

电子战目标威胁评估的折衷排序方法

王鑫, 吴华, 赵玉, 程嗣怡, 宋海方

(空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038)

摘要: 电子战目标威胁评估是制定电子战作战决策的重要环节, 针对电子战目标涉及因素多、各因素不确定性大的问题, 建立了电子战目标多属性群决策威胁评估模型, 重点对威胁评估指标的选取以及确定进行了讨论, 并基于标尺量化函数对定性指标进行量化; 采用折衷排序方法 VIKOR 对威胁目标排序, 从而在整体效用最大的同时达到个体遗憾最小。最后通过进行电子战干扰战情想定下目标威胁能力的评估仿真, 验证了威胁评估模型的有效性及其算法的可行性, 为电子战目标威胁评估提供了一种行之有效的方法。

关键词: 电子战目标; 威胁评估模型; 评估指标; 多属性决策; 折衷排序方法; VIKOR

中图分类号: V243; TN97

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2013)08-0014-04

A Compromise Sorting Method for Electronic Warfare Target Threat Assessment

WANG Xin, WU Hua, ZHAO Yu, CHENG Siyi, SONG Haifang

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

Abstract: Threat assessment for the electronic warfare (EW) targets is very important for EW combat decision making. In order to deal with the imprecision and uncertainty of factors relative to EW targets during threat assessment, a multi-attribute and group decision-making threat assessment model was set up, which focused on the selection and determination of threat assessment indexes. Based on the scale quantitative function, the qualitative indexes were quantified. Then the compromise ranking method, VIKOR, was used to sort the threat targets, thus to made the overall utility maximum and individual regret minimum. Finally, the effectiveness of threat assessment model and the feasibility of the algorithm were proved through the threat assessment simulated on the supposed view of an EW.

Key words: electronic warfare target; threat assessment model; assessment index; multi-attribute decision making; compromise ranking method; VIKOR

0 引言

战斗机在执行作战任务时, 同时面临上百部雷达的照射, 这对战机生存构成了极大威胁^[1]。机载电子战系统对敌方雷达进行干扰, 是战机“保存自己、消灭敌人”的重要装备。威胁评估是制定干扰决策、进行干扰资源分配的前提, 目前对威胁评估的研究文献较多, 但是鲜有针对电子战目标的^[2-3]; 文献[4]对电子战目标的威胁评估模型进行了研究, 将评估指标均量化为

确定的数值进行计算, 评估指标的选取并没有突出雷达的属性, 除抗干扰能力这一指标, 其他指标均与雷达属性无关。电子战目标威胁评估是一个典型的不确定多属性决策问题, 多属性决策方法包括 TOPSIS、VIKOR 和 ELECTRE 等方法。TOPSIS 方法存在无法反映各目标与正负理想解的接近程度的不足, ELECTRE 方法则单纯追求个体遗憾最小化, 而在实际作战过程中, 威胁评估既要确定最大威胁目标, 又要求不遗漏任何威胁因素, VIKOR 方法(VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje, 折衷排序法)是由 Opricovic 于 1998 年提出的一种基于理想点法的多属性决策方法^[5], 以折衷规划法为核心, 求得的折衷解为最接近理想解的可行解, 克服了上述两种方法的不足, 同时考虑群效用的最大化与个体遗憾的最小化^[6], 更加符合实

收稿日期: 2012-07-14

修回日期: 2012-12-03

基金项目: 陕西省自然科学基金(2012JQ8019); 电子信息控制国防重点实验室基金(9140C1005051103)

作者简介: 王鑫(1989—), 男, 山东潍坊人, 硕士生, 研究方向为电子对抗理论与技术。

战要求。VIKOR方法通过心态指标的选取能充分考虑飞行员的主观能动性^[7],从而使电子战目标威胁评估更具合理性。

本文针对电子战目标特性建立指标体系,对评估指标为精确数、区间数以及评估语言等混合型多属性决策问题,采用VIKOR方法对多个目标雷达进行威胁等级排序,最后通过仿真实例证明了方法的有效性。

1 威胁评估模型

1.1 多属性决策模型

建立多属性群决策模型,多个专家对多属性问题进行群体决策,弥补个体知识和经验不足的缺陷。设作战区域共有 m 部雷达,每部雷达有 n 个属性,有 l 个专家对每部雷达的所有属性分别进行评价,目标集合为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$,属性集为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$,专家集合为 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_l\}$,设 A^k 是第 k 个专家对雷达的模糊评价矩阵。

$$A^k = \begin{bmatrix} \tilde{a}_{11}^k & \tilde{a}_{12}^k & \dots & \tilde{a}_{1n}^k \\ \tilde{a}_{21}^k & \tilde{a}_{22}^k & \dots & \tilde{a}_{2n}^k \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \tilde{a}_{m1}^k & \tilde{a}_{m2}^k & \dots & \tilde{a}_{mn}^k \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, \tilde{a}_{ij}^k 为模糊数,可以是确定数、区间数和模糊评价语言。

1.2 威胁指标的确定

针对电子战目标特性选择雷达类型、工作状态、平台类型、目标位置、作战意图以及抗干扰能力等指标建立指标体系(对应 $n=6$)。其中,雷达类型、平台类型、雷达工作状态和抗干扰能力为定性指标,目标距离位置和作战意图为定量指标。

1.2.1 定性指标的确定

由于定性指标自身的复杂性和决策者思维的模糊性,决策者所获取的相关信息具有不确定性,这种不确定性的决策信息用模糊语言评价更为合理。

指标的定性分析需要选择适当的语言评估标度,常用的语言评估标度为 $S = \{s_k | k = -L, \dots, -1, 0, 1, \dots, L\}$ 。其中: s_k 为语言术语; s_{-L} 和 s_L 分别表示决策者使用的语言术语的下限和上限; L 为正整数; S 中的术语个数一般为奇数。本文采用的语言标度为 $S = \{\text{极不危险, 很不危险, 不危险, 较不危险, 一般, 较危险, 危险, 很危险, 极危险}\}$,即 $L=4$,评估中通过将语言变量转换为模糊数进行处理,一种将语言变量转换为区间数的方法为

$$s_k \rightarrow \tilde{A}_k = \frac{1}{2L+1} \cdot (k+L, k+L+1) \quad (2)$$

将语言变量转换为三角模糊数,对应有

$$s_k \rightarrow \tilde{A}_k = \frac{1}{2(L+1)}(k+L, k+L+1, k+L+2) \quad (3)$$

雷达类型主要有预警雷达、指挥引导雷达、火控雷达、制导雷达等;平台类型主要有机载、地面(包括陆基与车载)和舰载等类型;这两种指标通过模糊语言评价进行定性的判断,然后采用式(2)的标尺量化函数将其转化为对应的区间数。

对于雷达抗干扰能力,不同的雷达有其相应的抗干扰措施,种类较多,且针对性强;雷达工作状态主要有搜索、跟踪和制导等,所引起的威胁等级一般为制导>跟踪>搜索,但各工作状态较难明确区分。对于以上两种状态难以明确区分的指标,采用式(3)的标尺量化函数,将模糊语言评价量化为三角模糊数处理。

1.2.2 定量指标的确定

定量指标可直接使用数学公式进行定量计算处理。

对于机载自卫电子战系统而言,当目标雷达与本机距离 r 小于最小威胁距离 r_1 ,即 $r \leq r_1$ 时,其威胁程度 $W_{\text{position}}(r)$ 最大,设为最大值1;当 r 大于最大威胁距离 r_2 ,即 $r > r_2$ 时基本不对本机造成威胁,可认为 $W_{\text{position}}(r)$ 为最小值0;同时 $W_{\text{position}}(r)$ 随距离的减小快速变大,因此采用二次曲线作为目标距离属性数学表达式。

$$W_{\text{position}}(r) = \begin{cases} 1, & r \leq r_1 \\ \left(\frac{r-r_2}{r_1-r_2}\right)^2, & r_1 < r \leq r_2 \\ 0, & r > r_2 \end{cases} \quad (4)$$

目标的作战意图主要从目标与我方飞机的相对径向速度方面考虑,既考虑了双方速度因素,又考虑了双方位置角度关系。

$$W_v(i) = v_m \cdot \cos \theta_{mi} + v_i \cdot \cos \theta_{ii} \quad (5)$$

式中: $W_v(i)$ 表示第 i 个目标作战意图威胁值; v_m 表示本机速度; θ_{mi} 表示本机速度方向与本机和目标 i 连线的夹角; v_i 表示第 i 个目标的速度大小; θ_{ii} 表示目标速度方向与本机和目标 i 连线的夹角。

2 威胁评估算法

2.1 专家权重的确定

多属性多决策问题的权重分为指标权重和专家权重。运用聚类分析的方法^[8]求解专家个人权重,使专家之间遵从少数服从多数的原则。假设决策专家个人权重为 $\varepsilon = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_l]^T$, $\sum \varepsilon_i = 1$ 。

2.2 属性指标权重的确定

运用层次分析法^[9](AHP),定性和定量相结合处

理各种决策因素,确定各指标权重。指标权重为 $W = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$, 且满足 $w_i \geq 0, \sum w_i = 1$ 。

2.3 基于VIKOR方法的威胁评估算法

VIKOR方法的基本思想是首先确定理想解(Positive Ideal Solution, PIS)和负理想解(Negative Ideal Solution, NIS), 然后根据各目标的各个评价与理想目标的接近程度来排列各目标的威胁程度顺序。区间数型模糊VIKOR求解威胁评估多属性决策问题的具体步骤如下所述。

步骤1 确定PIS和NIS。

$$f^* = \{f_1^*, f_2^*, \dots, f_n^*\} = \{\max_i f_{ij}^U\} \quad (6)$$

$$f^- = \{f_1^-, f_2^-, \dots, f_n^-\} = \{\min_i f_{ij}^L\} \quad (7)$$

式中: f^* 为PIS, 表示各指标威胁程度最大值集合; f^- 为NIS, 表示各指标威胁程度最小值集合。

步骤2 计算综合评价最大威胁值 $S_i = [S_i^L, S_i^U]$ 和综合评价最小威胁值 $R_i = [R_i^L, R_i^U]$ 。

$$S_i^L = \sum_j w_j \left(\frac{f_j^* - f_{ij}^U}{f_j^* - f_j^-} \right) \quad (8)$$

$$S_i^U = \sum_j w_j \left(\frac{f_j^* - f_{ij}^L}{f_j^* - f_j^-} \right) \quad (9)$$

$$R_i^L = \max \left\{ w_j \left(\frac{f_j^* - f_{ij}^U}{f_j^* - f_j^-} \right) \right\} \quad (10)$$

$$R_i^U = \max \left\{ w_j \left(\frac{f_j^* - f_{ij}^L}{f_j^* - f_j^-} \right) \right\} \quad (11)$$

步骤3 计算威胁程度比率 $Q_i = [Q_i^L, Q_i^U]$ 。

$$Q_i^L = v \frac{S_i^L - S^*}{S^- - S^*} + (1-v) \frac{R_i^L - R^*}{R^- - R^*} \quad (12)$$

$$Q_i^U = v \frac{S_i^U - S^*}{S^- - S^*} + (1-v) \frac{R_i^U - R^*}{R^- - R^*} \quad (13)$$

式中: $S^* = \min S_i^L; S^- = \max S_i^U; R^* = \min R_i^L; R^- = \max R_i^U$; v 为“大多数准则”策略的权重或最大群体效用权重。

步骤4 求 $F_{Q_i}(\alpha), F_{S_i}(\alpha)$ 和 $F_{R_i}(\alpha)$ 。

$$F_{Q_i}(\alpha) = M_{Q_i} + (2\alpha - 1)D_{Q_i} \quad (14)$$

$$F_{S_i}(\alpha) = M_{S_i} + (2\alpha - 1)D_{S_i} \quad (15)$$

$$F_{R_i}(\alpha) = M_{R_i} + (2\alpha - 1)D_{R_i} \quad (16)$$

式中: $M_{Q_i} = (Q_i^L + Q_i^U)/2; M_{S_i} = (S_i^L + S_i^U)/2; M_{R_i} = (R_i^L + R_i^U)/2; D_{Q_i} = (Q_i^U - Q_i^L)/2; D_{S_i} = (S_i^U - S_i^L)/2; D_{R_i} = (R_i^U - R_i^L)/2; \alpha$ 为心态指标, α 取小于0.5、等于0.5、大于0.5的值, 分别对应于决策者持谨慎、中庸和激进心态。

步骤5 对目标进行威胁程度排序。

根据 $F_{S_i}(\alpha)$ 和 $F_{R_i}(\alpha)$ 的值, 判断各目标间威胁程度差距大小和决策过程稳定性是否可接受。在可接受的条件下, 根据 $F_{Q_i}(\alpha)$ 的大小对电子战目标的威胁程度排序, $F_{Q_i}(\alpha)$ 值越小, 意味着目标威胁程度越大。在不可接受的条件下, 判定多个目标威胁程度相同, 详见文献[7]。

3 仿真实例

仿真场景设置如下: 某次战斗行动, 我方飞机速度 v_m 为330 m/s, 作战区域内有6个威胁目标, 目标分别记为 $X_i (i=1, 2, \dots, 6)$ 。其中: X_1 为某型先进战斗机火控雷达; X_2 为某型电子战飞机机载雷达; X_3 和 X_4 分别为某地基远程警戒雷达和车载制导雷达; X_5 和 X_6 为舰载雷达。 X_1 与我方的最初距离为50 km, v_{i1} 为300 m/s, θ_{i1} 为 $10^\circ, \theta_{m1}$ 为 15° ; X_2 最初距离我方100 km, v_{i2} 为285 m/s, θ_{i2} 为 $0^\circ, \theta_{m2}$ 为 30° ; X_3 最初距离我方80 km, 为静止目标, θ_{m3} 为 40° ; X_4 最初距离我方200 km, 为静止目标, θ_{m4} 为 45° ; X_5 最初距离我方120 km, 为静止目标, θ_{m5} 为 5° ; X_6 最初距离我方60 km, 为静止目标, θ_{m6} 为 60° ; 假定最小威胁距离和最大威胁距离分别为 $r_1 = 70$ km, $r_2 = 150$ km。3个专家对目标进行威胁评估, 定性指标的模糊语言评价矩阵如表1所示。

表1 语言评价矩阵

Table 1 Linguistic assessment matrix

目标	V_1				V_2				V_3			
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_1	P_2	P_3	P_4	P_1	P_2	P_3	P_4
X_1	危险	危险	极危险	一般	危险	极危险	危险	一般	危险	很危险	很危险	一般
X_2	一般	一般	很危险	危险	一般	一般	很危险	极危险	一般	一般	很危险	很危险
X_3	一般	危险	较不危险	一般	一般	一般	较不危险	一般	一般	较危险	较不危险	一般
X_4	极危险	一般	一般	危险	危险	危险	一般	危险	很危险	较危险	一般	危险
X_5	危险	一般	一般	危险	极危险	一般	一般	一般	很危险	一般	一般	较危险
X_6	危险	很危险	很危险	危险	很危险	危险	危险	危险	较危险	较危险	较危险	危险

表中: $P_1 \sim P_4$ 分别表示对雷达类型、工作状态、平台类型、抗干扰能力的模糊语言评估; $V_1 \sim V_3$ 表示3个评估专家, 专家个人权重分别为 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.4, \varepsilon_3 = 0.2$ 。

根据1.2.1节将表1中专家对电子战目标的定性

指标的评价结果, 通过将对应的语言评估标度 K 值代入式(2)~式(3)转化为区间数或三角模糊数; 根据想定数据按照式(4)~式(5)计算目标的定量指标; 将3个专家确定的决策矩阵与专家权重线性加权并规范化后的决策矩阵如表2所示。

表 2 决策矩阵
Table 2 Decision matrix

目标	雷达类型	工作状态	平台类型	目标位置	作战意图	抗干扰能力
X_1	[0.67 0.78]	[0.7 0.8 0.9]	[0.78 0.89]	0.2581	0.2837	[0.4 0.5 0.6]
X_2	[0.44 0.56]	[0.4 0.5 0.6]	[0.78 0.89]	0.1613	0.2637	[0.7 0.8 0.9]
X_3	[0.44 0.56]	[0.5 0.6 0.7]	[0.33 0.44]	0.2258	0.1168	[0.4 0.5 0.6]
X_4	[0.78 0.89]	[0.5 0.6 0.7]	[0.44 0.56]	0	0.1078	[0.6 0.7 0.8]
X_5	[0.78 0.89]	[0.4 0.5 0.6]	[0.44 0.56]	0.0968	0.1519	[0.5 0.6 0.7]
X_6	[0.56 0.67]	[0.5 0.6 0.7]	[0.56 0.67]	0.2581	0.0762	[0.6 0.7 0.8]

通过对 3 个专家给出的判断矩阵进行层次分析法处理^[10],得到 3 个指标权重为 $W_1 = [0.1688, 0.1170, 0.0811, 0.3442, 0.2275, 0.0614]^T$; $W_2 = [0.2569, 0.1636, 0.0434, 0.3887, 0.0656, 0.0818]^T$; $W_3 = [0.3806, 0.2516, 0.0425, 0.1009, 0.0643, 0.1602]^T$ 。与专家权重线性加权后得指标综合权重为 $W = [0.2464, 0.1626, 0.0583, 0.3133, 0.1301, 0.0893]^T$ 。三角模糊数利用式(17)转换为区间数,以便于分析计算。

$$\hat{a} = [I_L(\hat{a}), I_U(\hat{a})] = [(a^L + a^M)/2, (a^M + a^U)/2] \quad (17)$$

按照式(6)和式(7)计算出 PIS 和 NIS: $f^* = \{0.89, 0.85, 0.89, 0.2581, 0.2837, 0.75\}$; $f^- = \{0.44, 0.45, 0.33, 0, 0.0762, 0.45\}$ 。

利用式(8)~式(13)计算区间数 S_i, R_i 和 Q_i ,其中 v 取 0.5 以同时追求群体效用最大化和个体遗憾最小化,结果如表 3 所示。

表 3 区间值 S_i, R_i, Q_i

Table 3 The interval value of S_i, R_i and Q_i

目标	S	R	Q
X_1	[0.1198, 0.2619]	[0.0602, 0.1205]	[0, 0.2453]
X_2	[0.4029, 0.5505]	[0.1807, 0.2464]	[0.4896, 0.7505]
X_3	[0.5122, 0.6598]	[0.1807, 0.2464]	[0.5867, 0.8477]
X_4	[0.5393, 0.6824]	[0.3133, 0.3133]	[0.8728, 1]
X_5	[0.4645, 0.6076]	[0.1958, 0.1958]	[0.5742, 0.7014]
X_6	[0.3547, 0.4968]	[0.1301, 0.1807]	[0.3468, 0.5731]

选取不同的心态指标,按照式(14)~式(16),分别求得不同心态指标下威胁排序结果如表 4、表 5 所示。

表 4 $F_{Q_i}(\alpha), F_{S_i}(\alpha)$ 和 $F_{R_i}(\alpha)$ 的值及排序结果 ($\alpha=0.5$)

Table 4 The value of $F_{Q_i}(\alpha), F_{S_i}(\alpha), F_{R_i}(\alpha)$ and the sort results ($\alpha=0.5$)

F_{Q_1}	F_{Q_2}	F_{Q_3}	F_{Q_4}	F_{Q_5}	F_{Q_6}	排序
0.1226	0.6200	0.7172	0.9364	0.6378	0.4599	$X_1 > X_6 > X_2 > X_5 > X_3 > X_4$
F_{S_1}	F_{S_2}	F_{S_3}	F_{S_4}	F_{S_5}	F_{S_6}	排序
0.1908	0.4767	0.5860	0.6108	0.5361	0.4258	$X_1 > X_6 > X_2 > X_5 > X_3 > X_4$
F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	排序
0.0903	0.2135	0.2135	0.3133	0.1958	0.1554	$X_1 > X_6 > X_5 > X_2 = X_3 > X_4$

表 5 不同心态指标下的威胁排序

Table 5 The threat sorting with different mentality index

心态指标 α	0.1	0.3	0.7	0.9
排序	$X_1 > X_6 > X_2 > X_5 > X_3 > X_4$	$X_1 > X_6 > X_2 > X_5 > X_3 > X_4$	$X_1 > X_6 > X_5 > X_2 > X_3 > X_4$	$X_1 > X_6 > X_5 > X_2 > X_3 > X_4$

分析可得心态指标不同时,各目标的威胁排序会发生变化,在当前战场想定下, $\alpha < 0.5$ 和 $\alpha = 0.5$ 时飞行员持谨慎和中庸心态,目标排序结果相同,但当 $\alpha > 0.5$ 飞行员持激进心态时,最大威胁目标虽然没有改变,但是 X_5 和 X_2 的排序发生了变化,仍然会对后续干扰决策产生影响,在不同战场想定下影响不同,属性指标的不确定性越大,心态指标影响越大,充分体现了威胁评估过程中指标精确程度和人的主观心态的重要性,使该威胁评估方法更具说服力,更容易被决策者接受。

4 结论

在复杂电磁战场环境下,电子战目标的威胁能力评估是机载电子战系统决策的重要内容之一。本文针对电子战目标的特点选取评估指标,建立了威胁评估的多属性群决策模型,将 VIKOR 方法应用到电子战目标威胁评估研究中。通过电子战目标战情想定下的实例仿真,结果直观体现了指标属性精确性和人的主观心态对威胁评估的重要影响,表明了本文建立的模型和算法的有效性,对电子战目标威胁评估研究具有较好的参考价值和指导意义。

参考文献

- [1] 王星. 航空电子对抗原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2008.
- [2] 徐浩军,郭辉. 空中力量体系对抗数学建模与效能评估[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
- [3] 张堃,周德云. 嫡权与群组 AHP 相结合的 TOPSIS 法多目标威胁评估[J]. 系统仿真学报,2008,20(7):1661-1664.
- [4] 柯宏发,陈永光. 电子战干扰目标的多属性多层次威胁评估模型[J]. 系统工程与电子技术,2006,28(9):1370-1374.
- [5] OPRICOVIC S. Multi-criteria optimization of civil Engineering systems[Z]. Faculty of Civil Engineering, Belgrade,1998.
- [6] OPRICOVIC S, TZENG G H. Compromise solution by MCDM method: Comparative analysis of VIKOR and TOPSIS[J].

(下转第 47 页)

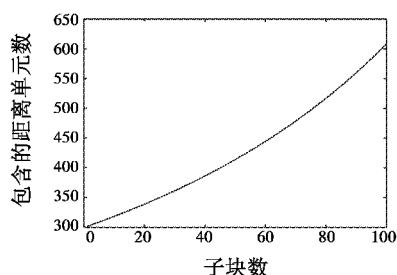


图6 子块数与包含的距离单元数

Fig.6 The number of distance elements and the sub-blocks divided

4 结论

本文基于机载 MIMO-SAR 系统的探测模型,分析了测绘带宽度的增加对成像算法带来的影响,进而提出了一种子块划分的方法,既解决了传统算法中出现的空变性问题,又能有效降低系统的计算量。根据对系统参数的选取进行的讨论,可为后续的系统设计提供参考。

参考文献

- [1] CURRIE A, BROWN M A. Wide-swath SAR [C]//Radar and Signal Processing, IEE Proceedings F, IET. 1992, 139(2):122-135.
- [2] KRIEGER G, GEBERT N, MOREIRA A. Multidimensional waveform encoding: A new digital beamforming technique for synthetic aperture radar remote sensing [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(1):31-46.
- [3] GEBERT N, DE ALMEIDA F Q, KRIEGER G. Airborne demonstration of multichannel SAR imaging [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(5): 963-967.
- [4] ENDER J H G. Along-track array processing for MIMO-

SAR/MTI [C]//European conference on synthetic aperture radar (EUSAR), Germany: Friedrichshafen, 2008: 4032-4036.

- [5] ENDER J H G, KLARE J. System architectures and algorithms for radar imaging by MIMO-SAR [C]//Radar Conference, 2009:1-6.
- [6] FUHRMANN D R, ANTONIO G S. Transmit beamforming for MIMO radar systems using partial signal correlation [C]//IEEE Signals, Systems and Computers, Conference Record of the 38th Asilomar Conference, California, 2004: 295-299.
- [7] 宋岳鹏,杨汝良. 应用多收发孔径实现高分辨率宽测绘带的合成孔径雷达研究 [J]. 电子与信息学报, 2007, 29(9):2110-2113.
- [8] 武其松,井伟,邢孟道,等. MIMO-SAR 大测绘带成像 [J]. 电子与信息学报, 2009, 31(4):772-775.
- [9] 武其松,邢孟道,刘保昌,等. 面阵 MIMO-SAR 大测绘带成像 [J]. 电子学报, 2010, 38(4):817-824.
- [10] XIE Chao, WANG Dangwei, MA Xiaoyan, et al. The imaging method of airborne radar on hybrid sampling [C]//IEEE CIE International Conference on Radar, China: Chengdu, 2011:8-12.
- [11] WANG Dangwei, MA Xiaoyan, CHEN A L, et al. High-resolution imaging using a wideband MIMO radar system with two distributed arrays [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(5):1280-1289.
- [12] SOUMEKH M. Depth-focused interior echo imaging [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(11): 1608-1618.
- [13] SOUMEKH M. Synthetic aperture radar signal processing with MATLAB algorithms [M]. New York: Wiley, 1999.

(上接第 17 页)

European Journal of Operational Research, 2004, 156:445-455.

- [7] 孙红霞,张强. 区间数型模糊 VIKOR 方法 [J]. 模糊系统与数学, 2011, 25(5):122-128.
- [8] 吴云燕,华中生,查勇. AHP 中群决策权重的确定与判

断矩阵的合并 [J]. 运筹与管理, 2003, 12(4):16-21.

- [9] 张杰,唐宏,苏凯,等. 效能评估方法研究 [M]. 北京:国防工业出版社, 2009.
- [10] 罗均平,于伟,李冬岩,等. 语言判断矩阵在确定多属性决策问题权重中的应用 [J]. 电光与控制, 2006, 13(1):102-104.