

多基地相参雷达抗主瓣干扰性能分析

王 强¹, 张永顺¹, 李 欣¹, 黄昌勇²

(1. 空军工程大学防空反导学院,陕西西安,710051;2. 95774 部队,云南曲靖,655601)

摘要 提出了多基地相参雷达抗主瓣干扰的新思路。分析了多基地相参雷达抗主瓣干扰的可行性,提出了改进的 2 步自适应算法。通过采用 5 种不同算法的仿真对比,结果表明:提出的 NVFF-RLS 自适应算法,无论从收敛速度还是目标信号分离效果均优于其它 4 种算法,使得 SINR 可改善约 30~36 dB,对消效果体现了多基地相参雷达抗主瓣干扰的优势所在。

关键词 多基地相参雷达;抗主瓣干扰;NVFF-RLS

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.03.009

中图分类号 TN973 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)03-0037-05

Anti-main-lobe Jamming Capability Analysis of Multi-static Coherent Radar

WANG Qiang¹, ZHANG Yong-shun¹, LI Xin¹, HUANG Chang-Yong²

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Unit 95774, Qujing 655601, Yunnan, China)

Abstract: The paper puts forward a new thinking of anti-main-lobe jamming based on multi-static coherent radar. Firstly, the paper analyzes of the feasibility of the anti-main-lobe jamming based on multi-static coherent radar; secondly, proposes the improved two-steps adaptive algorithm. Through the comparison between the simulations of five different algorithms, the result shows that the NVFF-RLS adaptive algorithm proposed in this paper is better than other four algorithms in both the convergence speed and the effect of target signal separation which improve SINR about 30 dB to 36 dB. Simultaneously the cancellation effect states the advantages and the important military value of the anti-main-lobe jamming based on multi-static coherent radar.

Key words: multi-static coherent radar; anti-main-lobe jamming; NVFF-RLS

多基地雷达因其收发分置、布站灵活多变、收发组配多变以及接收站的数量不定,在抗外部人为干扰方面有其自身优势。常见的外部人为干扰,进入接收机或从天线旁瓣,或从天线主瓣。若干扰从旁瓣进入接收机,目前的旁瓣对消、旁瓣消隐技术可有效实施对抗。若干扰从主瓣进入接收机,传统的对抗方法如自适应波束形成、极化信号处理,都不同程度引起主瓣严重畸变、目标响应显著降低等问

题^[1-2]。为此本文从多基地雷达角度出发,提出了多基地相参雷达抗主瓣干扰的新思路。

1 可行性分析与论证

1.1 理论分析

相参多基地雷达之所以能实现抗主瓣干扰,可从雷达特性与信号特性 2 方面分析。

收稿日期: 2012-12-15

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2010JQ8007)

作者简介: 王 强(1989-),男,陕西三原人,硕士生,主要从事多基地雷达抗干扰技术研究。

E-mail: 1019611183@qq.com

1.1.1 雷达相参特性

多基地雷达的各自接收站要能实现联合信息处理,其需要保持与所利用的发射机频率同步(可采用同一本振频率源),而为了实现相参积累,多基地雷达的接收系统还必须满足与发射机保持相位同步,即保持相参性^[3-5]。这是实现多基地雷达抗主瓣干扰的首要条件。

1.1.2 信号特性

在有源干扰下,进入接收机的信号为有用目标回波信号与干扰信号。这2种信号的作用机制是不同的。目标回波信号是通过发射机发射电磁波经过目标的2次散射得到的,而干扰信号是通过干扰机释放直接进入雷达接收机得到的。这2种信号各自的时空相关性有着明显的差异。经过2次散射的目标回波信号具有弱时空相关性(可以通过选择长基线,即合理的布站实现),而干扰信号具有强时空相关性。利用这一特性可以实现主瓣干扰的对消,从而提取出目标回波信号^[6]。

1.2 理论论证

1.2.1 目标回波信号的相关性分析

要使目标回波信号具有弱相关性,可通过合理的布设各接收站的位置来实现。布站情况由下式决定^[6]:

$$\frac{L_{12}}{R_r} \geq \min \left[\frac{0.8\lambda}{l_{12}}, \frac{3\lambda}{\Delta\theta_y}, \frac{3\lambda}{\Delta\theta_z} \right] \quad (1)$$

式中,参数的意义见图1。图中 r_r 、 r_r 分别为目标到 T_R 站与 R 站方向上的单位矢量, r_{r-r} 为沿着 β_2 角平分线上的单位矢量, Δr 指从 r_r 到 r_r 垂直的单位矢量, L_{12} 为 L_{r-r} 在 Δr 方向上的投影长度, $\Delta\theta_y$ 、 $\Delta\theta_z$ 分别指关于 y 轴和 z 轴旋转的初始目标方位的不确定性范围, l_{12} 、 l_y 、 l_z 分别指目标尺寸沿 Δr 、 y 、 z 方向上的有效长度。

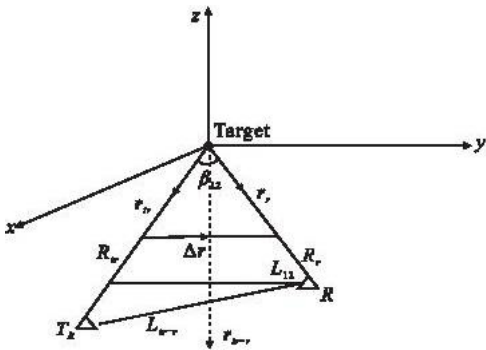


图1 起伏目标的空间分析

Fig.1 Fluctuating target spatial analysis

1.2.2 目标回波信号与干扰模型

本文采用的多基地雷达类型为 T_R/R ,即由一部单基地雷达与一部接收站组成。当目标被发射站

照射时,第 i 站接收到的目标回波信号为^[6]:

$$S_i(t) = a_{si} \exp(-j\phi_i) s_0(t - t_{si}) \exp[j(\omega + \Omega_i)(t - t_{si})] \quad (2)$$

式中: a_{si} 为信号均方根幅度; ϕ_i 为初始相位; t_{si} 是信号传播延迟; ω 、 Ω_i 分别为载波频率和多普勒频移; $s_0(t)$ 为归一化的复包络波形。

对式(2)进行傅里叶变换,同时考虑到接收站的天线方向图(Antenna Difference Pattern,ADP),则回波信号的频谱为:

$$\psi_i(\omega) = a_{si} g_i(\beta_i, \epsilon_i, \omega) \exp(-j\phi_i) \phi(\omega - \omega - \Omega_i) \exp(-j\omega t_{si}) \quad (3)$$

式中: $g_i(\beta_i, \epsilon_i, \omega)$ 为第 i 站归一化ADP, β_i, ϵ_i 为目标相对于第 i 站的角坐标。

输入端干扰加噪声功率谱矩阵的元素为:

$$\kappa_j(\omega) = \sqrt{N_i N_j} \delta_{ij} + q_{mi} q_{mj} g_i(\beta_{mi}, \epsilon_{mi}, \omega) g_j^*(\beta_{mj}, \epsilon_{mj}, \omega) F_m(\omega - \omega_m) \exp[j(\omega \tau_{mij} + \Delta\phi_{mij})] \quad , i, j = 1, 2 \quad (4)$$

式中: N_i 为第 i 接收站自身噪声的单边带功率谱密度;当干扰源 m 位于第 i 站主瓣方向上时, q_{mi}^2 为输入干扰比; $\beta_{mi}, \epsilon_{mi}$ 分别为干扰源 m 相对于第 i 站的角坐标; τ_{mij} 、 $\Delta\phi_{mij}$ 分别为干扰源 m 相对于第 i 个和第 j 个站输入端的到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)和相位差; $F_m(\omega)$ 是干扰源 m 复包络归一化功率谱密度。同时满足 $\kappa_j(\omega) = \kappa_j^*(\omega)$ 。

1.2.3 信号最优检测准则

借助以上所建立的模型,为了进行目标检测的决策判断,必须要有相应的检测准则。在此采用最优似然比准则,可以得到如下似然比检验模型^[6]:

$$\ln \Lambda = L = \text{Re} \int_{-\infty}^{\infty} \psi^*(\omega) f(\omega) \chi(\omega) d\omega \quad (5)$$

式中: $\psi^*(\omega)$ 、 $\chi(\omega)$ 分别为目标回波信号与所有接收信号(包括目标回波、干扰和噪声等)的频谱; $f(\omega) = \kappa^{-1}(\omega)$ 且满足 $f_{ij}(\omega) = f_{ji}^*(\omega)$ 。

将式(5)进一步简化可得:

$$L = \text{Re} \sum_{i=1}^2 \int_{-\infty}^{\infty} \psi_i^*(\omega) f_{ii}(\omega) \xi(\omega) d\omega \quad (6)$$

式中:

$$\xi(\omega) = \chi(\omega) + \sum_{j=1, j \neq i}^2 \frac{f_{ij}(\omega)}{f_{ii}(\omega)} \chi_j(\omega) \quad (7)$$

就 T_R 站而言,它表示 R 站的干扰加自噪声之和对 T_R 站输入端干扰与噪声之和的最佳均方根近似,并且符号相反。这样处理后可在前端加法器输出端有效抑制总的干扰功率。式中 $f_{ij}(\omega)/f_{ii}(\omega)$ 可表明,主瓣干扰对消对目标回波信号没有依赖性。这样就实现了不抑制目标回波而消除主瓣干扰的第一步。经过线性滤波器后的输出信号频谱为:

$$\psi_{bc}(\omega) = \psi(\omega) +$$

$$\left[1/f_{ii}(\omega)\right] \sum_{j=1, j \neq i}^2 f_{ij}(\omega) \psi_j(\omega), i, j=1, 2 \quad (8)$$

下面将分析论证该方法的可行性:由式(4)知,当 $q_{mi}^2(q_{mj}^2) \rightarrow \infty$ 时, $\kappa_{ij}(\omega) \rightarrow \infty$, 进一步 $1/\kappa_{ii}^{-1}(\omega) = 1/f_{ii}(\omega) \rightarrow 0$ 。为了实现干扰的有效抑制即 $\psi_{bc}(\omega) = \psi(\omega)$, 从 $q_{mi}^2(q_{mj}^2) \rightarrow \infty$ 角度不易实现。但可以从 $f_{ii}(\omega) = \kappa_{ii}^{-1}(\omega)$ 考虑, 即满足 $|\kappa_{ii}(\omega)| = 0$ 。由于矩阵 $\kappa(\omega)$ 的秩为 1, 而维数等于接收站的个数 2, 因此 $|\kappa_{ii}(\omega)| = 0$ 是成立的。综上分析, 多基地相参抗主瓣干扰具有可行性。

2 改进的 2 步自适应干扰对消算法

基于文献[6]中提到的 2 步自适应对消算法, 本文做出如下改进。

2.1 预自适应过程

针对预自适应中提到的 T_R 站与 R 站 2 路信号参数估计, 结合有源多基地雷达的特点, 在进行 2 接收站间目标与干扰信号各自 TDOA 估计的同时, 必须考虑目标与干扰机的运动, 会产生相对 2 接收站的不同多普勒频率。根据文献[6]中提出的回波模型, 就本文研究的 T_R/R 多基地雷达, 在此分别计算 T_R 站、 R 站各自的到达时间 (Time of Advent, TOA) 与 f_d 。

2.1.1 T_R 站信号参数估计

由于 T_R 站为一个单基地雷达。则目标与干扰信号的 TOA 与 f_d 分别为:

$$\begin{cases} \text{TOA}_{\text{mtr}} = \frac{2R_{\text{mtr}}}{c + v_{\text{mtr}}} & , \quad f_{\text{mtrd}} = \frac{2v_{\text{mtr}}}{\lambda} \\ \text{TOA}_{\text{gr}} = \frac{R_{\text{gr}}}{c + v_{\text{gr}}} & , \quad f_{\text{grd}} = \frac{v_{\text{gr}}}{\lambda} \end{cases} \quad (9)$$

2.1.2 R 站信号参数估计

针对 R 站接收到的目标与干扰信号的 TOA 与 f_d 估计, 可用下式:

$$\begin{cases} \text{TOA}_{\text{mr}} = \frac{R_{\text{mtr}} + R_{\text{mr}}}{c + v_{\text{mr}}} + \frac{R_{\text{mr}} v_{\text{mtr}} + v_{\text{mr}} R_{\text{mtr}}}{c(c + v_{\text{mr}})} & , \quad f_{\text{mrd}} = \frac{v_{\text{mtr}} + v_{\text{mr}}}{\lambda} \\ \text{TOA}_{\text{gr}} = \frac{R_{\text{gr}}}{c + v_{\text{gr}}} & , \quad f_{\text{grd}} = \frac{v_{\text{gr}}}{\lambda} \end{cases} \quad (10)$$

由式(9)~(10)得目标信号、干扰信号各自的 TDOA 为:

$$\begin{cases} \text{TDOA}_m = \frac{2R_{\text{mtr}}}{c + v_{\text{mtr}}} - \frac{R_{\text{mtr}} + R_{\text{mr}}}{c + v_{\text{mr}}} - \frac{R_{\text{mr}} v_{\text{mtr}} + v_{\text{mr}} R_{\text{mtr}}}{c(c + v_{\text{mr}})} \\ \text{TDOA}_g = \frac{R_{\text{gr}}}{c + v_{\text{gr}}} - \frac{R_{\text{gr}}}{c + v_{\text{gr}}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: c 为电磁波传播速度; v_{mtr} 、 v_{mr} 分别为目标相对于发射站与接收站的速度; v_{gr} 、 v_{gr} 分别为干扰相对

于发射站与接收站的速度。这 4 种速度带有正负性, 正性表示靠近雷达, 负性表示远离雷达; R_{mtr} 、 R_{mr} 分别为目标到发射站与接收站的距离; R_{gr} 、 R_{gr} 分别为干扰源到发射站与接收站的距离。

2.2 最终自适应过程

在最终自适应过程中, 本文提出了一种新型遗忘因子的递推最小二乘 (RLS) 权值更新算法 (NVFF-RLS)。步骤为: ①初始权值 $W_0 = A^{-1} \cdot P$ 。式中, A 为来自 R 站 M 组采样 $x_2^{(m)}(n)$ 的相关矩阵, P 为 $x_2^{(m)}(n)$ 与来自 T_R 站的一组 n 个采样 $x_1(n)$ 的相关矩阵; ②更新权值, 见式(12)。

$$\begin{cases} e(n) = x_1(n) - \sum_{m=1}^M a_m^H(n) x_2^m(n) \\ k(n) = \frac{Z(n-1)x_2(n)}{\lambda + x_2^H(n)Z(n-1)x_2(n)} \\ Z(n) = \frac{1}{\lambda} [Z(n-1) - k(n)x_2^H(n)Z(n-1)] \\ \lambda = \alpha |\cot(e(n))| \\ \omega(n) = \omega(n-1) + k(n)e^*(n) \end{cases} \quad (12)$$

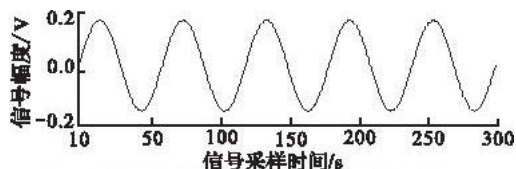
3 仿真分析

3.1 场景设置

2 站间基线长度 $L=20$ km (站间目标回波的弱相关区), 目标机垂直于基线等高匀速飞行, 飞行高度 $h=5$ km, 速度 $v=700$ m/s。干扰机沿着偏离目标机 0.2° 且靠近 T_R 站的方向飞行, 其飞行参数与目标机相同。

3.2 参数设置

假设 T_R 站发射正弦信号, 信号载频 1 GHz, 采样频率 5 GHz, 数据预处理时间延迟节数 $K=5$ 。为了研究分析本文所提出 NVFF-RLS 算法的干扰对消效果, 在此将其与另外 4 种算法进行比较: ①基本 LMS 算法^[7], 步长因子为 0.007; ②文献[8]中提出的 VSS-LMS 算法, 取其最优参数设置 ($\alpha=3$, $\beta=0.008$, $\gamma=1$); ③基本 RLS 算法^[9], 遗忘因子为 0.98; ④文献[10]中提到的最优 VFF-RLS 算法, 最小遗忘因子为 0.98。仿真从目标机与干扰机分离时刻开始, 至 2 者横向间隔 $C_r=60$ m 时结束。仿真结果见图 2~4。



(a) 未受干扰时, 信息融合中心的目标回波信号

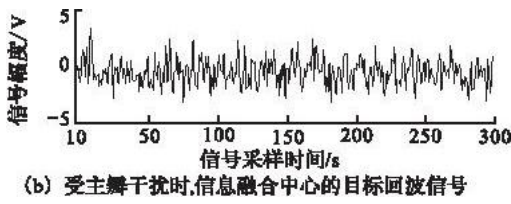


图2 被干扰前后的 T_r 站回波信号

Fig.2 Disturbance before and after the echo sign of T_r

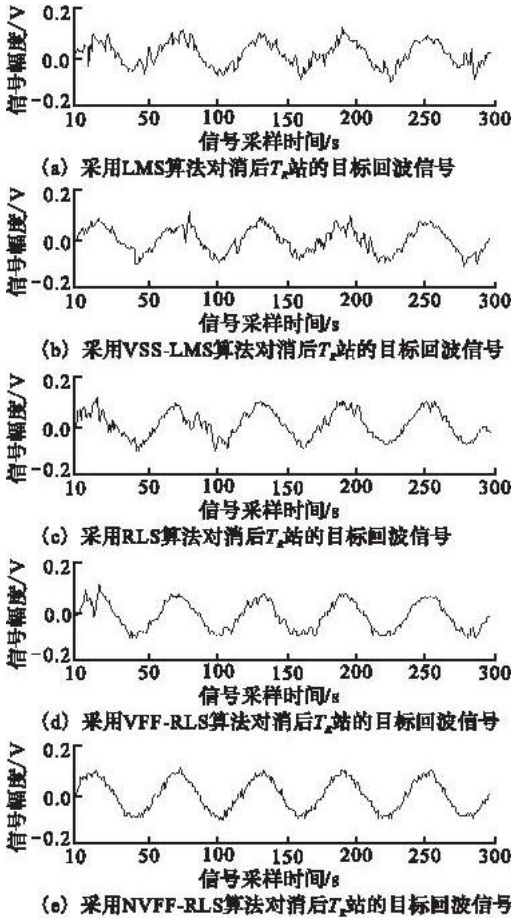


图3 采用5种不同算法的干扰对消结果

Fig.3 Interference cancellation results of using five different algorithm

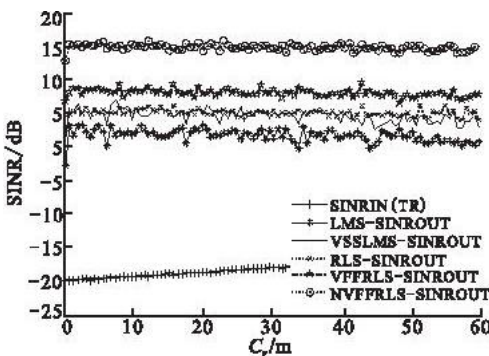


图4 经过5种不同算法干扰对消后的 SINROUT

Fig.4 SINROUT after interference cancellation using five kinds of different algorithm

比较图2~4可得以下结论:①改进的2步自适应算法可有效对消主瓣干扰;②不同自适应算法的

对消效果有明显差异,采用本文提出的 NVFF-RLS 算法对消效果最佳(收敛速度最快,分离得到的目标信号效果最优);③从输入与输出 SINR 对比分析知,采用 LMS 算法 SINR 改善效果最差(约 15~20 dB),VSSLMS 与 RLS 算法的改善效果相当(约 20~25 dB),VFFRLS 算法可改善约 23~27 dB,而本文提出的 NVFF-RLS 算法改善效果最佳,可改善约 30~36 dB。

4 结语

主瓣干扰严重影响了地面雷达探测目标,为雷达对抗提出了新的课题。结合多基地雷达的特点,本文提出了多基地相参雷达抗主瓣干扰的新思路。首先分析了多基地相参雷达抗主瓣干扰的可行性,然后提出了改进的2步自适应算法,在此分别研究了5中不同算法的干扰对消效果,仿真结果表明,本文提出的 NVFF-RLS 算法,无论从收敛速度还是分离目标信号效果都优于其它4种算法,同时也体现了多基地相参雷达抗主瓣干扰的优势所在。

参考文献(References):

[1] 宋丹,曲绍君,李高鹏.基于失配的自适应干扰抑制系统[J].计算机测量与控制,2012,20(2):480-481.
SONG Dan,QU Shaojun,LI Gaopeng. An adaptive interference suppression system using mismatched filtering[J].Computer measurement & control,2012,20(2):480-481. (in Chinese)

[2] Giuseppe A,Fabrizio. Robust adaptive beamforming for HF surface wave over-the-horizon radar[J].IEEE transaction on aerospace and electronic system,2004,40(2):510-524.

[3] 葛先军,张财生,宋杰,等.无源双基地雷达随机初相补偿及误差影响分析[J].系统工程与电子技术,2012,34(10):2023-2024.
GE Xianjun,ZHANG Caisheng,SONG Jie,et al. Phase compensation and error analysis for non-cooperative bistatic radar[J]. Systems engineering and electronics,2012,34(10):2023-2024. (in Chinese)

[4] 刘连柱,邢厚刚.相参末制导雷达抗箔条干扰效果研究[J].舰船电子对抗,2012,35(2):84-86.
LIU Lianzhu,XING Hougang. Research into the effect of coherent terminal guidance radar against chaff jamming [J].Shipboard electronic countermeasure,2012,35(2):84-86. (in Chinese)

[5] 叶昊儒.相参雷达与非相参雷达的差异分析[J].通信与信息技术,2010,14(3):17-18.
YE Haoru. Coherent radar and non-coherent radar

difference analysis [J]. Communication and information technology, 2010, 14(3):17-18. (in Chinese)

- [6] Victor S, Chernyak. Fundamentals of multisite radar systems; multistatic radars and multiradar systems [M]. Beijing: Publishing house of electronics industry, 2011.
- [7] 龚松显, 刘树刚, 刘跃宣. 宽带信号中的窄带干扰抑制 LMS 算法与 RLS 算法的仿真实现 [J]. 数字国防, 2012(1):44-45.
GONG Songxian, LIU Shugang, LIU Yuexuan. Simulation of wideband signals in the narrow band interference suppression based on LMS and RLS algorithm [J]. Digital defense, 2012(1):44-45. (in Chinese)
- [8] AO Wei, XIANG Wanqin, ZHANG, Youpeng. A new variable step size LMS adaptive filtering algorithm [C]//IEEE international conference on com-

puter science and electronics engineering. [S.l.]: IEEE press, 2012: 265-267.

- [9] Kapil Belpatre, Mrs Bavhute M R. Comparative performance study between the time-varying LMS (TV-LMS) algorithm LMS algorithm and RLS algorithm [C]//National conference on innovative paradigms in engineering & technology. [S.l.]: IEEE press, 2012: 6-7.
- [10] 邵亚勇, 竺小松. RLS 算法及其改进形式在信号分离中的应用分析 [J]. 电子测试, 2012, 1(1):24-25.
SHAO Yayong, ZHU Xiaosong. Application of RLS algorithm and its improved forms in signal separation [J]. Electronic test, 2012, 1(1):24-25. (in Chinese)
- (编辑:田新华)

(上接第 36 页)

- [2] 商长安. 空防对抗仿真的系统动力学模型研究 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(17):5994-5997.
SHANG Changan. Study on a system dynamics model of simulation of air-defense confrontation [J]. Journal of system simulation, 2009, 21(17):5994-5997. (in Chinese)
- [3] 黄树彩, 周延延, 韦刚. 基于天基信息的反导作战效能分析 [J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(10):2414-2417.
HUANG Shucui, ZHOU Yanyan, WEI Gang. Operation effectiveness analysis of anti-TBM system with space-based information support [J]. Systems engineering and electronics, 2009, 31(10):2414-2417. (in Chinese)
- [4] 苏昆, 申卯兴, 高培南. 防空反导一体化作战体系研究 [J]. 航天制造技术, 2011, 69(5):65-68.
SU Kun, SHEN Maoxing, GAO Peinan. Research on integrated combat system for air defense and antimissile [J]. Aerospace manufacturing technology, 2011, 69(5):65-68. (in Chinese)
- [5] 郭岗, 申卯兴. 基于改进 ADC 模型的反导作战效能量化分析 [J]. 现代防御技术, 2012, 40(6):109-114.
GUO Gang, SHEN Maoxing. Quantize analysis for operational effectiveness of anti-TBM system based on improved ADC model [J]. Modern defence tech-

nology, 2012, 40(6):109-114. (in Chinese)

- [6] 王其藩. 系统动力学 [M]. 北京:清华大学出版社, 1998.
WANG Qifan. System dynamics [M]. Beijing: Tsinghua university press, 1998. (in Chinese)
- [7] 商长安, 刘志杰, 李国力, 等. 网络中心战的系统动力学模型研究 [J]. 现代防御技术, 2006, 34(5):23-26.
SHANG Changan, LIU Zhijie, LI Guoli, et al. Research on system dynamics model of network centric warfare [J]. Modern defence technology, 2006, 34(5):23-26. (in Chinese)
- [8] 乔榕. 赛博空间的发展 [J]. 国际电子战, 2009(11):25-28.
QIAO Rong. Development of cyberspace [J]. International electron operation, 2009(11):25-28. (in Chinese)
- [9] Craig W, Kirkwood. System dynamics methods: a quick introduction [M]. Tempe: College of business arizona state university, 1998.
- [10] System Dynamics Group. MIT sloan school of management guided study program in system dynamics [R]. System dynamics in education project, 1998.
- (编辑:田新华)