

基于联邦滤波的抗欺骗干扰目标跟踪

王金福, 周中良, 李飞

(空军工程大学航空航天工程学院, 西安, 710038)

摘要 基于联邦滤波思想将机载数据链、光电传感器和雷达的探测信息进行融合以解决跟踪过程中雷达易受欺骗干扰的问题。针对不同的欺骗干扰方式,对雷达受欺骗干扰时的量测特性进行了分析;提出了多传感器融合干扰检测算法;结合多模型交互、时间配准、信息等价转换、信息分配,提出了机载多传感器联邦滤波抗欺骗干扰融合算法的具体实现方法。仿真结果表明本算法能够检测并应对雷达的欺骗干扰,确保对真实目标的有效跟踪。

关键词 抗欺骗干扰;联邦滤波;目标跟踪;多传感器融合

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.04.019

中图分类号 V247.1⁺3 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)04-0079-05

A Study of Anti-deception-jamming for Target Tracking Based on Federal Filter

WANG Jinfu, ZHOU Zhongliang, LI Fei

Aeronautics and Astronautics College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Based on the federal filter idea, the kinds of information from airborne data-link, photoelectric sensor and radar are fused to solve the problem that radar is liable to suffer from deception jamming in the process of tracking. First of all, measurement feature of the radar is analyzed, which is disturbed by using the different deception jamming methods, and the detection method of airborne multi-sensor jamming is studied. Combining with interacting multiple models, time unification, information equivalence transformation, and information distribution, this paper utilizes the federated filter for building an airborne multi-sensor anti-deception-jamming information fusion algorithm. The result of the computer simulation shows that the deception-jamming to radar can be detected, and the true target of radar-tracking can be ensured effectively by adopting the algorithm.

Key words: anti-deception-jamming; federated filter; target tracking; multi-sensor fusion

机载雷达是战机获取信息的主要通道,在复杂电磁环境下所获取的信息受到敌方欺骗干扰时,目标的跟踪精度会急剧下降,因而战机的信息获取能力大大降低^[1-2]。

为了对抗不同类型的欺骗干扰,近年来国内外研究人员对雷达抗干扰方法进行了广泛而深入地研究。于孝松等提出了一种局域FFT的有源欺骗干扰压制方法,其基本方法是对雷达回波脉压频谱矩

阵按行IFFT,从而得到目标回波脉压信号矩阵,用以压制有源欺骗干扰^[3];王晓东等提出了一种调频连续波体制的随机初相与限幅过程相结合的成像雷达抗干扰方法^[4];Soumekh M提出利用脉冲随机相位波形调制技术来对抗欺骗干扰,并提出一种称为“惩罚函数”的方法实现对欺骗干扰的抑制^[5]。虽然随着军事技术的发展,雷达抗干扰能力已经得到了很大提高,提出了直接重构法和投影法、绝对功率

收稿日期:2014-09-20

基金项目:陕西省科技新星基金资助项目(2013KJXX-82)

作者简介:王金福(1990-),男,吉林长白人,硕士生,主要从事武器系统总体技术与作战应用研究.E-mail:654937641@qq.com

引用格式:王金福,周中良,李飞.基于联邦滤波的抗欺骗干扰目标跟踪[J].空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(4):79-83. WANG Jinfu, ZHOU Zhongliang, LI Fei. A Study of Anti-deception-jamming for Target Tracking Based on Federal Filter[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(4): 79-83.

检测、信号功率变化率监测等一系列抗欺骗干扰方法;但由于欺骗干扰手段的也不断增多,且其具有很强的隐蔽性,雷达抗欺骗干扰的难度依然很大,特别是在对运动目标进行跟踪时,由于目标的动态信息实时变化,致使抗干扰难度加大^[6]。

本文基于联邦滤波思想,设计了雷达受欺骗干扰检测算法,并通过对数据链、光电传感器和雷达探测的融合实现对雷达欺骗干扰的对抗。

1 雷达受欺骗干扰时的量测特性分析

对跟踪雷达欺骗干扰可分为:距离门拖引干扰、速度门拖引干扰和角度欺骗干扰^[7]。

从雷达受拖引欺骗干扰的方式、样式可以简单总结为:当雷达受到相应干扰时,雷达对目标会出现假的量测。这时候的量测是逐渐偏离目标真实的量测。雷达如果此时把该量测作为对目标的跟踪数据进行处理,随着时间的推移,跟踪误差逐渐扩大,直至当目标停止拖引时,雷达将会丢失对目标的跟踪。对于这种干扰,靠雷达自身对于量测的检测是不能够判断出量测为假目标量测的。

雷达受到欺骗干扰时,其距离和角度信息都会受到欺骗。在光电传感器的真实角度量测下,可以在一定情况下对雷达的角度信息给予判定和修正。理论上,通过对比光电传感器和雷达的角度的量测可以在一定情况下判决出雷达的角度欺骗干扰。而在某些情况下,也不能判别雷达欺骗干扰。如在图1(a)中,真实量测和欺骗量测基本等同,此时不能够通过角度量测进行雷达欺骗干扰的判定。对于图1(b)中的情形,可以通过光电传感器的量测进行欺骗干扰判定。但是,这种情况也仅限于对于雷达角度信息的欺骗性判定。

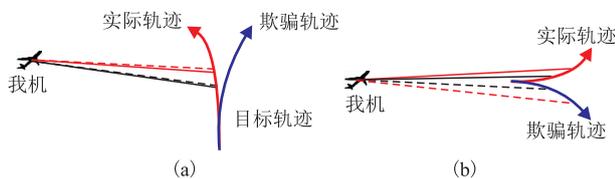


图1 光电传感器通过角度量测判别雷达欺骗干扰
Fig.1 The identification of deception jamming by the angle measuring from photoelectric sensor

因此,在没有数据链信息下,机载光电传感器虽然对于角度信息有一定判别能力,但是对于目标的距离信息还是不能够量测或计算。所以只用雷达和光电传感器进行融合跟踪方法对雷达欺骗干扰是无能为力的。

2 机载多传感器雷达干扰检测算法

本文要分析雷达、数据链、光电传感器三传感器的融合抗干扰,并且三者之间的量测互不相关,可以等价简单的联邦滤波形式。

设计联邦滤波结构见图2^[8-9]。并且从文献[8]中,可知通过信息分配可以使整个滤波估计达到最优估计,且不会影响滤波精度。

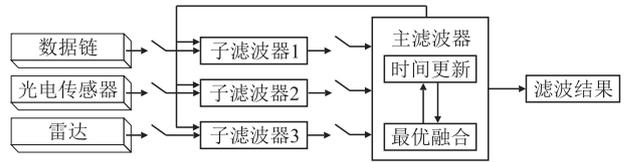


图2 机载多传感器联邦滤波结构设计

Fig.2 Configuration of airborne multi-sensor based on federal filter

故障检测与隔离(FDI)是一项专门的技术。机载多传感器系统中,只有通过 FDI 技术检测出雷达受欺骗干扰,才能通过联邦滤波隔离雷达所量测的假目标信息并使用其它传感器进行目标跟踪。目标跟踪过程中,雷达受欺骗时的相关量测及轨迹见图3。

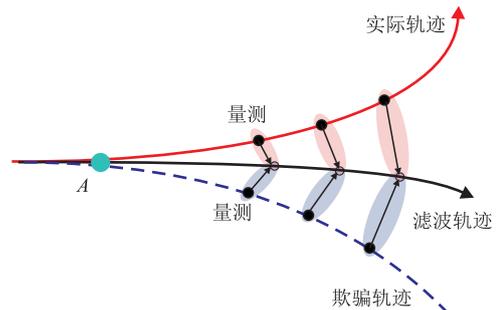


图3 机载雷达受欺骗时目标轨迹示意图

Fig.3 Target track of jammed radar

图3中,A点为目标开始实施欺骗干扰时刻。A点之后,目标所做机动和所释放欺骗干扰信号逐渐拉开。中间的滤波轨迹也逐渐偏离实际轨迹。滤波过程中,定义残差为进一步预测引起对量测估计误差(量测和滤波估计的误差)。

$$\tilde{Z}(k, k-1) = Z(k) - H(k)X(k/k-1) \quad (1)$$

从图3椭圆可以看出,随着欺骗干扰的进行,联邦滤波算法中的各子滤波器的残差逐渐增大。因此故障检测方法可以通过检测3个传感器的残差进行。具体为设置一个残差门限,这个门限值等于了3个传感器正常跟踪时的最大残差之和。依据正态分布 3σ 准则,只需求出3个传感器的残差门限就可进行检验。故对于机载数据链、光电传感器和雷达,易得其残差门限和为:

$$Z_\lambda = Z_1 + Z_2 + Z_3 = 3(\sigma_{1x}^2 + \sigma_{1y}^2 + \sigma_{1z}^2 + \sigma_{2x}^2 + \sigma_{2y}^2 + \sigma_{2z}^2 + \sigma_{3x}^2 + \sigma_{3y}^2 + \sigma_{3z}^2) \quad (2)$$

式中: $\sigma_{1x}^2, \sigma_{1y}^2, \sigma_{1z}^2, \sigma_{2x}^2, \sigma_{2y}^2, \sigma_{2z}^2, \sigma_{3x}^2, \sigma_{3y}^2, \sigma_{3z}^2$ 分别为数据链、光电传感器和雷达在 x, y, z 方向上的量测方差。光电传感器距离信息由上一时刻主滤波器滤波结果外推得到。并设一次滤波量测的残差之和为 \tilde{Z}_s , 则故障判定准则为:

$$\begin{cases} \text{若 } \tilde{Z}_s > Z_\lambda, \text{ 判定为有欺骗} \\ \text{若 } \tilde{Z}_s \leq Z_\lambda, \text{ 判定为无欺骗} \end{cases} \quad (3)$$

若故障检测为有欺骗, 则可隔离雷达量测数据, 用光电传感器和数据链进行目标跟踪。

3 机载多传感器联邦滤波融合算法

3.1 多传感器的时间配准

多传感器的量测数据更新周期不一致, 为了应用联邦滤波融合算法, 需要将多传感器的量测进行时间配准。

本文采用滤波外推算法^[10], 将数据链更新数据时间配准到光电传感器的采样时间上。目标机动模型采用交互式多模型, 包括 1 个 CV 模型和 2 个 CA 模型, 所以具体做法为: 先将数据链数据进行交互式当前统计模型滤波, 然后外推至光电传感器数据更新时刻。数据链需外推的时间由数据链信息更新时刻和光电传感器数据更新时刻确定。

图 4 中, 设数据链需外推时间, 即滤波估计点时刻到外推预测点时刻的时间差为 $\Delta T(k)$; 并设光电传感器数据更新至第 k 个周期时刻 kT_p 。此时, 设最近一次数据链数据更新时刻为 $k_n T_{DL}$ 。则有:

$$k_n = [(kT_p) / T_{DL}]_{\text{int}} \quad (4)$$

$$\Delta T(k) = \text{mod}((kT_p) / T_{DL}) \quad (5)$$

式中: $[\]_{\text{int}}$ 为取整运算; $\text{mod}(x, y)$ 为 x 对 y 求余数运算。

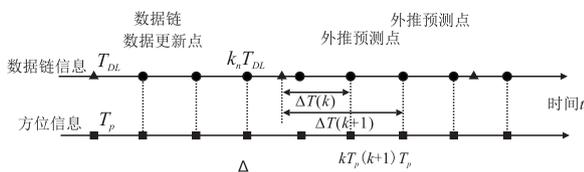


图 4 滤波外推示意图

Fig.4 The schematic plot of the extrapolation

通过交互式当前统计模型系统的状态方程:

$$\dot{\mathbf{X}}_i(k) = \mathbf{F}_{CSF,i}(k) \mathbf{X}_i(k_n) + \mathbf{G}_i(k) \mathbf{a}_i(k_n) \quad (6)$$

即可进行由 $k_n T_{DL}$ 时刻到 $k T_p$ 时刻的外推。

$\mathbf{F}_{CSM}(k)$ 为目标状态转移矩阵, $\mathbf{G}(k)$ 为输入控制矩阵。并且:

$$\mathbf{F}_{CSM,i}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{F} & & \\ & \mathbf{F} & \\ & & \mathbf{F} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T(k) & \frac{\alpha \Delta T(k) - 1 + e^{-\alpha \Delta T(k)}}{\alpha^2} \\ 0 & 1 & \frac{1 - e^{-\alpha \Delta T(k)}}{\alpha} \\ 0 & 0 & e^{-\alpha \Delta T(k)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{G}_i(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{G} & 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} \\ 0_{3 \times 1} & \mathbf{G} & 0_{3 \times 1} \\ 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} & \mathbf{G} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha} \left(-\Delta T(k) + \frac{\alpha \Delta T(k)^2}{2} + \frac{1 - e^{-\alpha \Delta T(k)}}{\alpha} \right) \\ \Delta T(k) - \frac{1 - e^{-\alpha \Delta T(k)}}{\alpha} \\ 1 - e^{-\alpha \Delta T(k)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: α 为机动频率; $\mathbf{X}_{oi}(k_n), \mathbf{a}_i(k_n)$ 为模型 i 在 $k_n T_{DL}$ 时刻的运动状态和机动加速度均值。

有了第 i 个模型的外推预测状态, 通过输出交互即可得到数据链信息的外推预测状态:

$$\hat{\mathbf{X}}(k) = \sum_{i=1}^N \hat{\mathbf{X}}_i(k) \mu_i(k_d), i = 1, 2, 3 \quad (9)$$

3.3 光电传感器等价量测转换

由于光电传感器量测的是目标的角度信息, 量测缺少距离信息, 不能构成完整的目标观测方程。所以在其滤波中要进行相关处理。本文的处理方法为: 将上一时刻的主滤波器滤波结果通过外推至这一时刻来对目标距离进行估计。

设上一时刻主滤波器的估计状态为:

$$\mathbf{X}(k) = [x(k), v_x(k), y(k), v_y(k), z(k), v_z(k), a_x(k), a_y(k), a_z(k)] \quad (10)$$

设更新周期为 t 。那么, 此刻的目标距离为:

$$r(k+1) = \sqrt{\sum_{\Omega} (\Omega(k) + v_{\Omega}(k)t + a_{\Omega}(k)t^2)^2}, \quad \Omega = x, y, z \quad (11)$$

有了目标距离的估计 $r(k+1)$, 结合光电传感器量测的目标方位角和俯仰角 $\theta(k+1), \varphi(k+1)$, 可以将由角度和距离信息的量测转化为直角坐标系下的量测。

3.4 联邦滤波具体算法

设数据链、光电传感器、雷达的状态方程和量测方程分别为:

$$\dot{\mathbf{X}}^i(k) = \Phi^i(k) \mathbf{X}^i(k-1) + \mathbf{W}^i(k) \quad (12)$$

$$\mathbf{Z}^i(k) = \mathbf{H}^i(k) \mathbf{X}^i(k) + \mathbf{V}^i(k), i = 1, 2, 3 \quad (13)$$

式中: $\mathbf{W}^i(k) \sim N(0, \mathbf{Q}^i(k)), \mathbf{V}^i(k) \sim N(0, \mathbf{R}^i(k))$, $\mathbf{Q}^i(k), \mathbf{R}^i(k)$ 分别为系统噪声和测量噪声的方差。故

联邦滤波算法可由下列方程描述:

1)信息分配和重置

$$\begin{cases} (P^i(k))^{-1} = \beta_i (P^g(k))^{-1} \\ (Q^i(k))^{-1} = \beta_i (Q^g(k))^{-1} \\ \hat{X}^i(k) = \hat{X}^g(k) \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} P^i(k|k-1) = \Phi^i(k) P^i(k-1|k-1) \Phi^{iT}(k) + Q^i(k-1) \\ X^i(k|k-1) = \Phi^i(k) X^i(k-1|k-1) \end{cases} \quad (15)$$

b.量测更新

$$\begin{cases} (P^i(k))^{-1} = (P^i(k|k-1))^{-1} + H^{iT}(R^i(k))^{-1}H^i \\ \hat{X}^i(k) = P^i(k) [(P^i(k|k-1))^{-1} X^i(k|k-1) + H^{iT}(R^i(k))^{-1} Z^i(k)] \end{cases} \quad (16)$$

3)主滤波器时间更新

$$\begin{cases} X^m(k|k-1) = \Phi(k) X^m(k-1) \\ P^m(k|k-1) = \Phi(k) P^m(k-1) \Phi^T(k) + Q^m(k-1) \end{cases} \quad (17)$$

4)信息全局融合

$$\begin{cases} (P^g(k))^{-1} = \sum_{i=1}^3 (P^i(k))^{-1} + (P^m(k))^{-1} \\ (P^g(k))^{-1} \hat{X}^g(k) = \sum_{i=1}^3 (P^i(k))^{-1} \hat{X}^i(k) + (P^m(k))^{-1} \hat{X}^m(k) \end{cases} \quad (18)$$

式中: β_i 为信息分配系数,且满足 $\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_m = 1$,上标 m 和 g 分别为主滤波器和全局融合结果。

4 仿真分析

4.1 仿真条件

1)目标运动形式。假设目标起始位置为(120 000,1 000,5 000),目标初始速度 300 m/s,速度方向水平指向 x 轴负方向,目标运动方式见表 1。并假设我载机起始位置为(0,0,6 000),以 300 m/s 的速度匀速直线运动时,速度方向指向 x 轴正方向。

表 1 目标真实运动方式

Tab.1 Target tracks

时间/s	运动方式
0~40	匀速直线运动
40~90	匀速右转弯,转弯半径为 3 000 m
90~110	匀速直线运动
110~160	匀速左转弯,转弯半径为 3 000 m
160~200	匀速直线运动

2)雷达量测参数。假定以下初始条件:①雷达测角误差为 0.002 rad,距离误差为 100 m,距离变化率误差为 10 m/s;②雷达量测数据更新周期为 0.5 s。

4.2 雷达受干扰条件设定

设定雷达在跟踪过程中会受到相关干扰,干扰形式及时间见图 7。

图 7 中,在 50~90 s 时间段内的欺骗干扰的干扰周期为 10 s,其中拖引时间为 8 s,停拖时间为 2

2)子滤波器进行时间更新和量测更新

a.时间更新

s,共进行 4 个周期的拖引欺骗干扰。在 120~140 s 时间段内有一个持续 20 s 的雷达拖引欺骗干扰。

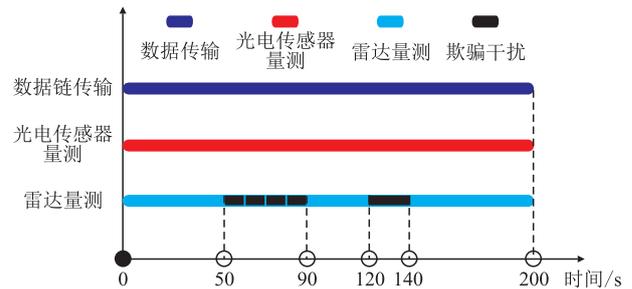


图 5 雷达受欺骗干扰时机

Fig.5 Opportunity of jamming radar

4.3 仿真结果及分析

基于上述条件下的目标跟踪仿真结果见图 6~图 9。图 6 中红圆点代表雷达受欺骗时的量测。图 7 是图 6 中 50~90 s 时间段内的欺骗干扰跟踪轨迹,是图 6 的一个阶段的细节图。图 8 是雷达受欺骗干扰跟踪误差是各坐标轴方向的误差,图 9 是总误差。

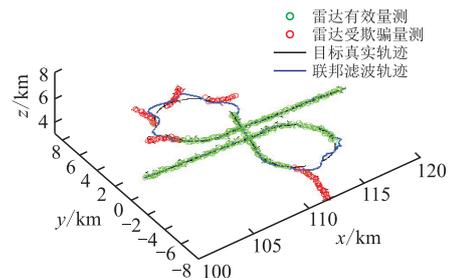


图 6 雷达受欺骗干扰跟踪轨迹

Fig.6 Target tracking of jammed radar

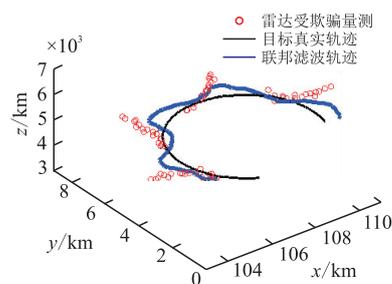


图 7 雷达受欺骗干扰跟踪轨迹

Fig.7 Target tracking of jammed radar

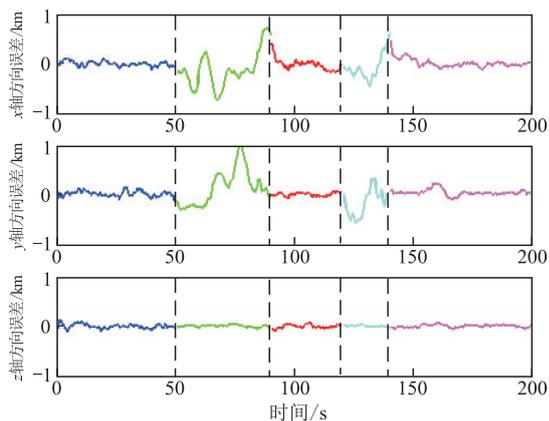


图 8 雷达受欺骗干扰跟踪误差

Fig.8 The error of target tracking

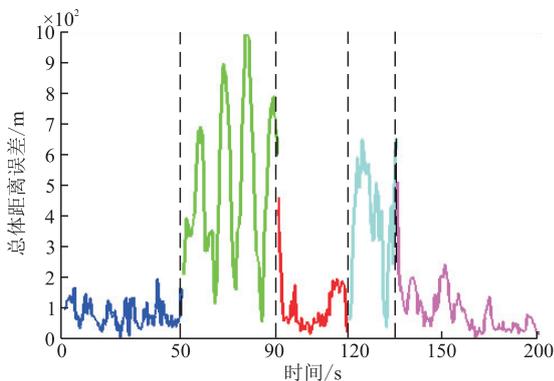


图 9 雷达受欺骗干扰总体跟踪误差

Fig.9 The overall error of target tracking

从该仿真中可以得出以下结论:①数据链信息支持下的雷达和光电传感器融合跟踪可以增强雷达受欺骗干扰时的跟踪能力。这可以从时间 50~90 s、120~140 s 2 个受压制干扰阶段的跟踪误差可以看出:其总误差小于 1 000 m,能够有效地对目标进行跟踪。②联邦滤波结构形式的机载多传感器系统能够有效识别出对雷达的欺骗干扰,进而对雷达受欺骗干扰时的量测信息进行隔离,使用数据链和光电传感器获得的正确量测信息进行目标跟踪。

5 结语

针对雷达目标跟踪过程中容易受到欺骗式干扰

并且不易被发现这一特点,提出了应用联邦滤波思想来对抗目标跟踪过程中的欺骗干扰的方法。采用联邦滤波方式将雷达、机载数据链和光电传感器的探测信息进行融合,以实现欺骗干扰的检测和对抗。仿真结果表明本文的算法能够有效检测出雷达是否受到欺骗干扰,并且对实现复杂电磁条件下的目标跟踪有良好的效果。

参考文献(References):

- [1] 郝琳,张永顺,李哲. 机载 MIMO 雷达 3-CAP 杂波抑制方法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(4):51-55.
HAO Lin, ZHANG Yongshun, LI Zhe. 3-CAP Clutter Suppression Method Research for Airborne Radar[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2014, 15(4): 51-55. (in Chinese)
- [2] Song T L. Observability of Target Tracking with Range-Only Measurements [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1999, 24(3): 383-387.
- [3] 张勇强,于孝松. 基于 FFT 的有源欺骗干扰抑制[J]. 雷达科学与技术, 2013, 11(6): 663-667.
ZHANG Yongqiang, YU Xiaosong. Suppression of Active Deception Jamming Based on FFT[J]. Radar Science and Technology, 2013, 11(6): 663-667. (in Chinese)
- [4] 王晓东,马泉成. 基于 FMCW 合成孔径雷达抗欺骗干扰方法研究[J]. 计算机仿真, 2013, 30(7): 5-10.
WANG Xiaodong, MA Quancheng. Anti-Deception Jamming Method for Frequency Modulated Continuous Wave Synthetic Aperture Radar [J]. Computer Simulation, 2013, 30(7): 5-10. (in Chinese)
- [5] Soumekh M. SAR-ECCM Using Phase-perturbed LFM Chirpsignals and DRFM Repeat Jammer Penalization [J] . IEEE Trans on AES, 2006, 42(1) : 191-205.
- [6] Dumper K, Cooper P S, Wons A F, et al. Spaceborne Synthetic Aperture Radar and Noise Jamming [C] // Radar 97, Edinburgh, 1997: 411-414.
- [7] 冯德军,徐尔涛,王雪松. 间歇采样转发假目标的相位特性及其在角度欺骗干扰中的应用[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(3): 135-140.
FENG Dejun, XU Letao, WANG Xuesong. Phase Signature of Active Decoy and Its Application in Angular Deception Jamming Using Interrupted-Sampling Repeater [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014, 36(3): 135-140. (in Chinese)
- [8] 韩崇昭,朱洪艳,段战胜. 多源信息融合[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.
HAN Chongzhao, ZHU Hongyan, DUAN Zhansheng. Multi-source Information Fusion [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese)
- [9] 秦永元,张洪钺,汪叔华,等. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安:西北工业大学出版社, 1998.
QIN Yongyuan, ZHANG Hongyue, WANG Shuhua, et al. Kalman Filter and Integrated Navigation Principle [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1998. (in Chinese)
- [10] Ali T Alouani, John E Gray. Simplified Generalized Asynchronous Track Fusion Filter [C] // Proc of SPIE, 2006, 1-12.
- [11] Stephen J. DeLory. Design and Analysis of A Navigation System Using the Federated Filter [D]. Dayton, Ohio: Air Force Institute of Technology, 1996.

(编辑:徐楠楠)