

## 机载 MIMO 雷达杂波建模与特性分析

郝琳<sup>1</sup>, 张永顺<sup>1</sup>, 李哲<sup>1</sup>, 许洁<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学防空反导学院, 西安 710051; 2. 中国人民解放军 93617 部队, 北京 101400)

**摘要:** 针对不同环境条件下的机载 MIMO 雷达地杂波建模问题, 综合考虑了杂波幅度分布模型、杂波单元散射模型以及雷达系统参数模型, 提出了一种基于复合模型的杂波建模方法; 之后又进一步考虑阵元误差、通道误差和杂波起伏等非理想因素, 建立了一种非理想条件下的机载 MIMO 雷达杂波统一模型; 通过改变模型参数对各种杂波的幅度、后向散射系数、各种误差条件的空时二维似然谱和特征谱进行仿真实验。仿真结果表明, 理想条件下机载 MIMO 雷达杂波谱具有良好的斜空时二维特性, 但在非理想条件下杂波起伏剧烈, 并且不同地貌环境起伏程度差别较大。

**关键词:** 机载 MIMO 雷达; 杂波建模; 误差条件; 杂波特性

**中图分类号:** V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)02-0046-05

## Clutter Modeling and Characteristic Analysis for Airborne MIMO Radar

HAO Lin<sup>1</sup>, ZHANG Yong-shun<sup>1</sup>, LI Zhe<sup>1</sup>, XU Jie<sup>2</sup>

(1. College of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;  
2. No. 93617 Unit of PLA, Beijing 101400, China)

**Abstract:** To the issue of MIMO airborne radar clutter modeling under different environment conditions, a clutter modeling method based on composite model was proposed by taking clutter amplitude distribution model, clutter cell scattering model and radar parameter model into consideration. Then, the error factors such as element error, channel uncertainty, clutter fluctuation were analyzed, and a clutter modeling method based on composite model under nonideal conditions was proposed. Finally, computer simulations were made to the space-time MV spectrum and the characteristic spectrum under different error conditions, different clutter amplitudes, and the back-scatter coefficients, through changing the model parameters. The simulation results show that: in ideal conditions, the clutter spectrum has good space-time characteristic; while in nonideal conditions, the clutter fluctuates tempestuously, and fluctuation is different under different environment conditions.

**Key words:** airborne MIMO radar; clutter modeling; error conditions; clutter characteristics

### 0 引言

机载雷达在对运动目标进行检测时, 如何抑制强烈的地杂波和各种类型的干扰是其面临的主要难题。杂波建模和仿真技术的研究有助于杂波抑制和目标检测方法的选取, 提高雷达整体性能。因此, 杂波建模和仿真技术一直是雷达实际应用中的研究热点之一。通过对杂波特性的深入研究, 国内外学者取得了若干有意义的成果。文献[1-4]针对不同雷达分辨率、不同

环境条件下的杂波幅度建模, 提出了机载双基地条件下的 Rayleigh 模型、Log-normal 模型和 Weibull 模型, 较好地拟合了杂波幅度数据, 但在机载 MIMO 雷达杂波建模方面, 研究较少; 文献[5-6]提出了一种机载 MIMO 雷达杂波建模方法, 但未考虑阵元幅相误差和载机姿态变化等因素; 文献[7]建立了机载 MIMO 雷达的杂波数学模型, 但该模型假设杂波幅度无起伏, 并且没有考虑非高斯过程。

本文针对上述文献杂波建模中存在的局限性, 通过将通用的杂波幅度分布模型、通用的杂波单元散射模型与雷达参数模型相结合, 并综合考虑阵元误差、通道误差和杂波起伏对杂波特性的影响, 得到非理想条件下机载 MIMO 雷达的复合杂波模型。该模型能够准

收稿日期: 2014-03-11 修回日期: 2014-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(61372033)

作者简介: 郝琳(1989—), 女, 河北邯郸人, 硕士生, 研究方向为 MIMO 雷达空时自适应信号处理。

确反映杂波的产生机理和统计特性,并且适用于不同环境条件以及不同误差因素。

## 1 机载 MIMO 雷达几何模型

正侧面机载 MIMO 雷达阵列天线几何模型如图 1 所示。假设 MIMO 雷达载机以速度  $v$  向  $x$  正方向做匀速直线运动,载机高度为  $H$ 。杂波散射单元方位角为  $\theta$ ,俯仰角为  $\varphi$ ,锥角为  $\psi$ 。假设在一次相干处理时间(CPI)内,载机移动距离远小于雷达与杂波间的斜距,即雷达与杂波源的相对几何关系近似不变。MIMO 雷达收发天线均为正侧面配置的均匀线阵,其中,发射阵元总数为  $M$ ,间距为  $d_T$ ,接收阵元总数为  $N$ ,间距为  $d_R$ ,收发间距比  $\alpha = d_T/d_R$ ,时间域相干处理脉冲数目为  $K$ ,且  $M$  个发射波形相互正交。

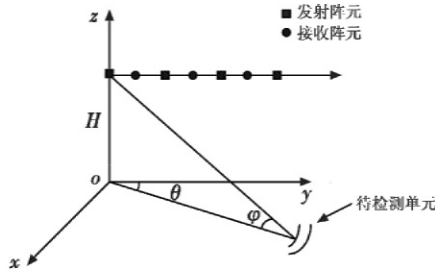


图1 机载 MIMO 雷达系统模型

Fig. 1 The model of airborne MIMO radar system

## 2 杂波幅度分布模型

杂波的非均匀性表现之一就是脉间的杂波幅度起伏,这种幅度起伏具有随机性,但总的来说,满足某种随机模型。高斯分布的杂波(假设射体的分布是完全均匀的,经大数定理可得)经平方律检波后,杂波包络的幅度服从瑞利分布,但实际的地面散射体的分布不是完全均匀的,因此杂波的概率密度函数偏离瑞利分布,可用对数—正态(Log-normal)<sup>[8-9]</sup>分布进行拟合,即

$$p(X) = \frac{1}{2\pi\sigma X} \exp\left(-\frac{[\ln(X/X_m)]^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

式中, $X_m$  是  $X$  的中值, $X \geq 0$ ;  $\sigma$  为标准偏差。

另一种拟合的近似分布为 Weibull 分布,即

$$p(X) = \alpha \lambda X^{\alpha-1} \exp(-X^\alpha) \quad (2)$$

式中, $\alpha$  和  $\lambda$  均为常数, $\alpha$  是与 Weibull 分布斜率有关的参数, $\lambda$  称为 Weibull 参数。

## 3 杂波单元散射模型

杂波单元的反射率模型决定了杂波的雷达散射截面(RCS),定义为

$$\sigma_c(r) = A_b \times \sigma_0(r) \quad (3)$$

式中: $A_b$  为杂波单元在雷达视线方向上的投影面积;

$\sigma_0(r)$  为反射率。

雷达杂波的强弱通常用单位面积的杂波雷达截面即放射率来表示。一种常用的反射率模型为 Morchin 模型<sup>[10]</sup>,其表达式为

$$\sigma_0(r) = \frac{A\sigma^0 \sin \theta_g}{\lambda} + \mu(\cot \beta_0)^2 \exp\left[-\frac{\tan(B - \theta_g)^2}{\tan \beta_0^2}\right] \quad (4)$$

式中: $\lambda$  为雷达波长; $\theta_g$  为擦地角; $A, B, \beta_0, \mu$  为模型参数。表 1 给出了地杂波下的典型仿真参数值。

表1 一组典型的地杂波仿真参数<sup>[10]</sup>

Table 1 A set of typical ground clutters simulation parameters

	$A$	$B$	$\beta_0$	$\sigma^0$
沙漠	0.001 26	$\pi/2$	0.14	$F$
农田	0.004	$\pi/2$	0.2	1
丘陵	0.012 6	$\pi/2$	0.4	1
高山	0.04	$\pi/2$	0.5	1

$$\mu = \sqrt{f_0}/4.7 \quad (5)$$

式中, $f_0$  表示雷达工作频率(GHz)。

$$F = \begin{cases} \left(\frac{\theta_g}{\theta_c}\right)^k & \theta_g < \theta_c \\ 1 & \theta_g > \theta_c \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\theta_g$  为擦地角; $\theta_c$  为 Transitional 角<sup>[11]</sup>(地、海面呈现为理想光滑区与粗糙区分界点处所对应的入射角),表示为

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{\lambda}{4\pi h_e}\right) \quad (7)$$

式中, $h_e$  为地杂波情况下地面海拔高于平均地势海拔的有效高度,或者海杂波情况下波浪高于海平面平均波高的有效高度,表示为

$$h_e = 9.3 \times \beta_0^2 \quad (8)$$

擦地角  $\theta_g$  的计算式为

$$\sin \theta_g = \frac{H}{R_l} - \frac{R_l}{2R_e} \quad (9)$$

式中: $H$  为载机飞行高度; $R_l$  为接收机到杂波单元之间的距离; $R_e = 8490$  km,为地球的曲率半径。

## 4 机载 MIMO 雷达杂波复合模型

通过对杂波幅度分布模型、杂波单元反射模型以及雷达系统参数模型的描述,可以将机载 MIMO 雷达第  $l$  个距离环第  $i$  个网格的杂波信号表示为

$$c_l(m, n, k) = \sum_{i=1}^{N_l} \frac{\sqrt{G}}{R_l^2} a_{il} e^{j\Phi} e^{j\alpha(m-1)\omega_r + j(n-1)\omega_r + j(k-1)\omega_r} \quad (10)$$

式中; $m=1, 2, \dots, M$ ,  $n=1, 2, \dots, N$ ,  $k=1, 2, \dots, K$ ,  $M$ ,  $N$  和  $K$  分别为发射阵元数、接收阵元数及脉冲数; $R_l$  为第  $l$  个距离环到杂波单元的距离; $\Phi$  为杂波的随机相位项; $a_{il}$  为杂波幅度起伏的序列; $\omega_r = (2\pi d/\lambda) \cos \theta_{E_i}$

$\cos \phi_l$  和  $\omega_l = 2\pi f_{dl}/f_r$  分别为空域角频率和时域角频率,  $d$  为子阵列间距,  $f_{dl}$  为第  $l$  个距离环杂波单元多普勒频率,  $f_r$  为脉冲重复频率 (PRF)。  $G$  可以表示为

$$G = \frac{D_u P_t G_{t0} G_{r0} \lambda^2}{(4\pi)^3 \Gamma} \sigma_c(r) \quad (11)$$

式中:  $P_t$  为雷达的脉冲功率;  $D_u = D\tau/T$ , 为占空比;  $G_{t0}$  和  $G_{r0}$  分别为发射天线和接收天线的功率增益;  $\Gamma$  为系统的损耗因子;  $\sigma_c(r)$  为杂波的雷达等效截面积。

## 5 非理想条件下的杂波模型

实际工程实现中, 由于各种非理想因素 (阵元误差、通道误差等) 的影响, 阵列流型及脉冲单元的一致性会出现一定程度的偏差或扰动, 杂波特性会产生恶化, 进而导致杂波抑制算法性能下降, 甚至失效。实际影响 MIMO 雷达阵列的非理想因素主要由阵元幅相误差、通道幅相误差和杂波起伏组成。

发射或接收阵元内部幅相误差为

$$\rho_{p_1 p_2}^{(\text{cell})} = (1 + e_{a_{p_1 p_2}}) \exp(je_{p_{p_1 p_2}}) \quad (12)$$

式中,  $e_{a_{p_1 p_2}}, e_{p_{p_1 p_2}}$  均为阵元内部的幅相误差, 且当  $p_1 \neq p_2$  时  $e_{a_{p_1 p_2}} = e_{p_{p_1 p_2}} = 0$ 。

通道失配误差主要指各接收通道幅相的不一致性, MIMO 雷达发射的  $M$  个正交信号由  $N$  个接收单元接收, 从而形成  $MN$  个接收通道。通道间的不一致系数可表示为

$$\rho_{p_1 p_2}^{(\text{channel})} = (1 + c_{a_{p_1 p_2}}) \exp(jc_{p_{p_1 p_2}}) \quad (13)$$

式中:  $p_1, p_2 = n + (m-1)M, n=1, \dots, N, m=1, \dots, M; c_{a_{p_1 p_2}}, c_{p_{p_1 p_2}}$  分别表示第  $p_1$  与  $p_2$  个通道间的失配幅相误差。

杂波起伏引起了杂波带宽的展宽。通常杂波起伏服从高斯分布。杂波相对带宽  $B_c = B/f_{\text{PRF}}$  为杂波带宽,  $f_{\text{PRF}}$  为脉冲重频, 第  $k_1$  与第  $k_2$  个脉冲间的归一化自相关系数为

$$\rho_{k_1 k_2}^{(c)} = \exp(-B_c^2 (k_1 - k_2)^2 / 8) \quad (14)$$

式中:  $k_1 = 1, 2, \dots, K; k_2 = 1, 2, \dots, K$ 。

综合考虑各种非理想因素存在下的杂波模型可表示为

$$r_l(\Delta m, \Delta n, \Delta k) = \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_s} \exp(-B_c^2 (\Delta k)^2 / 8) (1 + c_{a_{p_1 p_2}}) \exp(jc_{p_{p_1 p_2}}) \cdot \frac{(1 + e_{a_{p_1 p_2}}) \exp(je_{p_{p_1 p_2}}) G}{R_l^4} a_{ij} e^{j\Phi} e^{j\alpha \Delta m \omega_s + j\Delta n \omega_s + j\Delta k \omega_s} \quad (15)$$

## 6 仿真实验

为分析机载 MIMO 雷达的杂波分布特性, 进行了大量的计算机仿真。模型参数选取为: 发射阵元  $M = 8$ , 接收阵元  $N = 8$ , 时域采样脉冲  $K = 16$ , 工作波长  $\lambda =$

0.23 m, 接收阵元间距  $d_r = \lambda/2$ , 发射阵元间距比  $\gamma = 10$ , 载机速度  $V = 140$  km/h, 载机飞行高度  $H = 8$  km, 脉冲重复频率  $f = 2438.8$  Hz, 发射功率  $P_t = 180$  kW, 输入杂噪比  $R_{\text{CN}} = 60$  dB, 发射全正交信号。

实验 1 理想情况下不同地貌环境的杂波谱。

针对沙漠和高山两种典型的地貌特征环境, 对其空时二维杂波谱进行仿真, 杂波幅度分布模型采用正态分布, 杂波散射单元参数选择见表 1, 理想条件下机载 MIMO 雷达杂波空时二维似然谱如图 2 所示。

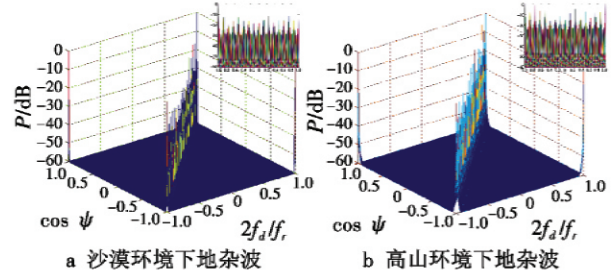


图 2 理想条件下机载 MIMO 雷达杂波空时二维似然谱

Fig. 2 The space-time MV spectrum plot of airborne MIMO radar under ideal conditions

从图 2 可以看出, 机载 MIMO 雷达杂波分布仍然具有斜对角特性, 并且在全方位角和全频率上杂波均匀分布, 这是由于 MIMO 雷达采用全方向发射的体制, 因而在空域上均具有探测性能, 相比于相控阵雷达而言具有更广的探测视角。比较图 2 中的 a 和 b 可见, 在沙漠环境下, 由于地势平坦, 杂波谱起伏较小, 在高山环境下, 杂波谱起伏相对剧烈。下面将讨论更接近于真实环境的情况, 即误差因素对杂波谱造成的影响。

实验 2 非理想情况下不同地貌环境的杂波谱。

针对式 (11) 建立的非理想条件下机载 MIMO 雷达空时二维杂波模型, 通过改变阵元误差、通道误差以及杂波起伏等误差因素, 对沙漠和高山两种不同地貌环境的空时二维杂波谱进行仿真。误差参数设置如下: 阵元误差 5%, 通道误差 5%, 杂波起伏 5%, 最后讨论 3 种误差并存时的情况。仿真结果如图 3 ~ 图 6 所示。

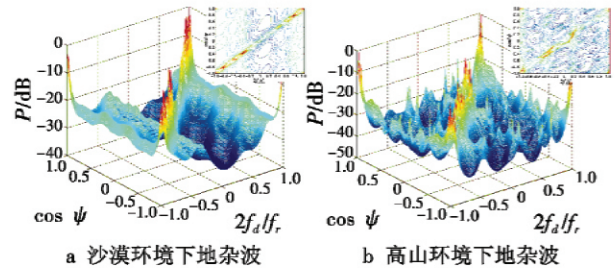


图 3 阵元误差 5% 时机载 MIMO 雷达杂波空时二维似然谱和等高线图

Fig. 3 The space-time MV spectrum and contour plot of airborne MIMO radar when the element error is 5%

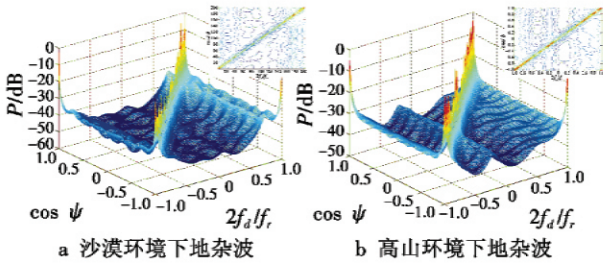


图 4 通道误差 5% 时机载 MIMO 雷达杂波空时二维似然谱和等高线图

Fig. 4 The space-time MV spectrum and contour plot of airborne MIMO radar when the channel uncertainty is 5%

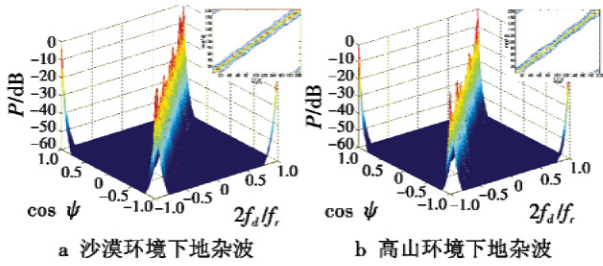


图 5 杂波起伏 5% 时机载 MIMO 雷达杂波空时二维似然谱和等高线图

Fig. 5 The space-time MV spectrum and contour plot of airborne MIMO radar when the clutter fluctuation is 5%

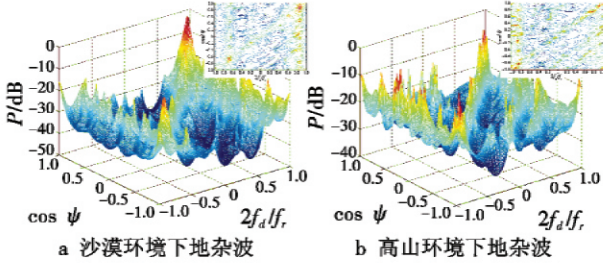


图 6 多种误差时机载 MIMO 雷达杂波空时二维似然谱和等高线图

Fig. 6 The space-time MV spectrum and contour plot of airborne MIMO radar under different kinds of errors

由图 3 可以看出,阵元误差引起杂波谱的剧烈起伏,对杂波的空时二维耦合特性造成较大影响。在阵元误差 5% 的条件下,沙漠环境由于地势平坦,杂波谱起伏相对较小,还保有较尖锐的谱峰;而在高山环境下,杂波谱起伏非常剧烈,空时耦合特性不明显,并且出现了副瓣,这是由于高山的地势起伏比沙漠剧烈得多。

由图 4 可以看出,通道误差主要造成了杂波谱的展宽和杂波起伏,高山环境的起伏更剧烈,杂波谱展宽更严重,但两种环境下杂波谱的空时耦合特性仍较明显。

由图 5 可以看出,杂波起伏对于空时二维杂波谱的影响主要在于杂波展宽,沙漠环境下的谱峰更尖锐,由等高线图可以看出其杂波分布更均匀。

在图 6 多种误差并存的条件下,二者的空时耦合

性均不明显,高山环境杂波起伏更剧烈,形成副瓣更多,对于杂波抑制造成了一定的挑战。

### 实验 3 杂波特征谱仿真。

针对机载 MIMO 雷达的杂波,通过计算其协方差矩阵的特征值得到杂波特征谱,分别在理想条件和非理想条件下进行仿真,误差参数设置与实验 2 相同。仿真结果如图 7 所示。

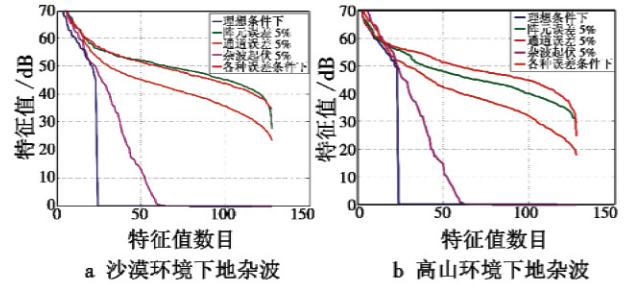


图 7 机载 MIMO 雷达杂波特征谱

Fig. 7 The characteristic spectrum of airborne MIMO radar

由图 7 可以看出,各种误差使得杂波自由度发生变化,杂波起伏对于杂波自由度的影响最小,阵元误差影响最大。杂波特征谱的变化趋势与实验 2 中杂波空时二维似然谱相对应。

## 7 结束语

针对不同地貌特征、不同误差条件下机载 MIMO 雷达杂波建模问题,本文提出了一种非理想条件下的复合杂波建模方法。仿真实验证明,理想情况下,机载 MIMO 雷达杂波谱具有良好的斜空时二维特性,而阵元误差、通道误差及杂波起伏等误差因素使杂波谱展宽并且起伏剧烈,同时也增加了杂波自由度,尤其是阵元误差影响最为明显。

### 参考文献

- [1] 林澄清,赵修斌,张光景. 雷达杂波建模与仿真[J]. 现代防御技术,2010,38(4):116-121. (LIN C Q, ZHAO X B, ZHANG G J. Modeling and simulation of radar clutter [J]. Modern Defence Technology, 2010, 38(4):116-121.)
- [2] 张柏华,张永顺,李兴成,等. 机载双基地雷达杂波特性研究[J]. 现代防御技术,2010,38(3):132-138. (ZHANG B H, ZHANG Y S, LI X C, et al. Ground clutter characteristics of airborne bistatic radar [J]. Modern Defence Technology, 2010, 38(3):132-138.)
- [3] HU C, LONG T, ZENG T. Statistic characteristic analysis of forward scattering surface clutter in bistatic radar [J]. Science China Information Sciences, 2010, 53(12):2675-2686.
- [4] HU C, LONG T, ZENG T, et al. Physical modeling and spectrum spread analysis of surface clutter in forward scat-

- tring radar [J]. *Science China Information Sciences*, 2010, 53(11):2310-2322.
- [5] CHEN C Y, VAIDYANATHAN P P. A subspace method for MIMO radar space-time adaptive processing [C]// *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 2007. doi: 10. 1109/ICASSP. 2007. 366388.
- [6] 张西川, 张永顺, 王永良, 等. 机载 MIMO 雷达空时二维杂波建模及特性分析[J]. *空军工程大学学报: 自然科学版*, 2010, 11(5):35-38. (ZHANG X C, ZHANG Y S, WANG Y L, et al. Modelling and characteristics analysis of two-dimensional space-time clutter for airborne MIMO radar[J]. *Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition*, 2010, 11(5):35-38.)
- [7] 严韬, 谢文冲, 王永良. 机载 MIMO 雷达杂波建模及杂波特性分析[J]. *雷达科学与技术*, 2010, 8(4):289-295. (YAN T, XIE W C, WANG Y L. Model and clutter characteristics analysis for airborne MIMO radar[J]. *Radar Science and Technology*, 2010, 8(4):289-295.)
- [8] 胡文琳, 王永良, 王首勇. Log-normal 分布杂波背景下有序统计恒虚警检测器性能分析[J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(3):517-520. (HU W L, WANG Y L, WANG S Y. Performance of ordered statistic CFAR detector under Log-normal distributed clutter[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(3):517-520.)
- [9] 胡文琳, 王首勇, 王永良, 等. 多分布类型杂波背景下恒虚警处理器性能分析[J]. *系统工程与电子技术*, 2007, 29(6):883-886. (HU W L, WANG S Y, WANG Y L, et al. Performance analysis of CFAR processor in multi-distribution clutter background[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2007, 29(6):883-886.)
- [10] 杜鹏飞. 机载预警雷达恒虚警率检测方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2003. (DU P F. A study on constant false alarm rate detection of airborne early-warning radar[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003.)
- [11] KARIMIAN A, YARDIM C, GERSTOFT P, et al. Multiple grazing angle sea clutter modeling[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(9):4408-4417.
- (上接第 35 页)
- [11] 郭凤羽, 禹龙, 田生伟, 等. 云计算环境下对资源聚类的工作流任务调度算法[J]. *计算机应用*, 2013, 33(8):2154-2157. (GUO F Y, YU L, TIAN S W, et al. Workflow task scheduling algorithm based on resource clustering in cloud computing environment[J]. *Journal of Computer Applications*, 2013, 33(8):2154-2157.)
- [12] 谢志强, 韩英杰, 齐永红, 等. 基于关键路径和任务复制的多核调度算法[J]. *国防科学技术大学学报*, 2014, 36(1):172-176. (XIE Z Q, HAN Y J, QI Y H, et al. A scheduling algorithm for multi-core based on critical path and task duplication[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2014, 36(1):172-176.)
- [13] CHAI S, LI Y, WANG J, et al. A list simulated annealing algorithm for task scheduling on network-on-chip[J]. *Journal of Computers*, 2014, 9(1):176-182.
- [14] SHIVASANKARAN N, KUMAR P S, NALLAKUMARASAMY G, et al. Repair shop job scheduling with parallel operators and multiple constraints using simulated annealing[J]. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 2013, 6(2):223-233.
- [15] CHAI S, LI Y B, WU C, et al. A comparison of genetic algorithm, particle swarm optimization and simulated annealing in real-time task scheduling on CMP[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 679:77-81.
- [16] ZHAO J, QIU H. Genetic algorithm and ant colony algorithm based energy-efficient task scheduling[C]// *International Conference on Information Science and Technology (ICIST)*, IEEE, 2013:946-950.
- [17] GONZALEZ-SIEIRA A, BUGARIN A, MUCIENTES M, et al. A tabu search optimization module for scheduling: Design and integration in the open source tool LibrePlan for project management[C]// *The 8th Iberian Conference on Information Systems and Technologies*, IEEE, 2013:1-6.
- [18] 潘玉林, 陈勇, 姚新宇, 等. 多层次分布实时仿真系统的静态调度策略[J]. *系统仿真学报*, 2011, 23(1):85-88. (PAN Y L, CHEN Y, YAO X Y, et al. Task matching and scheduling for multi-level distributed real-time simulation system[J]. *Journal of System Simulation*, 2011, 23(1):85-88.)
- [19] 王小乐, 黄宏斌, 邓苏. 处理顺序约束的信息物理融合系统静态任务表调度算法[J]. *自动化学报*, 2012, 38(11):1870-1879. (WANG X L, HUANG H B, DENG S. List scheduling algorithm for static task with precedence constraints for cyber-physical systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(11):1870-1879.)
- [20] DAOU M I, KHARMA N. A high performance algorithm for static task scheduling in heterogeneous distributed computing systems[J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2008, 68(4):399-409.