

## 基于导弹攻击区的空战态势评估\*

史振庆 梁晓龙 张佳强 刘 流  
(空军工程大学空管领航学院,西安 710051)

**摘要:**针对传统的空战态势评估研究中很少考虑目标攻击区对我机的影响,从而使评估结果不够全面的问题,加入目标攻击区对我机的影响因素,提出基于导弹攻击区的空战态势评估方法。利用空空导弹数学模型,应用快速模拟法求得双方的可攻击区和不可逃逸区,作为定量分析的参考基础,以此构造基于距离、角度、速度、高度等影响因素的态势评价指标函数,用优势函数作比值的方法来研究空战相对态势。仿真结果表明了该方法的有效性。

**关键词:**攻击区;空战态势评估;比值法

中图分类号:V271.4;TJ760

文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.1002-0640.2018.09.019

引用格式:史振庆,梁晓龙,张佳强,等.基于导弹攻击区的空战态势评估[J].火力与指挥控制,2018,43(9):89-93.

## Situation Assessment for Air Combat Based on Missile Attack Zone

SHI Zhen-qing, LIANG Xiao-long, ZHANG Jia-qi, LIU Liu  
(School of Air Control and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** Aiming at the rare consideration of target's attack zone in traditional situation assessment that the assessment result is not comprehensive enough, taking target's attack zone into account, a situation assessment method based on missile attack zone is presented. Using the air-to-air missile mathematical model and rapid simulation method to find the attack zone and non-escape zone as the basis for quantitative analysis. The situation assessment function based on influence factors such as distance, angle, speed and height is constructed based on the above models, and using the ratio of the respective advantage function to compare the situation of air combat. The simulation results have shown the effectiveness of the method.

**Key words:** attack zone; situation assessment for air combat; ratio method

**Citation format:** SHI Z Q, LIANG X L, ZHANG J Q, et al. Situation assessment for air combat based on missile attack zone[J]. Fire Control & Command Control, 2018, 43(9): 89-93.

### 0 引言

空战态势评估是指在特定的时空环境下,对空战双方的要素感知和评估,并基于要素预测态势在未来一段时间内的发展趋势<sup>[1-2]</sup>。在双方空战能力相当的情况下,占据优势空战态势是取得空战胜利的关键。对空战态势评估的研究在现代空战研究中具有重要的价值<sup>[3-5]</sup>。

学者们对空战态势评估展开了深入的研究并

取得了丰硕的成果。文献[6]将神经网络应用到空战态势威胁评估中,通过训练可以获得较理想的模型,大大提高了作战效能。然而该算法受到先验知识的限制,在先验信息不完备或者不精确时,该方法的适用性受限。文献[7-8]以证据网络为基本框架,建立了基于敌、我双方几何位置关系和运动状态的敌方战机威胁评估模型,降低了不确定信息对态势评估结果的影响。文献[9-10]提出了超视距空战威胁评估的方法,建立了态势优势函数,通过优

收稿日期:2017-08-25

修回日期:2017-09-14

\* 基金项目:国家自然科学基金(61472442, 61472443), 陕西省自然科学基金基础研究计划基金资助项目(2017JQ6035)

作者简介:史振庆(1993-),男,山东潍坊人,硕士研究生。研究方向:航空集群理论与技术。

势函数值来评估态势优势。然而该方法更多的是考虑我机的单方面优势,对敌机在特定态势下对我机形成的优势考虑较少,使得评估结果不够全面。文献[1,11]针对空战态势评估中缺乏定量分析的问题,提出了基于空空导弹攻击区的空战态势评估方法,为空空态势的评估作出了更加准确的参考,使得评估结果更加接近真实情况。

上述方法在进行空战态势评估时多为比较优势值大小,认为差值越大则我方态势越优。然而在双方优势差值相同或非常接近时,因双方实际优势值的不同,双方相对优势的等级也不同。对此,本文引入敌、我机优势值作比值的方法,研究空战态势评估。

## 1 空空导弹攻击区模型

空空导弹攻击区是以攻击机作为参考,在满足一定的攻击条件下,攻击机发射空空导弹能以一定的概率命中目标的目标初始位置的范围[12]。按照目标运动方式的不同,空空导弹攻击区可以分为空空导弹可攻击区和空空导弹不可逃逸区。

影响空空导弹攻击区的因素主要有:导弹的性能、载机的运动状态和目标机的运动状态。下面以导弹、载机、目标的运动模型为基础,以空空导弹攻击区的约束条件为约束,建立空空导弹攻击区模型。

### 1.1 空空导弹运动模型

空空导弹在惯性坐标系下的运动学矢量方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_m = v_m \cos \theta_m \cos \phi_m \\ \dot{y}_m = v_m \sin \theta_m \\ \dot{z}_m = -v_m \cos \theta_m \sin \phi_m \end{cases} \quad (1)$$

其中  $x_m, y_m, z_m$  分别为导弹在  $x, y, z$  3 个方向上的坐标,  $v_m, \theta_m, \phi_m$  分别为导弹的速度、俯仰角和偏转角。

空空导弹三自由度动力学方程为:

$$\begin{cases} \dot{v}_m = (F_p - F_r)g / M_m - g \sin \theta_m \\ \dot{\theta}_m = (n_{my} - \cos \theta)g / v_m \\ \dot{\phi}_m = -n_{mz}g / (v_m \cos \theta_m) \end{cases} \quad (2)$$

其中  $F_p$  为导弹所受推力,  $F_r$  为导弹所受阻力,  $M_m$  为导弹质量,  $g$  为重力加速度,  $n_{my}, n_{mz}$  分别为导弹在俯仰方向和偏航方向的控制过载。

### 1.2 载机运动模型

$$\begin{cases} \dot{x}_f = v_f \cos \theta_f \cos \phi_f \\ \dot{y}_f = v_f \sin \theta_f \\ \dot{z}_f = -v_f \cos \theta_f \sin \phi_f \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \dot{v}_f = n_{fx}g \\ \dot{\theta}_f = n_{fy}g / v_f \\ \dot{\phi}_f = n_{fz}g / (v_f \cos \theta_f) \end{cases} \quad (4)$$

其中  $x_f, y_f, z_f$  分别为载机在  $x, y, z$  3 个方向上的坐标,  $v_f, \theta_f, \phi_f$  分别为载机的速度、俯仰角和偏转角,  $n_{fx}, n_{fy}, n_{fz}$  分别为载机的纵向控制过载, 俯仰方向转弯控制过载和偏航方向转弯控制过载。

### 1.3 目标运动模型

$$\begin{cases} \dot{x}_t = v_t \cos \theta_t \cos \phi_t \\ \dot{y}_t = v_t \sin \theta_t \\ \dot{z}_t = -v_t \cos \theta_t \sin \phi_t \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \dot{v}_t = n_{tx}g \\ \dot{\theta}_t = n_{ty}g / v_t \\ \dot{\phi}_t = n_{tz}g / (v_t \cos \theta_t) \end{cases} \quad (6)$$

其中  $x_t, y_t, z_t$  分别为目标在  $x, y, z$  3 个方向上的坐标,  $v_t, \theta_t, \phi_t$  分别为目标的速度、俯仰角和偏转角,  $n_{tx}, n_{ty}, n_{tz}$  分别为目标的纵向控制过载, 俯仰方向转弯控制过载和偏航方向转弯控制过载。

### 1.4 导引律模型

本文采用比例导引法。比例导引法指控制导弹在飞向目标的过程中,使导弹速度方向变化率与目标视线变化率成比例[13],其模型如下:

$$\dot{\varepsilon} = k \dot{q} \quad (7)$$

其中  $\dot{\varepsilon}$  为导弹速度方向变化率,  $\dot{q}$  为视线转率。

弹上导引头最大角速度限制为:

$$\dot{\varepsilon} = \begin{cases} \dot{\varepsilon}_{\max} \operatorname{sgn}(\dot{q}) & \left| \dot{\varepsilon} \right| \geq \dot{\varepsilon}_{\max} \\ \dot{\varepsilon} & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

### 1.5 空空导弹可攻击区约束条件

#### 1.5.1 空空导弹运动约束条件

文献[14]将导弹击中目标定义为  $r < e$  且  $t > t_v$ , 否则导弹攻击失败。其中  $e$  为允许的脱靶量,  $t_v$  为导弹引信解除保险时间。导弹攻击目标失败主要有以下原因:

1) 飞行时间限制。导弹飞行时间超过最大可控

飞行时间。

2) 导弹导引头动态视场角限制。动态视场角超过导弹速度前置角,则丢失目标。

3) 飞行速度限制。导弹飞行速度小于最小飞行速度,不能提供升力,飞行失控。

4) 高度超限。空空导弹的飞行高度应满足大于 200 m,小于 20 km。

5) 引信解锁时间限制。当导弹和目标接近时,若剩余时间小于引信解锁时间易脱靶。

### 1.5.2 载机约束条件

1) 目标处于机载火控雷达的探测距离及探测角度之外,则认为载机不能构成发射条件。

2) 导弹发射后仍需本机火控雷达制导的,当目标处于机载火控雷达的探测距离及探测角度之外时,则认为攻击结束。

### 1.6 空空导弹不可逃逸区约束条件

不可逃逸区的计算条件为:导弹发射时,目标就以最大过载做逃逸机动。本文在解算不可逃逸攻击区时,参照文献[15-17]中的方法,分别计算目标在以最大法向过载向左、向右运动,以及无法向过载时直线运动 3 种情况下的攻击区,取同一角度下攻击区外边界的最小值作为不可逃逸区的外边界,取同一角度下攻击区内边界的最大值作为不可逃逸区的内边界。其他仿真约束条件与空空导弹攻击区的约束条件相同。文中取目标最大法向过载为 3 g。

## 2 态势优势函数模型

态势优势函数,是在特定的空战态势下,攻击机对目标形成的优势值的量化指标。态势优势函数的构造要兼顾机载雷达、导弹性能与双方的几何态势,而距离、角度、速度、高度是主要的影响因素。下面以距离、角度、能量优势函数模型为基础,构造空战态势优势函数模型。

### 2.1 距离优势函数模型

距离对雷达发现概率和导弹杀伤概率有着十分重要的影响,从而影响优势函数的值<sup>[10]</sup>。

在公开发表的文献中,多将战斗机与目标的距离  $D$  分别定义为雷达最大发现距离  $D_{R_{\max}}$ ,导弹最大攻击距离  $D_{M_{\max}}$ ,导弹最小攻击距离  $D_{M_{\min}}$ ,目标不可逃逸最大距离  $D_{M_{K\max}}$ ,目标不可逃逸最小距离  $D_{M_{K\min}}$ 。

当  $D > D_{R_{\max}}$  时,本文采用文献[9]的观点,认为随着作战能力的提高,即使目标在本机雷达探测范围之外,也能利用其他平台提供的信息发射远程导弹达到摧毁目标的目的,因此,优势函数不能简单地认为等于零。结合以上分析,定义如下距离优势函数:

$$J_D = \begin{cases} 0.183 \cdot 9e^{-\frac{D-D_{M_{\max}}}{D_{R_{\max}}-D_{M_{\max}}}} & D_{R_{\max}} \leq D \\ 0.5e^{-\frac{D-D_{M_{\max}}}{D_{R_{\max}}-D_{M_{\max}}}} & D_{M_{\max}} \leq D \leq D_{R_{\max}} \\ 2^{-\frac{D-D_{M_{K\max}}}{D_{M_{\max}}-D_{M_{K\max}}}} & D_{M_{K\max}} \leq D \leq D_{M_{\max}} \\ 1 & D_{M_{K\min}} \leq D \leq D_{M_{K\max}} \\ 2^{-\frac{D-D_{M_{K\min}}}{10-D_{M_{K\min}}}} & 10 \leq D \leq D_{M_{K\min}} \end{cases} \quad (9)$$

### 2.2 角度优势函数模型

角度优势主要与目标相对方位角( $\phi$ )和目标进入角( $q$ )有关。为研究方便,对模型中所用到的参数符号及意义作如下规范:

目标视线( $FT$ ): 我机( $F$ )到目标( $T$ )的连线;

目标方位角( $\phi$ ): 我机航向与目标视线的夹角;

我机方位角( $\theta$ ): 敌机航向与目标视线的夹角;

目标进入角( $q$ ): 目标航向与目标视线延长线的夹角。

规定方位角和进入角右偏为正,左偏为负,即  $0^\circ \leq |q| \leq 180^\circ$ ,  $0^\circ \leq |\phi| \leq 180^\circ$ 。

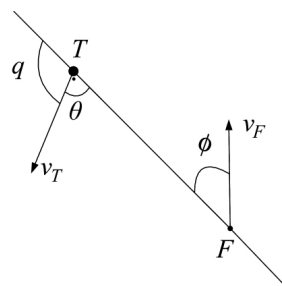


图1 敌、我机几何态势示意图

文献[10]在进行目标方位角对优势函数影响的研究中,将方位角分为不可逃逸区,导弹攻击区,雷达搜索区和雷达搜索区之外 4 个区域。文献[9]在文献[10]的基础上,考虑了雷达搜索区之外的优势函数。根据文献[9-10]的方法,构造如下方位角优势函数:

$$J_\phi = \begin{cases} 0.1 - \frac{|\phi| - 85^\circ}{10(180^\circ - 85^\circ)} & 85^\circ \leq |\phi| \\ 0.2 - \frac{|\phi| - \phi_{R_{\max}}}{10(85^\circ - \phi_{R_{\max}})} & \phi_{R_{\max}} \leq |\phi| \leq 85^\circ \\ 0.3 - \frac{|\phi| - \phi_{M_{\max}}}{10(\phi_{R_{\max}} - \phi_{M_{\max}})} & \phi_{M_{\max}} \leq |\phi| \leq \phi_{R_{\max}} \\ 0.8 - \frac{|\phi| - \phi_{M_{K\max}}}{2(\phi_{M_{\max}} - \phi_{M_{K\max}})} & \phi_{M_{K\max}} \leq |\phi| \leq \phi_{M_{\max}} \\ 1 - \frac{|\phi|}{5\phi_{M_{K\max}}} & 0^\circ \leq |\phi| \leq \phi_{M_{K\max}} \end{cases} \quad (10)$$

其中  $\phi_{R_{\max}}$  为雷达最大搜索方位角  $\phi_{M_{\max}}$  为空空导弹最大离轴发射角  $\phi_{M_{\max}}$  为不可逃逸区圆锥角。

根据文献[9]对现代空战中进入角优势的分析与改进,可构造进入角优势函数为:

$$J_q = \begin{cases} e^{-\frac{|180^\circ - \phi - q|}{180^\circ/\pi}}, & 0 \leq \phi \\ \text{if } q < -\phi, q = q + 360^\circ; \\ \text{if } \phi > 90^\circ, \phi = 180^\circ - \phi \\ e^{-\frac{|180^\circ + \phi + q|}{180^\circ/\pi}}, & \phi < 0 \\ \text{if } q > -\phi, q = q - 360^\circ; \\ \text{if } \phi < -90^\circ, \phi = -180^\circ - \phi \end{cases} \quad (11)$$

考虑到方位角与进入角具有耦合性,可以构造角度优势函数为:

$$J_A = J_\phi^{\gamma_1} J_q^{\gamma_2} \quad (12)$$

其中  $\gamma_1, \gamma_2$  为权重系数  $\gamma_1 + \gamma_2 = 1$ , 具体取值可由专家打分给出,文中取  $\gamma_1 = \gamma_2 = 0.5$ 。

### 2.3 能量优势函数模型

能量优势指在空战中,我机为了更好地搜索发现目标和发射导弹而具有的高度和速度优势。目前公开发表的文献中,多将飞机单位能量( $E$ )定义为<sup>[1]</sup>:

$$E = H + \frac{V^2}{2g} \quad (13)$$

其中  $H$  为飞机高度,  $V$  为飞机速度,  $g$  为重力加速度。采用文献[9]的能量优势函数建立方法,将能量优势函数定义为:

$$J_E = \begin{cases} 1 & 2E_T \leq E \\ 1 + \frac{0.9(E - 2E_T)}{1.5E_T} & 0.5E_T \leq E < 2E_T \\ 0.1 & E < 0.5E_T \end{cases} \quad (14)$$

其中  $E$  为我机单位能量,  $E_T$  为目标单位能量。

### 2.4 空战态势优势函数模型

综合考虑 2.1~2.3,采用加权法构造攻击机对目标的态势优势函数:

$$J = \alpha_1 J_D + \alpha_2 J_A + \alpha_3 J_E \quad (15)$$

其中  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  分别为距离优势、角度优势、能量优势的权重,其具体值可由专家打分给出,且  $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$ 。

传统的空战态势评估研究中,更多的是比较敌机优势值  $J_D$  和我机优势值  $J_W$  的大小,通过两者的差值  $J_W - J_D$  来反应我机攻击优势的大小。

但是当不同态势下,如果  $J_W - J_D$  值非常接近或相同时,该差值并不能反应我机与目标机在不同情

况下的相对态势优劣。

为此,本文采取我机与目标机优势函数值作比值的方法,构造我机相对于目标机的总优势函数  $J_Z$ :

$$J_Z = J_W / J_D \quad (16)$$

## 3 我机空战态势评估流程

我机综合空战态势优势函数模型建立与求解的基本流程如图 2 所示。

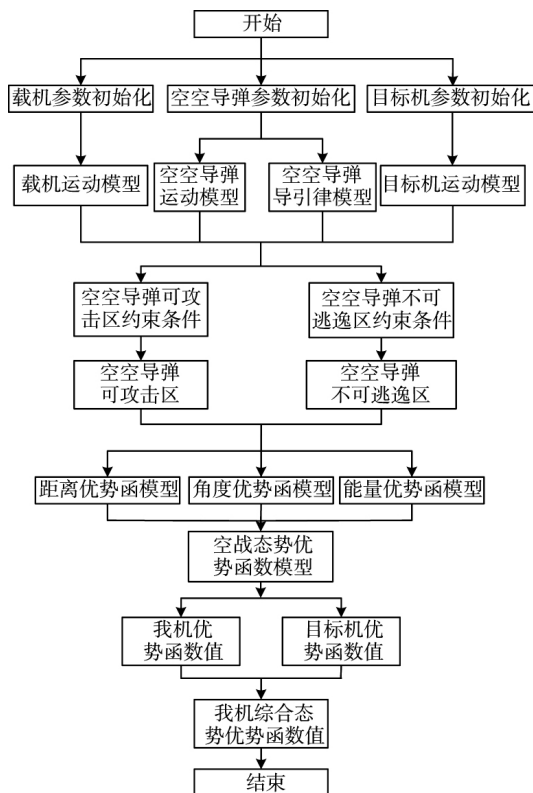


图 2 综合态势优势函数模型建立流程图

步骤 1 结合第 1 节中构建的空空导弹、载机与目标机的运动模型,并结合空空导弹导引律模型,以此作为计算空空导弹可攻击区和不可逃逸区的基础。

步骤 2 利用以上模型,求得空空导弹可攻击区和不可逃逸区,作为空战态势评估的依据。

步骤 3 由式(9)~式(14),建立距离、角度、能量优势函数,然后利用加权法,建立单机空战态势优势函数评估模型。

步骤 4 利用我机与敌机空战态势优势函数值做比值的方法,由式(16)求得我机的综合态势评估值。

## 4 仿真分析

1) 目标假设:计算可攻击区时,假设目标速度为 300 m/s、高度为 8 km 且做直线运动,计算不可逃逸攻击区时,假设目标速度为 300 m/s、高度为 8 km,



以  $3g$  过载做背向导弹来向转弯,当其速度与来袭导弹速度方向一致后,保持该方向逃离。考虑超视距空战的特点,将目标进入角  $q$  设定为  $\pm 90^\circ$  (正侧方进入)到  $\pm 180^\circ$  (迎头进入)的范围。

2) 我机假设:速度  $300\text{ m/s} \sim 400\text{ m/s}$ ,高度为  $8\text{ km} \sim 10\text{ km}$ 。在计算目标对我机可攻击区时,假设我机做直线运动;在计算目标对我机不可逃逸区时,我机以  $3g$  过载做背向导弹来向转弯,当其速度与来袭导弹速度方向一致后,保持该方向逃离。

3) 导弹假设:最大离轴发射角  $30^\circ$ ,最大速度  $2.5\text{ Ma}$ ,最大法向过载  $30g$ 。

4) 考虑现代空战中,目标与我机之间多为超视距空战,距离假设为  $60\text{ km} \sim 120\text{ km}$ 。

5) 假设式(15)中距离优势、角度优势、能量优势的权值  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  分别为  $0.4, 0.5, 0.1$ 。

基于上述仿真条件,进行全局遍历计算,采用比值法对双方相对态势进行比较,得出不同情况下我机综合优势值。仿真结果表明,在相同距离和目标进入角的情况下,我机综合优势值取得最优的条件是:我机高度为  $10\text{ km}$ ,速度为  $400\text{ m/s}$ ,目标方位角为  $0^\circ$  (即我机指向敌机)。

在上述最优高度、速度、目标方位角的条件下,对双方距离和目标进入角进行全局遍历计算,得出我机综合优势值变化如图3所示:

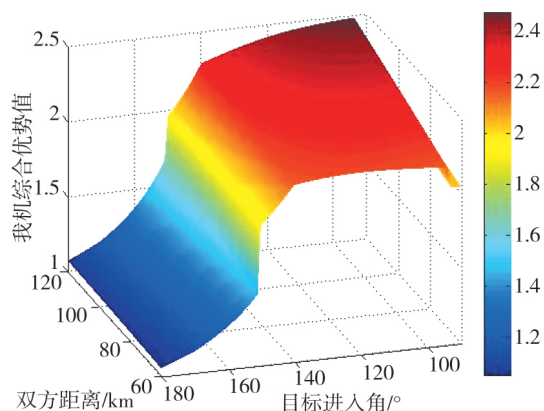


图3 我机综合优势值

图3反映了我机综合优势随着双方距离和目标进入角的变化趋势。由图3可见,目标进入角为  $180^\circ$  (迎头态势)时,我机综合优势值大约为 1,即双方为均势。随着目标进入角减小,我机综合优势值会增大,达到最大值后再逐渐减小。随着双方距离的不同,我机最大综合优势值所对应的敌机进入角也不同。

通过图3能够找出我机在不同距离下,获得最大综合态势值时所对应的目标机的进入角。如果以

目标机为中心,在极坐标下绘制出取得最大综合态势值时我机的位置点,如图4所示。

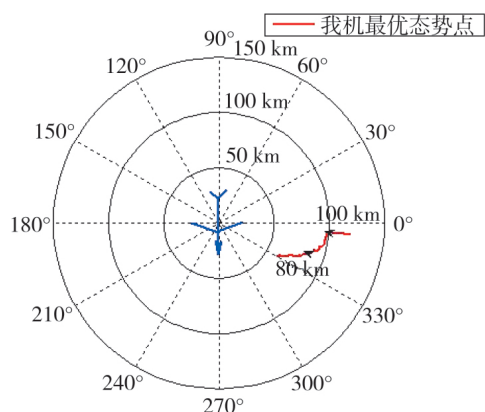


图4 我机最优综合态势图

图4中红色曲线上的点,是在给定双方距离的情况下,我机综合优势值取得最大时,所对应的我机位置点。如:双方距离为  $80\text{ km}$  时,我机相对于目标的方位为  $338^\circ$ ,所对应的目标进入角为  $112^\circ$ ;  $100\text{ km}$  时,我机相对于目标的方位为  $355^\circ$ ,所对应的目标进入角为  $95^\circ$ 。

由图4可见,当我机从较远距离向目标接近时,从其侧方进入具有更大的优势,随着距离的减小,我机向目标前半球机动,增大目标进入角会形成相对目标更大的综合态势优势。

## 5 结论

1) 本文以导弹攻击区为依据,以距离、角度、高度和速度为主要影响因素建立了态势优势函数,将目标对我机的空战威胁考虑在内,并用优势函数作比值的方法比较双方态势的优劣。

2) 充分考虑目标对我机的威胁,并以攻击区作为量化评估的标准,使评估结果更加准确,更加符合真实的战场情况。

3) 利用我机与目标优势函数值作比值的方法来评价我机相对于目标的优势,这种方法能够更加直观地反应出我机的相对优势。

参考文献:

- [1] 吴文海,周思宇,高丽,等. 基于导弹攻击区的超视距空战态势评估改进[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(12): 2679-2685.
- [2] GAVAN L. Introduction to the special issue on cognitive systems [J]. The International Journal of Aviation Psychology, 2011, 21(1): 1-2.

(下转第 98 页)

以临界距离略大于统计均值  $0.7D$ 。根据所有计算结果均方偏差来看,融合算法比原算法预测效果更好。

## 5 结论

本文重点对比分析了两种适合在大尺度不规则地形下预测电波传播损耗的多子模型,总结了这两种多子模型预测传播损耗,分别以相对余隙和传播距离为判据,对多子模型进行了分类。

针对此特点,本文设计了一种融合算法,以相对余隙  $p$  为判据的多子模型为基础,分析验证了可以在  $0 < p < 1$  时附加传播距离进行多子模型使用的复合判决,即在  $0 < p < 1$  时,一旦传播距离超过无线电电视距的  $0.7$  倍,则使用地表绕射损耗模型预测电波传播损耗,否则依然使用以相对余隙  $p$  为判据的多子模型。在超短波频段,设置实验参数并结合实测数据,分析得出由于地形阻挡产生的临界距离略大于  $0.7D$  的结论。同时,根据所有计算结果的均方偏差,验证了该融合算法在一定条件下可以提高多子模型预测电波传播损耗的精度。

参考文献:

- [1] 席静. 基于数字地图的多子模型组合方法精确预测大尺度不规则地形电波传播损耗[D].南京:南京邮电大学, 2016.
- [2] 黄凯丽.山区环境电波传播预测的改进算法研究[D].南

京:南京邮电大学, 2017.

- [3] 杨卫星. 结合数字地图的电波传播预测计算软件原型的研制[D].南京:南京邮电大学, 2016.
- [4] 刘广凯. 超短波信道建模方法[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(4): 9-14.
- [5] 李美莹. 典型地貌电波传播损耗高效精确建模研究[D].北京:北京理工大学, 2016.
- [6] 朱慧娟. 荷叶状空间信道模型与 MIMO 多天线系统分析[J].西安电子科技大学学报, 2018, 45(1): 135-139.
- [7] 袁晓雷. 数字微波通信路由设计的传播余隙标准[J].有线电视技术, 2010, 242(2): 79-81.
- [8] 陈启香. 基于超短波的列车间直接通信技术研究[J].计算机工程, 2013, 39(12): 5-10.
- [9] 董海. 不规则地形的无线信道模型仿真及硬件实现设计[D].长沙:国防科技大学, 2009.
- [10] 赵育才. 无线电波传播预测与干扰分析研究及实现[D].长沙:国防科技大学, 2009.
- [11] 何佳. ITU-R P.526 电波传播模型中光滑球面绕射研究[J].频谱研究, 2014, 4(12): 45-47.
- [12] 张飞. 基于阴影衰落信道建模的 WSN 能量优化算法[J].计算机工程, 2016, 42(6): 108-112.
- [13] 马宇. 跳频通信信道衰落技术的研究与仿真[D].成都:电子科技大学, 2010.
- [14] 王好同. 超短波传播损耗预测研究与应用[J].系统仿真科学与应用, 2011, 5(10): 231-236.
- [15] 朱秋明. 月表环境无线电波传播分段预测模型[J].四川大学学报, 2013, 46(2): 116-120.

(上接第 93 页)

- [3] KUMAR S, TRIPATHI B K. Modelling of threat evaluation for dynamic targets using Bayesian network approach [C]//International Conference on Emerging Trends in Engineering, Science and Tecnology, 2016: 1268-1275.
- [4] 肖亮, 黄俊, 徐钟书. 基于空域划分的超视距空战态势威胁评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(10): 1309-1313.
- [5] 程天发, 葛泉波, 陈哨东, 等. 基于改进空战威胁评估模型的权重计算方法比较[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(1): 32-36.
- [6] 黄璇, 郭立红, 李姜, 等. 基于神经网络的超视距空战协同攻击决策[J]. 沈阳工业大学学报, 2016, 24(6): 1448-1454.
- [7] 王昱, 章卫国, 傅莉, 等. 基于不确定性信息的空战威胁评估方法[J]. 西北工业大学学报, 2016, 34(2): 299-304.
- [8] 王昱, 章卫国, 傅莉, 等. 基于改进证据网络的空战动态态势估计方法[J]. 航空学报, 2015, 36(12): 3896-3908.
- [9] 肖冰松, 方洋旺, 胡诗国, 等. 一种新的超视距空战威胁评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(9): 2163-2166.
- [10] 高永, 向锦武. 一种新的超视距空战威胁估计非参量法模型[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(9): 2570-2573.
- [11] 顾佼佼, 刘卫华, 姜文志. 基于攻击区和杀伤概率的视距内空战态势评估[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(6): 1306-1312.
- [12] 刁兴华, 方洋旺, 伍友利, 等. 双机编队空空导弹协同发射区模拟仿真分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(3): 370-376.
- [13] 张中南, 童幼堂, 张卫峰. 比例导引法导引弹道仿真研究[J]. 战术导弹技术, 2005, 5(2): 56-59.
- [14] 张平, 方洋旺, 金冲, 等. 空空导弹攻击区实时解算的新方法[J]. 弹道学报, 2010, 22(4): 11-14.
- [15] 景晓年, 梁晓龙, 张佳强, 等. 无人机感知避让技术分析[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(4): 1-5.
- [16] 罗畅, 黄长强, 蔡亚伟, 等. 无人作战飞机对空自主攻击占位研究[J]. 光电与控制, 2014, 21(9): 19-25.
- [17] 庞威, 谢晓方, 郑力会, 等. 新型远程制导炸弹攻击区影响因素研究[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(2): 1-7.