

## 一种主/被动雷达协同探测跟踪模式及算法研究

周峰, 张亮亮, 王建军, 章钊

(空军工程大学防空反导学院, 西安 710051)

**摘要:** 为了提升地空导弹武器系统体系抗干扰及隐蔽性作战能力, 结合新装备主动雷达和基于时差法测量的被动雷达系统各自技术优势, 提出了一种主动雷达辅助的被动雷达协同探测跟踪模式, 并针对该模式研究设计了一种协同探测跟踪算法。通过引入模糊推理函数, 利用新息方差实际值和量测误差协方差变化率值作为模糊输入控制量, 实时控制主动雷达的开关机工作, 不仅实现了对主动雷达的精确化和实时化控制, 而且提高了系统跟踪精度。通过 Monte Carlo 仿真, 进一步验证了协同模式的合理性以及改进算法的有效性和正确性。

**关键词:** 时差定位; 协同探测跟踪; 交互式多模型算法

**中图分类号:** V271.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2014)02-0012-05

## The Model and Algorithm for Active/Passive Radar Synergistic Detection and Tracking

ZHOU Feng, ZHANG Liang-liang, WANG Jian-jun, ZHANG Zhao

(Institute of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** To improve the anti-interference and stealth capability of surface-to-air missile system, a synergistic operating mode, i. e., the passive radar tracking system with assistance of active radar, was proposed based on the advantages of both the active and passive radars. A new cooperated detecting and tracking algorithm was designed based on the mode. The operation of the active radar was controlled in real time by introducing the fuzzy reasoning function and using the new practical variance and the change rate of measure error variance as input control variables. This method could not only control the active radar precisely and in real time, but also improve the system tracking precision. Monte Carlo simulation demonstrates the rationality of the synergistic operation model and the availability and correctness of the improved algorithm.

**Key words:** TDOA location; synergistic detection and tracking; interactive multi-model (IMM) algorithm

### 0 引言

当前, 随着现代军事技术的快速发展, 地空导弹武器系统面临着来自日益复杂的战场环境、先进的电子对抗技术、反辐射技术、隐身技术以及目标强机动性等多种威胁与挑战。为了解决此问题, 多传感器融合技术<sup>[1-3]</sup>得到了广泛的应用与发展, 特别是异类传感器融合<sup>[4-5]</sup>系统因其良好的优势互补性, 越来越受到重视, 并被广泛应用于机载传感器系统, 但此技术在地空导弹武器系统中应用较少, 且主要是基于红外和雷达之间的数据融合处理, 如文献[6-7]针对主动雷达和红外跟踪系统, 研究了一些关联、滤波和估计算法; 文

献[8]提出了一种雷达间歇辅助红外式的融合系统, 利用雷达开机工作时所获得的目标状态信息, 在雷达关机后, 利用曲线拟合的方法拟合出目标的运动轨迹, 以解决红外距离不可观测性的问题; 文献[9]研究了红外和雷达协同工作的3种模式; 文献[10]针对主动雷达和基于时差法定位的被动雷达系统, 提出了一种交互式多模型的顺序跟踪融合算法。而随着被动雷达定位技术的发展与成熟, 以及其对隐身目标良好的探测效果, 被动雷达受到世界各国的青睐, 并研制出了实际系统, 如俄罗斯的“MC5-90系统”, 乌克兰的“卡拉秋塔”系统, 捷克的“塔玛拉”系统, 以色列的“EL/L-8388”对空早期预警系统等, 此类系统大多数采用基于时差法测量的无源定位技术, 对于隐身目标具有良好的探测效果。但与主动雷达相比, 其工作方式导致系统只能被动接收目标的辐射、反射和散射信号, 工作主

动性较差,且雷达对杂波干扰信号较敏感,数据处理量大,针对隐身目标 RCS 的快速起伏性,其跟踪效果并不是很好。为此,本文针对新型装备,提出利用主动雷达和基于时差法定位的被动雷达系统进行协同探测跟踪,以充分发挥二者的互补优势,达到对隐身目标更好的探测与跟踪,并针对该模式,研究设计了相匹配的协同跟踪算法,采用隐身目标常见的蛇形机动模式进行仿真验证,结果验证了模型及算法的有效性。

### 1 协同模式设计

本文设计基于主/被动雷达能同时实现对目标的正常探测。在实际作战中,由于反辐射攻击武器的出现,主动雷达在整个工作周期内始终开会面临很大的风险性,为此,文中采用主动雷达辅助的被动雷达跟踪模式。即在整个工作周期内,被动雷达始终处于开机状态,主动雷达根据管理策略实时开关机,并对被动雷达跟踪误差进行修正。本文被动雷达采用基于时差法的四站无源定位系统,主动雷达采用常见的相控阵雷达。协同模式如图1所示。

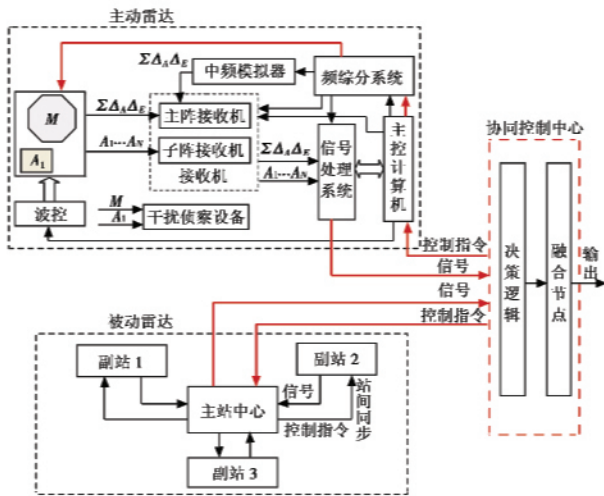


图1 主/被动雷达协同模式结构图

Fig.1 The synergistic mode structure for active and passive radars

$$\Delta P'(k) = \begin{cases} \frac{|\|P(k|k)\| - \|P(k-1|k-1)\||}{|G_{DOP}^2(k) - G_{DOP}^2(k-1)|}, & |\|P(k|k)\| - \|P(k-1|k-1)\|| < |G_{DOP}^2(k) - G_{DOP}^2(k-1)| \\ 1, & |\|P(k|k)\| - \|P(k-1|k-1)\|| \geq |G_{DOP}^2(k) - G_{DOP}^2(k-1)| \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $G_{DOP}$  为基于 TDOA 技术被动雷达的定位精度,具体求解可见参考文献[12]。

#### 2) 输入数据模糊化。

定义  $C'_i(k)$  模糊集为 LP(正大)、SP(正小)、ZE(零),隶属度函数采用三角函数,见图2。 $\Delta P'(k)$  的模糊集为 LP(正大)、MP(正中)、SP(正小),ZE(零),隶属度函数采用梯形函数,见图3。

在图1中,被动雷达系统中的主站中心包括主接收站和指控车,协同控制中心分系统主要包括决策逻辑模块和融合节点模块。在整个系统设计中,协同控制中心分系统可装备在主/被动雷达站的指控车上,也可以作为一个独立的战术指挥作战单元装备于上级指挥作战中心,选择何种方式取决于指挥权限的设置。决策逻辑模块作为协同控制中心分系统的核心模块,根据某种策略来实现对主动雷达的开关机控制,针对主/被动雷达协同探测跟踪系统,航迹质量的好坏是评价其性能优劣的核心指标,因此,它也成为管理策略研究的核心问题。目前,航迹质量评价准则常见方法有跟踪波门法、残差分析法、模型概率判别法和基于信息熵理论判别法等。以上方法能够实现对主动雷达的开关机控制,但也存在控制精度不高、适应环境能力较差的不足。为此,本文引入模糊综合函数理论<sup>[11]</sup>,提出采用模糊逻辑控制来实现对主动雷达辐射时机的有效控制。具体设计见下文。

### 2 协同算法设计

本文利用模糊逻辑推理系统来实现对主动雷达的开关机控制,而模糊推理系统由4大模块组成,为此,首先设计模糊推理器。

#### 2.1 模糊推理系统

##### 1) 模糊输入量及归一化处理。

文中设计模糊推理系统的输入控制量包括两个:①新息方差实际值;②状态变量协方差误差变化率。分别记为

$$C_r(k) = \|V(k)V^T(k)\| \quad (1)$$

$$\Delta P(k) = |\|P(k|k)\| - \|P(k-1|k-1)\|| \quad (2)$$

式中: $V(k)$  为新息残差值; $P(k|k)$  为误差协方差矩阵; $\|\cdot\|$  表示矩阵的熵,通常取其迹。

对式(1)和式(2)做归一化处理

$$C'_i(k) = \begin{cases} \frac{C_r(k)}{\|R(k)\|}, & C_r(k) < \|R(k)\| \\ 1, & C_r(k) \geq \|R(k)\| \end{cases} \quad (3)$$

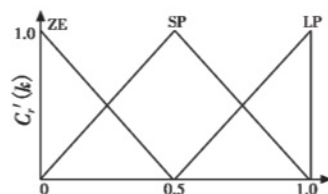


图2  $C'_i(k)$ 的隶属度函数

Fig.2 The membership function of  $C'_i(k)$



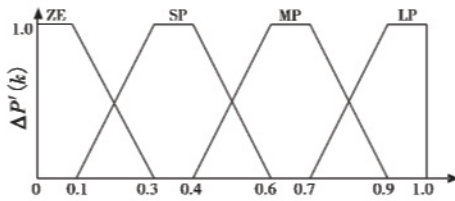


图3  $\Delta P'(k)$  的隶属度函数

Fig. 3 The membership function of  $\Delta P'(k)$

3) 输出数据反模糊化。

输出数据为雷达辐射控制值  $u(k)$ , 将其值定义为 Open(开), Close(关), 此时不需要进行反模糊处理。

4) 模糊规则。

模糊规则可由专家经验得出, 本文基于系统精度不同要求, 给出了两组模糊规则(1、2), 模糊规则 1 中  $C_r'(k)$  是基于图 2 隶属度函数进行模糊化处理, 而模糊规则 2 中的  $C_r'(k)$  是采用图 3 隶属度函数进行模糊化处理的, 分别见表 1 和表 2。

表 1 模糊推理规则 1

Table 1 The fuzzy reasoning rule 1

$C_r'(k)$	$\Delta P'(k)$			
	ZE	SP	MP	LP
ZE	Close	Close	Close	Close
SP	Close	Close	Close	Open
LP	Close	Close	Open	Open

表 2 模糊推理规则 2

Table 2 The fuzzy reasoning rule 2

$C_r'(k)$	$\Delta P'(k)$			
	ZE	SP	MP	LP
ZE	Close	Close	Close	Open
SP	Close	Close	Close	Open
MP	Close	Close	Open	Open
LP	Close	Open	Open	Open

2.2 基于模糊推理控制的主动雷达辅助的被动雷达跟踪算法

文中主/被动雷达跟踪系统均采用 IMM-UKF 算法<sup>[13]</sup>, 决策逻辑模块选取上文的模糊推理系统, 融合系统选取协方差加权航迹融合算法<sup>[14]</sup>。主动雷达辅助的被动雷达协同探测跟踪算法结构如图 4 所示。

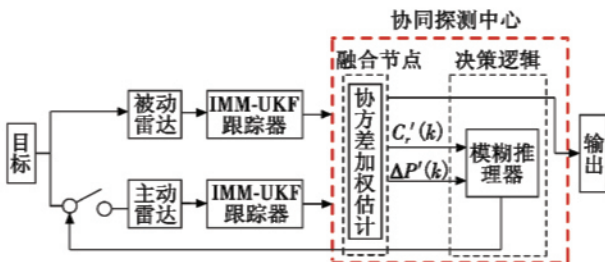


图 4 基于模糊推理控制的主动雷达辅助的被动雷达跟踪融合算法流程图

Fig. 4 The tracking and fusion algorithm of passive tracking systems with active assistance

在图 4 中, 决策逻辑模块的主要功能由模糊推理器实现, 模糊推理器根据模糊推理实时控制主动雷达辐射时机。在一个工作周期内, 协同探测跟踪算法的实现流程如下所述。设当前时刻为  $k$ , 在上一时刻  $(k-1)$ , 主动雷达处于关机状态。

1) 模糊推理系统利用  $(k-1)$  时刻的输入量  $C_r'(k-1)$  和  $\Delta P'(k-1)$  进行模糊推理, 判断下一时刻  $(k)$  时刻主动雷达是否需要开机工作, 并将控制指令送往主动雷达主控计算机。

2) 若  $k$  时刻主动雷达开机工作, 则利用  $(k-1)$  时刻融合估计值初始化主动雷达的 IMM-UKF 滤波器。此后, 主/被动雷达与各自的 IMM-UKF 滤波器并行工作, 得到各自的目标状态估计值(即航迹 1、2), 并送往融合节点模块; 若  $k$  时刻主动雷达不工作, 则被动雷达单独工作, 并最终返回执行步骤 1)。

3) 若主动雷达开机工作, 则航迹 1、2 经过时空配准后送往融合节点, 采用协方差加权融合算法进行航迹融合处理, 并将状态估计结果输出。同时, 向决策逻辑模块输入控制量  $C_r'(k)$  和  $\Delta P'(k)$ , 否则, 直接输出航迹 1 数据。

4) 返回步骤 1) 执行。

3 仿真分析

在协同模式下, 针对主动雷达辅助的被动雷达跟踪方式, 文中设计提出了基于模糊推理控制的 IMM-UKF。此算法通过模糊推理实时控制主动雷达开关机, 而被动雷达在整个工作周期内始终处于工作状态, 主动雷达只是辅助性地工作。为此, 采用隐身战机常见蛇形机动模式进行仿真。

实验数据: 假设目标初始位置为  $(20, 200, 15)$ , 单位为 km, 以初始速度  $(50, 50, 50)$ , 单位为 m/s, 沿着 Z 轴在 XOY 平面上作蛇形机动, 在  $1 \sim 100$  s 内, 以角速度  $\omega_1 = 0.0349$  rad/s 作左转弯机动, 当转过的角度大于  $180^\circ$  后, 在  $101 \sim 200$  s 内, 以角速度  $\omega_2 = -0.0349$  rad/s 做右转弯机动, 真实轨迹如图 5 所示。

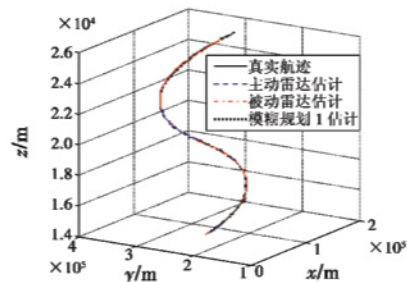


图 5 估计曲线

Fig. 5 The estimation curve

采用 CV 和 CA 模型, 参数分别设置为  $q_{CV} = 200$  m、

$q_{CA} = 100 \text{ m}$ 。主动雷达距离、高低角和方位角误差标准差分别为  $100 \text{ m}$ 、 $1 \text{ mrad}$ 、 $1 \text{ mrad}$ 。被动雷达采用平行四边形布站方式,站址值见表 3,站间基线长度  $30 \text{ km}$ ,定时误差  $\delta_{\Delta t_i} = 3 \text{ m}$ ,相关系数  $\eta_{ij} = 0.5$ 。初始模型概率  $u = (0.9, 0.1)$ ,马尔科夫转移矩阵  $P = [0.8, 0.2; 0.2, 0.8]$ 。基于模糊推理的 IMM-UKF 算法流程见图 4,采用 Matlab 6.0 编写仿真程序,蒙特卡罗方法仿真 100 次,分别针对模糊规则 1 和模糊规则 2 进行仿真分析。

表 3 平行四边形布站站址  
Table 3 The station of the parallelogram

基线长度 /km	主站 $R_0$	副站 $R_1$	副站 $R_2$	副站 $R_3$
30	(0,0,0)	(21.21,21.21,-0.05)	(-21.21,21.21,-0.1)	(42.42,0,0.1)

图 6 ~ 图 8 分别为雷达在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的估计误差,图 9、图 10 分别为模式 1 和模式 2 的雷达辐射时机,图 11、图 12 分别为主/被动雷达模型概率,表 4 为雷达在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴跟踪的均方根误差。

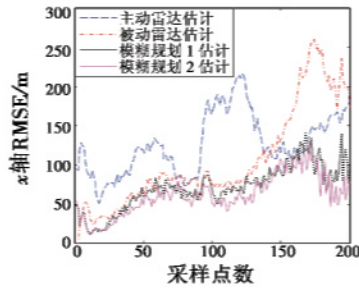


图 6  $x$  轴位置估计误差  
Fig. 6 Position RMSE of  $x$  axis

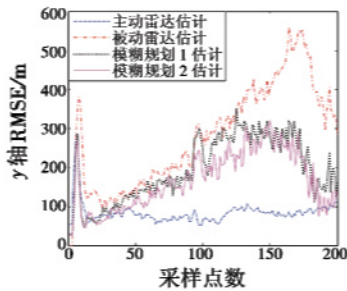


图 7  $y$  轴位置估计误差  
Fig. 7 Position RMSE of  $y$  axis

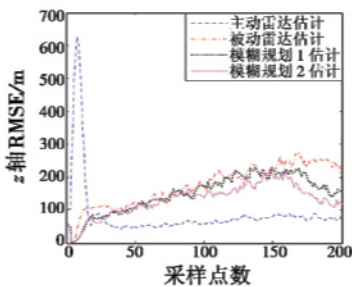


图 8  $z$  轴位置估计误差  
Fig. 8 Position RMSE of  $z$  axis

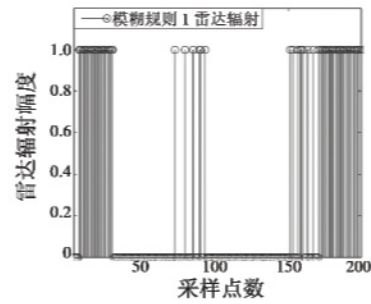


图 9 模糊规则 1 雷达辐射时机图  
Fig. 9 The radar radiation point by fuzzy rule 1

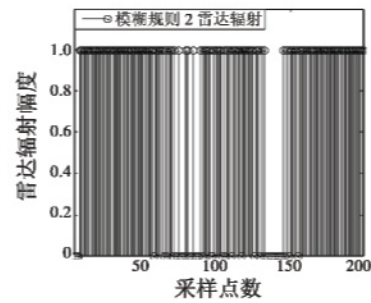


图 10 模糊规则 2 雷达辐射时机图  
Fig. 10 The radar radiation point by fuzzy rule 2

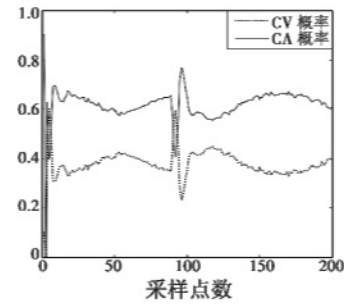


图 11 主动雷达模型概率值  
Fig. 11 The model probability for active radar

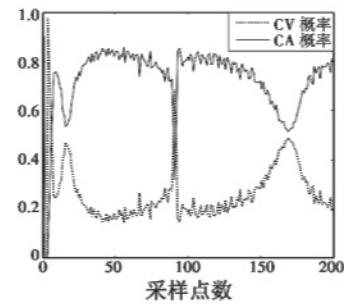


图 12 被动雷达模型概率值  
Fig. 12 The model probability for passive radar

表 4 跟踪性能比较

Table 4 The comparison of tracking capability

估计算法	均方根误差 (RMSE)			雷达工作 时间/%
	$x/m$	$y/m$	$z/m$	
主动雷达估计	125.9228	83.7106	90.7532	-
被动雷达估计	104.4505	279.4045	175.7460	-
模糊规则 1 估计	70.6204	193.6697	152.3161	33.0
模糊规则 2 估计	59.9642	164.5670	139.7572	77.5

可以看出,针对主动雷达辅助的被动雷达跟踪系统,当目标作蛇形机动时,采用模糊推理的 IMM-UKF 算法能够在保证系统跟踪精度的前提下,实现对主动雷达辐射时机的有效控制。同时也可以看出,对于目标做蛇形机动,单独使用主/被动雷达进行跟踪,各坐标( $x, y, z$ )轴上的跟踪误差收敛性较差,特别是被动雷达跟踪系统随着跟踪时间的持续会出现发散现象。而采用协同模式后,跟踪精度较被动雷达得到了大幅提升,且误差逐渐趋于收敛。

同时,对于模糊推理的 IMM-UKF 算法,当模糊推理规则及模糊隶属度函数不同时,雷达的辐射控制效果不同。基于此,可以根据实际系统精度的不同要求,通过调整模糊规则或隶属度函数来实现对主动雷达的辐射控制。更为重要的是,在面对不同作战环境或更为复杂的电磁环境时,可以充分考虑将影响整个系统的各种因素作为模糊输入控制量,通过改变或增加模糊输入量来实现对主动雷达辐射的有效控制,同时也提升了协同探测跟踪系统的自适应跟踪能力。

#### 4 结 论

文中提出了一种主动雷达辅助的被动雷达工作模式,并引入模糊理论,设计提出了协同跟踪算法,仿真结果也进一步验证了该算法的有效性。实现了对主动雷达辅助的被动雷达跟踪模式的有效、实时控制,降低了主动雷达的开机时间,提高了系统的隐蔽性,满足跟踪系统精度要求,具有工程应用价值。对于精度要求更高的系统,可以采用性能更优的滤波算法,如粒子算法,但同时也会带来复杂的计算量。为此,需要考虑各方面因素,综合选取性价比较高的算法以满足系统总体性能要求。

#### 参 考 文 献

- [1] 康耀红. 数据融合理论与应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1997.  
KANG Y H. Theory and application of data fusion[M]. Xi'an: Xidian University Press, 1997.
- [2] WHITE F E. Data fusion lexicon [M]. The Data Fusion Subpanel of the Joint Direct Laboratories, 1991.
- [3] 胡晓伟,余云智,顾浩. 等效模拟压制下雷达探测区域计算与调整[J]. 指挥控制与仿真,2012, 34(5):55-58.  
HU X W, YU Y Z, GU H. Computing and adjusting for detecting area of radar under equivalently simulative suppression [J]. Command Control & Simulation, 2012, 34(5):55-58.
- [4] 卢大威. 主/被动雷达复合制导中的信息融合技术研究[D]. 长沙:国防科技大学,2005.
- LU D W. Research on information fusion in active/passive radar complex guidance[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005.
- [5] 梁健. 异类传感器数据融合技术应用[J]. 雷达工程, 2006, 36(7):33-35.  
LIANG J. Data fusion technology of heterogeneous sensor [J]. Radar Engineering, 2006, 36(7):33-35.
- [6] CUI N Z, XIE W X, YU X N, et al. Multisensor distributed extended Kalman filtering algorithm and its application to radar/IR target tracking [C]//Proceedings of the International Society for Optical Engineering, 1997:323-330.
- [7] HUYSTEEN D V, FAROOQ M. Performance analysis of bearing only target tracking algorithm [C]//Proceedings of the International Society for Optical Engineering, 1998: 139-149.
- [8] 李安平,敬忠良,胡士强. 基于有源辅助的被动跟踪系统[J]. 上海交通大学学报,2005, 39(12):2048-2051.  
LI A P, JING Z L, HU S Q. Passive tracking system based on Active-assisted[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, 39(12):2048-2051.
- [9] 胡洪涛. 主/被动目标跟踪研究[D]. 上海:上海交通大学,2005.  
HU H T. Research on active/passive target tracking[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2005.
- [10] 陈玲,李少洪. 基于无源时差定位系统的机动目标跟踪算法[J]. 系统工程与电子技术,2005, 27(1):127-130.  
CHEN L, LI S H. Maneuvering target tracking algorithm based on passive TDOA location system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(1):127-130.
- [11] 曹谢东. 模糊信息处理及应用[M]. 北京:科学出版社,2003.  
CAO X D. Fuzzy information processing and applications [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [12] 徐振鲁. 时差法多站无源定位及其信号处理技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2011.  
XU Z L. Treatment technology passive location and multi-station signal difference method[D]. Nanjing: University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [13] 程欢欢. 基于改进 IMM 算法的机动目标跟踪研究 [D]. 西安:空军工程大学,2010.  
CHENG H H. Research on improved tracking algorithm for maneuvering target based on IMM [D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2010.
- [14] 王卫乔. 主/被动复合制导数据融合技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2010.  
WANG W Q. Active/passive data fusion technology composite guidance[D]. Xi'an: University of Electronic Science and Technology, 2010.