservice 的数据库审计系统.计算机应用与软件,2010,27(1):198-200.
- 14 李晶媛,韩慧莲.一个基于误用检测的数据库安全审计系统.计算机与数字工程,2009,37(10):116-119.
- 15 陈海东.ORACLE 数据库审计功能和触发器在医院数据监管中的应用.中国医疗设备,2008,23(7):43-44.

(上接第 233 页)

- 5 Dai XZ, Xu J, Peng YN, et al. A new Method of Improving the Weak Target Detection Performance Based on the MIMO Radar, 2006 CIE International Conference on Radar. Shanghai, 2006:24-27.
- 6 Haimovich AM, Blum RS, Cimini LJ. MIMO Radar with Widely Separated Antennas. IEEE Trans. Signal Processing, January, 2008:116-129.
- 7 Toica P, Li J, Xie Y. On Probing Signal Design For MIMO Radar. IEEE Trans. Signal Processing August, 2007,55(8):4151-4161.
- 8 Chang S, Li H, Xu CH. MIMO radar detection performance analysis. Materials Science and Information Technology. Trans Tech Publications, 2012.
- 9 常帅,李宏,徐长辉.MIMO 雷达检测性能分析.电子设计工程,2011,24:90-93.
- 10 曾涛,龙腾,王洪波.准连续波跟踪雷达信号处理机的设计与实现.北京理工大学学报,1999,19(5):604-607.