

一种有效的 RGPO 干扰鉴别算法及性能分析

周文辉¹, 李 琳², 陈国海¹

(1. 南京电子技术研究所, 江苏南京 210013; 2. 北京环球信息应用和开发中心, 北京 100094)

摘 要: 本文研究目标跟踪时的距离门后拖(RGPO)干扰鉴别问题,分析了现有²检验算法的不足,在²检验算法的基础上,提出了一种采用信号似然比预处理和移位寄存器后处理相结合的鉴别算法,称之为Chi + SLR + register算法.该算法在最佳寄存器长度下,能使误判概率最小.在相当宽的寄存器长度范围内,该算法都有很好的鉴别性能.此外,该算法在有SOI干扰时,也能保持高的鉴别率,因而是一种更有效的RGPO干扰鉴别算法.

关键词: 距离门拖引; 距离门后拖干扰鉴别; 电子反对抗; SOI干扰; 目标跟踪

中图分类号: TP95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 06-1165-05

An Effective Algorithm for Discriminating RGPO with Performance Analysis

ZHOU Wen-hui¹, LI Lin², CHEN Guo-hai¹

(1. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing, Jiangsu 210013, China;

2. Beijing Application and Development Center of Round-the-world Information, Beijing 100094, China)

Abstract: Range-Gate-Pull-Off (RGPO) is a common type of electronic countermeasure (ECM) technique used to defeat or degrade tracking radars. The RGPO goal is to generate an ECM pulse that is a replica of the radar transmitted pulse with delay and amplification so as to pull the radar range gate off the target. Although a chi-square test algorithm for rejecting RGPO false targets has been proposed, it has low RGPO discrimination ratio and more error decisions in the absence of RGPO. To overcome its shortcomings, a new algorithm named as Chi + SLR + register is presented, which integrates the chi-square algorithm with a shift register and a signal likelihood ratio (SLR) test. This new algorithm has minimum probability of error decisions in specific length of shift register, and better performance than other algorithms in wide scope length of shift register. Additionally, the new algorithm is also effective in SOI environment.

Key words: range gate pull off (RGPO); RGPO discrimination; ECCM; SOI; target tracking

1 引言

距离波门拖引是常见的有源欺骗式干扰,分为前拖(RGPI:Range Gate Pull In)和后拖(RGPO:Range Gate Pull Off)两种形式. RGPI将距离波门向距离减小的方向拖引,在雷达显示屏上产生目标逼近雷达的假象,实施RGPI干扰时,干扰脉冲必须超前于目标回波. RGPO干扰则相反,假目标向远离雷达的方向运动,干扰脉冲滞后于目标回波.实施RGPI干扰比较困难^[1],实际中常采用RGPO干扰,它通过重复发射延迟放大的雷达脉冲信号拖引距离波门.

由于RGPO干扰产生的假目标量测回波幅度大于目标量测,传统跟踪器易于被欺骗而跟踪到假目标上,之后会把距离波门拖引开,最终导致目标失跟.为对抗RGPO干扰,应对其进行抑制处理,首先要鉴别RGPO干扰是否存在,如果不能准确鉴别,就会发生无干扰时采

取了抑制处理,或有干扰时没有采取抑制处理,无论那种情形都会影响到目标的正常跟踪,所以对RGPO干扰的正确鉴别是一个很重要的问题.

Kirubarajan^[2]等通过检测是否有多个量测的信噪比超过预设门限的方法来鉴别RGPO干扰,但门限的选取缺乏理论依据. Li^[3]等在Neyman-Pearson的框架下构造出两种类型的二元假设检验对RGPO干扰进行鉴别,该方法理论性比较强,但实际操作起来较为困难. Slocumb^[4]等根据RGPO干扰产生的假目标量测在方位和俯仰上与真目标量测相近,在径向距离上比真目标量测远的特点构造出一种基于²检验的鉴别算法.

然而,在实际的目标跟踪过程中,目标姿态以及目标相对雷达的距离不断发生变化,目标的检测概率也随之变化,外部跟踪环境中还可能同时存在SOI干扰,导致上述²检验算法存在着难以克服的误判问题.为减少误判,本文提出一种将信号似然比预处理、²检验和

移位寄存器后处理联合的干扰鉴别算法,研究表明该算法在相当宽的寄存器长度范围内以及存在 SOI 干扰情况下都具有很好的干扰鉴别性能,是一种更加有效的鉴别算法。

2 基于 χ^2 检验的鉴别算法

设 t_k 时刻有 m_k 个确认量测,将这些量测按距离从近到远排列。假定每个量测的方位和俯仰服从相互独立的高斯分布,即

$$\begin{cases} b_i \sim N(b, \frac{\sigma_b^2}{b_i}), \\ e_i \sim N(e, \frac{\sigma_e^2}{e_i}), \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, m_k \quad (1)$$

其中 (b, e) 为目标的真实方位和俯仰; (b_i, e_i) 为第 i 个量测的方位和俯仰; $\frac{\sigma_b^2}{b_i}$ 和 $\frac{\sigma_e^2}{e_i}$ 分别为第 i 个量测的方位方差和俯仰方差,与观测信噪比有关。于是,对量测 i, j , 有

$$\begin{cases} \frac{b_i - b_j}{\sqrt{\frac{\sigma_b^2}{b_i} + \frac{\sigma_b^2}{b_j}}} \sim N(0, 1), \\ \frac{e_i - e_j}{\sqrt{\frac{\sigma_e^2}{e_i} + \frac{\sigma_e^2}{e_j}}} \sim N(0, 1), \end{cases} \quad i < j; i, j = 1, 2, \dots, m_k \quad (2)$$

构造如下的统计量

$$T_{ij} = \frac{(b_i - b_j)^2}{\frac{\sigma_b^2}{b_i} + \frac{\sigma_b^2}{b_j}} + \frac{(e_i - e_j)^2}{\frac{\sigma_e^2}{e_i} + \frac{\sigma_e^2}{e_j}}, \quad i < j; i, j = 1, 2, \dots, m_k \quad (3)$$

由式(2)可知 $T_{ij} \sim \chi^2(2)$, 即 T_{ij} 服从自由度为 2 的 χ^2 分布。

根据 RGPO 干扰的特点,可以认为在有 RGPO 干扰时,存在两个量测的方位和俯仰来自期望值相同的总体,则统计量 T_{ij} 服从 χ^2 分布,因而可构造如下的 χ^2 检验:

$$H_0: I_{RGPO} = 1, H_1: I_{RGPO} = 0 \quad (4)$$

其中 $I_{RGPO} = 1$ 表示有 RGPO 干扰, $I_{RGPO} = 0$ 表示没有 RGPO 干扰。在 H_0 成立的条件下,统计量 T_{ij} 服从 $\chi^2(2)$ 分布,则上述检验问题的单侧拒绝域为

$$V = \{ T_{ij} > \chi^2_{1-\alpha}(2) \} \quad (5)$$

其中 $\chi^2_{1-\alpha}(2)$ 是 $\chi^2(2)$ 分布关于显著性水平 α 的上侧分位数。

上述假设检验方法属于显著性检验,它面临两类误判问题:一是有干扰时却鉴别为无干扰,称为“弃真”误判;二是无干扰时却鉴别为有干扰,称为“取伪”误判。“弃真”误判的概率由显著性水平 α 控制,一般比较小。因此,当有干扰时,在高信噪比量测情况下,由于测角方差比较小,该检验方法鉴别效果较好。当无干扰时,在低信噪比量测情况下,如小目标跟踪或目标起伏,由于测角方差比较大,这种检验方法易将相当分散

的两个角量测误判为有干扰,即出现“取伪”误判。

Slocumb^[4]指出,为了减少“取伪”误判,必须将此检验限制在高信噪比的量测上,但 Slocumb 并没有指出量测信噪比多大时才进行检验,下面使用信号似然比(SLR: Signal Likelihood Ratio)预处理来解决这一问题。

3 信号似然比预处理

信号似然比预处理是指预设一个 SLR 门限 TH_{SLR} , 只有当两个待检验量测的 SLR 都超过 TH_{SLR} 时,再使用上述 χ^2 检验算法鉴别是否存在 RGPO 干扰。

Blackman^[5]仅得到没有远距离支援干扰(SOI)干扰条件下的 SLR 计算公式,而雷达实际工作时,不仅会受到敌方实施的 RGPO 干扰,也可能同时受到 SOI 干扰。下面采用 Blair^[6,7] 给出的 SOI 模型推导两类干扰同时存在时的 SLR 计算公式。

设 H_1 假设表示有目标, H_0 假设表示没有目标,记每个检测单元观测到的回波信噪比 S_o 在 H_1 和 H_0 假设下的概率密度分别为 $f(S_o | H_1, S_{ave})$ 和 $f(S_o | H_0)$, 其中 S_{ave} 为目标的平均(期望)回波信噪比,信号似然比定义为^[8]

$$\text{SLR}(S_o | S_{ave}) = \frac{f(S_o | H_1, S_{ave})}{f(S_o | H_0)} \quad (6)$$

由于获取到的量测都满足观测信噪比超过检测门限 TH , 因此

$$\text{SLR}(S_o | S_{ave}, S_o > \text{TH}) = \frac{f(S_o | H_1, S_{ave}, S_o > \text{TH})}{f(S_o | H_0, S_o > \text{TH})} \quad (7)$$

根据混合概率密度函数的定义^[8],对随机变量 x 有

$$f(x | x > T) = \begin{cases} 0, & x < T \\ f(x) / \int_T^\infty f(x) dx, & x > T \end{cases} \quad (8)$$

于是

$$\begin{aligned} \text{SLR}(S_o | S_{ave}, S_o > \text{TH}) &= \frac{f(S_o | H_1, S_{ave}) / \int_{\text{TH}}^\infty f(S_o | H_1, S_{ave}) dS_o}{f(S_o | H_0) / \int_{\text{TH}}^\infty f(S_o | H_0) dS_o} \\ &= \frac{f(S_o | H_1, S_{ave}) / P_D}{f(S_o | H_0) / P_{fa}} \end{aligned} \quad (9)$$

其中 P_D 表示检测概率, P_{fa} 表示虚警概率。

设目标起伏模型服从 Swerling III 型分布,在 SOI 干扰条件下,可得到(详细推导过程比较繁琐,这里仅给出结果)

$$f(S_o | H_0) = \frac{1}{J+1} \exp\left[-\frac{S_o}{J+1}\right] \quad (10)$$

$$P_{fa} = \exp\left[-\frac{\text{TH}}{J+1}\right] \quad (11)$$

$$f(S_O | H_1, S_{ave}) = \frac{4}{(S_{ave} + 2J + 2)^2} \left\{ J + 1 + \frac{S_O S_{ave}}{S_{ave} + 2J + 2} \right\} \exp\left[-\frac{2S_O}{S_{ave} + 2J + 2} \right] \quad (12)$$

$$P_D = \left[1 + \frac{2S_{ave} TH}{(S_{ave} + 2J + 2)^2} \right] \exp\left[-\frac{2TH}{S_{ave} + 2J + 2} \right] \quad (13)$$

其中 $J = \sum_{i=0}^{i_k} G_{sdc}(R)$, 在 SOI 干扰模型中^[7], 每个接收通道中的干扰功率为接收机热噪声功率的 ρ_0 倍.

i_k 为 SOI 的和波束方向图, $G_{sdc}(R)$ 为距离 R 上的灵敏度时间控制 (STC: Sensitivity Time Control) 增益; S_{ave} 是按目标 RCS 平均值 σ_{ave} 计算的平均目标回波信噪比; 根据式 (9), 就可以计算出每个量测的 SLR. 上面的式 (10) ~ (13) 在 $J=0$ 的条件下就退化为无 SOI 干扰时的计算公式^[8].

4 移位寄存器后处理

信号似然比预处理减少了“取伪”误判的可能性, 但却使“弃真”误判的概率变大, 这是因为当外界有干扰时, 预处理过程会剔除低似然比量测, 这有可能一并把目标量测剔除掉.

从雷达资源管理的角度, 增加发射波形能量, 在没有 SOI 干扰时, 能够降低“弃真”误判的概率; 但是在有 SOI 干扰时, 高的检测门限 (为了抑制 SOI 干扰, 检测门限会变大) 会抵消高能量波形的效果, 对正确鉴别 RGPO 干扰改善不大.

根据 RGPO 干扰特点, 即每次干扰发射会持续一段时间, 这里提出一种移位寄存器后处理的方法来降低“弃真”误判的概率.

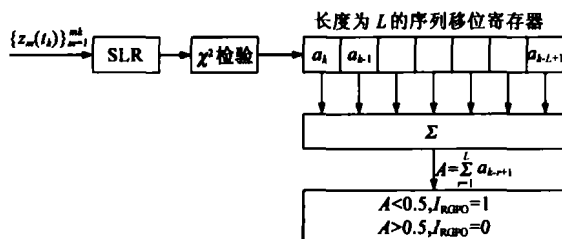


图 1 RGPO 干扰鉴别器方框图

图 1 给出了采用 SLR、 χ^2 检验和移位寄存器相结合的干扰鉴别器方框图, 其中鉴别器的输入为 t_k 时刻的确认量测集 $\{z_m(t_k)\}_{m=1}^M$, 输出为 RGPO 干扰鉴别结果, χ^2 检验模块采用第 2 节的假设检验方法. 移位寄存器的初始状态全设为 0, 移位寄存器记录每次的检验结果, 并联合前 $L-1$ 个结果来判断当前是否存在 RGPO 干扰.

设寄存器的当前状态为 a_k, \dots, a_{k-L+1} , 定义判决量

$$A = \sum_{r=1}^L a_{k-r+1} \quad (14)$$

判决规则为

$$\begin{cases} I_{RGPO} = 1, & A > 0.5 \\ I_{RGPO} = 0, & A < 0.5 \end{cases} \quad (15)$$

该鉴别器的主要特点是: 在低检测概率或强 SOI 干扰条件下, 只要有一次正确判决 RGPO 干扰存在, 则后续 L 次判决都认为存在 RGPO 干扰, 就减少了“弃真”误判; 然而, 如果有一次误判为存在 RGPO 干扰, 那么后续的 L 次判决也会认为有 RGPO 干扰, 这是一种不期望的特性, 而且 L 越大, “取伪”误判问题越严重. 因此, 寄存器长度不能太大也不能太小, 存在最佳寄存器长度, 使得发生两类误判的概率同时尽可能地小. 由于最佳寄存器长度与目标运动状态、RGPO 干扰的持续时间, 采样间隔和 SOI 干扰大小等因素有关, 很难在理论上得到解析解, 可根据实际情况作实验统计得到.

5 性能比较

本节对四种 RGPO 干扰鉴别算法作性能比较: (1) 仅采用 χ^2 检验算法, 简记为 Chi; (2) χ^2 检验算法和移位寄存器相结合, 简记为 Chi + register; (3) SLR 和 χ^2 检验算法相结合, 简记为 Chi + SLR; (4) SLR、 χ^2 检验和移位寄存器相结合, 简记为 Chi + SLR + register.

5.1 鉴别性能指标

设整个目标跟踪期间作 N 次采样, 其中有 RGPO 干扰时间段的采样次数为 N_1 , 对应的采样次数下标集记为 S_1 , 在无 RGPO 干扰时间段的采样次数为 N_2 , 对应的采样次数下标集记为 S_2 , 则 $N = N_1 + N_2$. 设 1 表示有 RGPO 干扰状态, 0 表示没有 RGPO 干扰状态, 记第 k 次真实的 RGPO 状态为 T_{RGPO}^k , 第 k 次判决的 RGPO 状态为 I_{RGPO}^k , 定义有 RGPO 干扰的鉴别率 P_{RGPO} 为

$$\begin{aligned} P_{RGPO} &= \frac{N_1 - \sum_{k \in S_1} (I_{RGPO}^k - 1)}{N_1} \\ &= 1 - \frac{1}{N_1} \sum_{k \in S_1} (I_{RGPO}^k - 1) \end{aligned} \quad (16)$$

定义无 RGPO 干扰的鉴别率 P_{RGPO}^{No} 为

$$P_{RGPO}^{No} = \frac{N_2 - \sum_{k \in S_2} I_{RGPO}^k}{N_2} = 1 - \frac{1}{N_2} \sum_{k \in S_2} I_{RGPO}^k \quad (17)$$

定义总鉴别率 P_{TOT} 为

$$P_{TOT} = \frac{N - \sum_{k=1}^N |I_{RGPO}^k - T_{RGPO}^k|}{N} = 1 - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |I_{RGPO}^k - T_{RGPO}^k| \quad (18)$$

一个好的 RGPO 干扰鉴别算法应使这三个鉴别性能指标越大越好.

5.2 实验方案

性能测试方案设计如下: 目标距雷达的初始距离

为 81km, 初始高度为 1.5km, 初始速度为 274m/s, 开始时目标的纵向加速度为 0.6g, 持续 20s 后作 5g 的转弯机动, 航向改变 45°, 在新航向上飞行 30s 后航路结束, 整个飞行过程持续 65s. 实施 RGPO 干扰的时间段为航路中间的 20~35s, 持续时间 15s, 采用匀速拖引方式, 拖引速度大小为. 目标 RCS 起伏模型服从 Swerling III 型分布, 其均值为 1.2m^2 . 采样间隔设置为 1s. 使用文献[6]给出的雷达模型, 恒虚警概率设为 $P_{fa}^{CFAR} = 2 \times 10^{-2}$, 按式(11)计算保持恒虚警的检测门限, 波形选择为最高能量波形 $W=8$, 然后按式(13)计算检测概率.

为了分析强干扰条件下的鉴别效果, 假定 SOI 干扰机航路与目标航路相同, 这样每次波束照射目标, SOI 干扰能量都从主波束进入雷达接收机. 为方便计算, 假

定每次波束照射时目标处于波束的视轴方向, 这样目标和 SOI 的归一化和波束方向图都为 1.

5.3 实验结果

图 2 是 1000 次 Monte Carlo 仿真的结果, 其中 χ^2 检验单侧拒绝域门限取为 $\chi_{0.005}^2(2) = 10.579$, SLR 门限为 $\gamma_{SLR}^{TH} = 1.0$, 左边三幅图的干扰因子设置为 $r_0 = 0$, 右边三幅图的干扰因子设置为 $r_0 = 8$, 每幅图的横坐标是移位寄存器的长度, 从上到下依次为 P_{RGPO} 、 P_{RGPO}^{No} 和 P_{TOT} 的统计平均结果.

对比算法 1、3 以及算法 2、4 的仿真结果, 可看出:

- (1) P_{RGPO} 曲线表明 SLR 会增加“弃真”误判;
- (2) P_{RGPO}^{No} 曲线表明 SLR 会减少“取伪”误判;
- (3) 从总鉴别率 P_{TOT} 曲线看, 引入 SLR 的算法 3、4 分别优于算法 1、2.

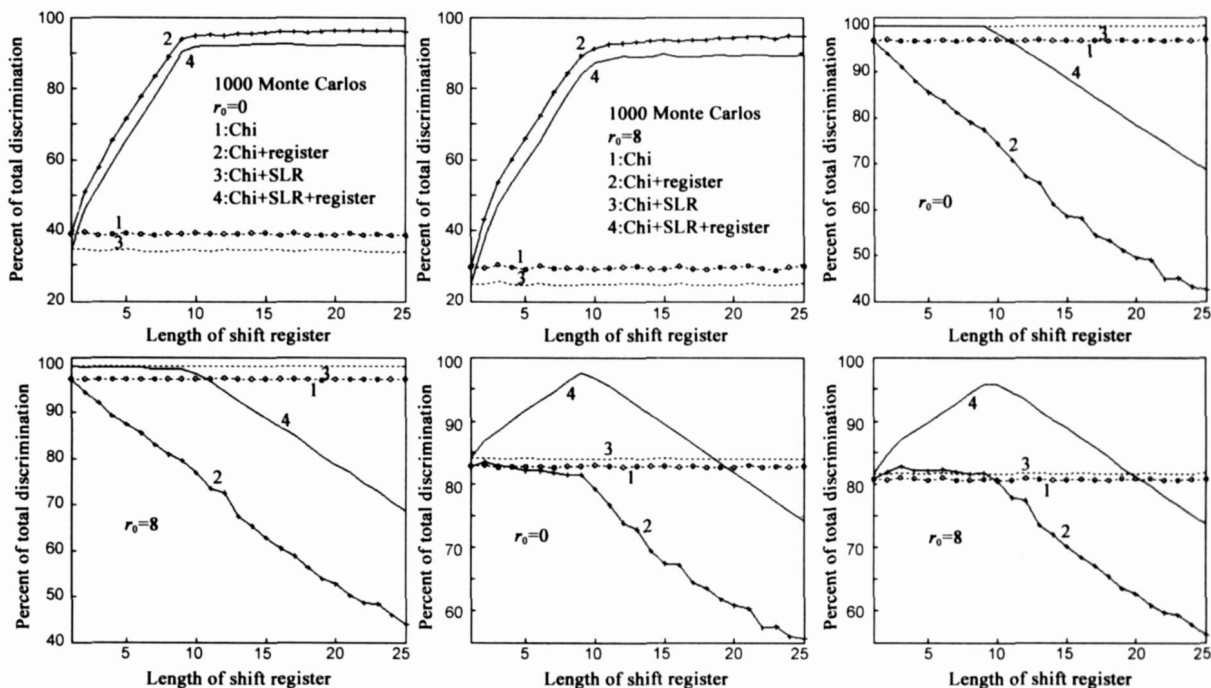


图 2 不同 RGPO 干扰鉴别算法的性能比较

对比算法 1、2 以及算法 3、4 的仿真结果, 可看出:

- (1) P_{RGPO} 曲线表明 register 会减少“弃真”误判;
- (2) P_{RGPO}^{No} 曲线表明 register 会增加“取伪”误判;
- (3) 从总鉴别率 P_{TOT} 曲线看, 引入 register 和 SLR 的算法 4 性能最好.

理论分析和仿真结果均表明, register 和 SLR 在两类误判上具有互补作用, 算法 4 的整体鉴别率最好, 最高 P_{TOT} 在最佳的寄存器长度达到, 在相当宽的寄存器长度范围内, 算法 4 的 P_{TOT} 都优于其它三个算法. 另外, 当有 SOI 干扰时, 各算法的三种鉴别率都会下降, 其中算法 4 的下降程度最小.

6 结论

准确鉴别 RGPO 干扰是正常跟踪目标的前提, 现有

χ^2 检验鉴别算法是显著性检验方法, 在鉴别 RGPO 干扰时, 易出现“取伪”误判问题. 本文提出采用信号似然比预处理和移位寄存器后处理相结合的鉴别算法, 称之为 Chi + SLR + register 算法, 此算法在最佳寄存器长度下, 能使发生“弃真”和“取伪”两类误判的概率同时尽可能地小; 在相当宽的寄存器长度范围内, 此算法的鉴别性能优于另外三种算法; 在有 SOI 干扰时, 此算法也能保持高的鉴别率, 因而是一种更有效的鉴别算法. 虽然本文主要研究 RGPO 干扰的鉴别问题, 但算法同样适用于鉴别 RGPI 干扰.

参考文献:

- [1] E J Chrzanowski. Active Radar Electronic Counter-measures.

- Norwood [M]. MA:Artech House,1990.
- [2] T Kirubarajan, Y Bar-Shalom, W D Blair, G A Watson. IMM-PDAF for radar management and tracking benchmark with ECM[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1998,34(4):1115 - 1134.
- [3] X R Li, B J Slocumb, P D West. Tracking in the presence of range deception ECM and clutter by decomposition and fusion [A]. Proc 1999 SPIE Conf Signal and Data Processing of Small Targets[C]. 3809-58, Denver, CO:Proc 1999 SPIE, July 1999, 3809:198 - 211.
- [4] B J Slocumb, P D West. ECM Modeling for Multitarget Tracking and Data Association. In Multitarget-Multisensor Tracking: Applications and Advances [M]. III, Y Bar-Shalom, W D Blair, editors. Norwood, MA:Artech House, 2000. 395 - 458.
- [5] S S Blackman, R J Dempster, M T Busch, R F Popoli. IMM/MHT solution to radar benchmark tracking problem[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(2):730 - 738.
- [6] W D Blair, G A Watson, G L Gentry, S A Hoffman. Benchmark problem for beam pointing control of phased array radar against maneuvering targets in the presence of false alarms and ECM[A]. Proc of 1995 American Control Conference [C]. Seattle, WA:Proc 1995, ACC, June 1995. 2601 - 2605.
- [7] W D Blair, G A Watson, T Kirubarajan, Y Bar-Shalom. Benchmark for radar allocation and tracking in ECM[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(4):1097 - 1113.
- [8] S S Blackman, R Popoli. Design and Analysis of Modern Tracking Systems[M]. Dedham, MA:Artech House, 1999.

作者简介:

周文辉 男,1975年8月生于陕西蒲城,长沙国防科技大学博士,在南京电子技术研究所作博士后.主要研究方向为数据融合、目标跟踪、传感器管理和电子对抗等.

E-mail:china.chou@gmail.com

李琳 女,1976年12月生于陕西三原,2004年毕业于国防科技大学电子科学与工程学院,获博士学位,主要从事卫星导航系统、雷达电子对抗以及扩频通信中的抗干扰技术研究.

陈国海 男,1965年11月生于江苏淮安,1990年毕业于南京理工大学,获硕士学位,研究员,曾获国家科技进步二等奖一项,国防科技进步奖多项,主要从事机载雷达总体和数据处理研究.