

基于ICA-TOPSIS法的空战威胁评估

彭明毓, 李战武, 杨爱武, 奚之飞, 方诚喆

(空军工程大学航空工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要:针对传统多属性决策方法进行空战威胁评估时难以解决指标耦合而导致评估偏差的问题,提出基于独立成分分析(ICA)和逼近理想解法(TOPSIS)的空战威胁评估方法。该方法通过借鉴盲源分离思想,引入独立成分分析法改进了传统的逼近理想解法,并通过采用独立成分分析中FastICA分离算法进行不同干扰状态下空战耦合的目标状态解耦,得到空战目标的独立状态估计,最终利用TOPSIS法得到空战中目标威胁度及其排序。仿真实验结果表明,经过ICA方法进行空战干扰下的耦合状态解耦处理,所得到的空战威胁度排序与理想的威胁度排序有较高的一致性,且与去指标相关性后的威胁度排序保持较高的相关性,验证了ICA方法在空战干扰环境下威胁评估的有效性和适用性。

关键词:目标威胁评估;关联性指标;盲源分离;独立成分分析;逼近理想解排序

中图分类号:V19

文献标识码:A

文章编号:1008-1194(2021)05-00113-09

An ICA-TOPSIS Based Air Combat Threat Assessment

PENG Mingyu, LI Zhanwu, YANG Aiwu, XI Zhifei, FANG Chengzhe

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

Abstract: In order to solve the problem of evaluation deviation caused by index coupling in traditional multi-attribute decision-making method for air combat threat assessment, an air combat threat assessment method based on the independent component analysis (ICA) and technology for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) was proposed. This method used for reference the idea of blind source separation (BSS), which introduces independent component analysis to improve the traditional approximate ideal method, and decoupled the target states of air combat coupling under different interference states by using FastICA separation algorithm in ICA theory, so as to obtain the independent state estimation of air combat targets. Finally, TOPSIS method was used to obtain the threat degree and ranking of targets in air combat. The simulation results showed that after the coupling state decoupling treatment under air combat interference by ICA method, the air combat threat degree ranking obtained was highly consistent with the ideal threat degree ranking, and maintained a high correlation with the threat degree ranking of the decorrelation index, which verified the effectiveness and applicability of ICA method in threat assessment under air combat interference environment.

Key words: target threat assessment; coupling index; blind source separation; independent component analysis; technique for order preference by similarity to ideal solution

0 引言

近些年来,空战的对抗模式伴随着智能化、信息化的发展而发展,尤其是新一代前沿技术的应用研究使得飞行员所面临的空情愈加复杂,同时在电磁环境的影响下,飞行员所能获得的空战目标状态信

息也愈加不充分。当下,信息“无所不至”的空战场景中,空战对抗逐渐向“瞬时对抗”转变,进而要求对抗短时且高效。而把握空战的态势进行实时、准确的空战威胁评估,则是战机夺取空战先机的关键。因而,信息化条件下,空战威胁评估在对抗中的地位愈加凸显。

威胁评估是空战对抗中的一个重要环节,吸引

* 收稿日期:2021-05-05

作者简介:彭明毓(1997—),男,福建泉州人,硕士研究生。

着众多学者进行深入研究。目前,常见的空战威胁评估方法主要分为两类:一类是基于参量模型的方法^[1-3],主要思想是通过完善目标态势评估的推理模型,同时可利用智能算法进一步优化,最终实现对目标威胁的评估,但此类方法对先验知识和参数的要求均较高,导致实时性不高;另一类是基于非参量模型的方法^[4-7],主要思想是通过目标态势评估模型或评估指标权重选取的优化与改进,进而实现客观威胁评估,此类方法较为简单且易实现,并通过优化权重,一定程度上能满足主客观性的要求。文献^[4]最先将 TOPSIS 法引入至空战中,实现对空战威胁的客观评估,但缺乏专家主观知识经验支撑;文献^[5]通过引入层次分析法构建组合赋权优化权重模型,对空战威胁进行主客观评估,但未考虑空战中的复杂耦合环境,即采用 TOPSIS 法的前提无法满足;文献^[6]引入粗糙集优化权重以降低主观性和先验知识需求的影响,但仍无法满足 TOPSIS 的前提。以上文献均未考虑复杂耦合指标下的空战环境。文献^[7]则针对耦合指标问题,提出灰色关联度模型修正耦合指标权重,实现耦合指标下的威胁评估,但仍难以解决耦合指标对 TOPSIS 理想解偏差的影响。上述文献均仅从优化权重进行分析考虑,未能从根本上解决指标耦合问题而存在结果偏差。

本文针对传统空战威胁评估方法存在的问题,提出基于 ICA-TOPSIS 的空战威胁评估方法。通过引入独立成分分析方法,采用 FastICA 算法对干扰耦合的空战目标状态数据进行分析,以解决耦合的空战指标下导致的威胁度偏差问题。仿真实验验证了方法的可行性。

1 独立成分分析与逼近理想解排序法

1.1 盲源分离——独立成分分析法

盲源分离(BBS)是指观测到一组相混合的信号,通过分离技术得到无法被直接观测的各个源信号独立成分。其运用的思想可以归纳为:寻找一个线性表示,使得该表示所对应的成分是统计独立的。关于盲源分离问题,大部分采用独立成分分析(ICA)的方法。

独立成分分析法是从多维统计数据中得到潜在因子或成分的分析方法^[8],最初为利用代数和 Gauss 统计量实现的方法^[9-10],后续演化成为一种综合利用统计、信息论、神经网络和优化方法等多门学科的新兴信号处理方法。而在空战的实际对抗过程中,目

标状态信息的获取也正是通过信息的传递与分析得到的,而混合(如与干扰信息混合)的目标不同状态信息分离则可通过 ICA 技术进行实现。如图 1 所示,假设有一组无法直接通过观测得到的信号源,进行如(1)所示的线性混合过程:

$$x(k) = As(k) + n(k) \quad (1)$$

式(1)中, $A \in \mathbb{R}^{M \times N}$ 为未知混合矩阵, $x(k)$ 为信号源混合得到的信号集合(可直接被观测), $n(k) = [n_1(k), n_2(k), \dots, n_m(k)]$ 为加性高斯白噪声,即干扰信号。由于信号经过混合与干扰,所被观测的信号 $x(k)$ 相对于源信号 $s(k)$ 是相互耦合关联的。

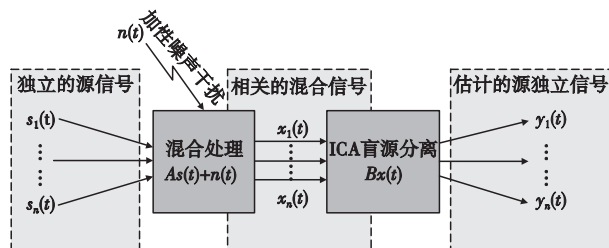


图 1 信号的混合与分离过程

Fig 1 The process of signals mixing and separating

为获得源数据的估计,引入分离矩阵 $B \in \mathbb{R}^{M \times N}$ 。通过不断调整分离矩阵 B 来得到一组估计值 $y(k) = [y_1(k), y_2(k), \dots, y_n(k)]$,且 $y(k)$ 由式(2)得到:

$$y(k) = Bs(k) \quad (2)$$

盲源分离的目的就是使得估计得到的 $y(k)$ 尽可能的接近源数据 $s(k)$ 。因此,分离矩阵 B 必须收敛于混合矩阵 A 的逆矩阵。由于数学上的限制,BBS 方法中还固有次序模糊和尺度模糊^[11]。这是因为,该方法中各个分量之间的排序以及尺度缩放是允许不尽相同的。因此,在本文的算法中,需要处理这些模糊以避免造成结果上的偏差。

在独立成分分析法中,有两种算法可用来处理多属性决策问题。一个算法是由 Cardoso 等人于 1993 年提出的联合逼近对角化特征矩阵(JADE)算法^[12]。该算法利用信号的自身特征,通过计算高斯累积量将盲源分离问题转化为特殊矩阵的对角化问题,最终得到源信号的独立性。JADE 算法由于通过矩阵的特征分解和联合对角化计算进行独立性估计,导致存储空间大,因此,尽管 JADE 算法有着解决独立性一致的源信号进行信息分离问题的优势,即估计更加准确,但不适宜直接用于多维度指标的空战威胁评估当中。

另一个是由芬兰学者 Aapo Hyvarinen 等人于

1997 年提出的 FastICA 算法^[13]。该算法使用峭度或者负熵来作为非高斯性度量,用以度量独立性。其中,峭度定义为一个随机变量的四阶累计量:

$$\text{kurt}(y) = E\{y^4\} - 3(E\{y^2\})^2 \quad (3)$$

通过峭度来判定变量间的独立性,最后通过峭度最大化以估计得到每个源信号。FastICA 将直接度量的独立性间接转化为非高斯性的度量,通过寻求基于独立性最大化的目标函数,采用不动点迭代算法对目标函数进行优化,得到解混合矩阵的最佳估计以实现混合信号的分离。基于 FastICA 的分离算法能够快速的收敛,且算法中没有学习速度或其他大量的需调参数,实时性较高,符合空战的实际情况。

在博弈性空战对抗过程中,实时获取目标真实状态信息是占据空战主动的关键。然而,战场环境的复杂性以及多机协同干扰掩护等导致载机获取的信息并不准确,因此,基于 ICA 的盲源分离技术,通过数据驱动,可进一步分析所获数据的潜在价值。在空战目标威胁评估当中,所获目标数据的耦合性将一定程度上造成评估的偏差,从而影响飞行员的决策。为获得准确的空战威胁态势评估,需要对所获得的目标数据进行解耦,而 ICA 技术正适用于该解耦问题。如图 2 所示,可引入信号分离处理的 ICA 技术对载机传感器所获得的数据加以解耦。同时,为实现较快的收敛效果和鲁棒性,本文采用了 FastICA 算法,对得到的目标独立威胁指标值进行分离估计。

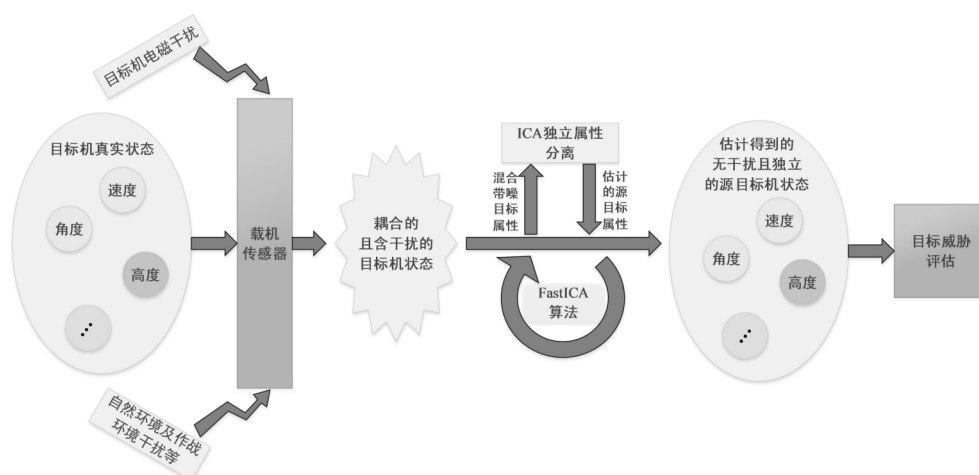


图 2 基于 ICA 的目标状态信息解耦

Fig. 2 Targets state information decoupling based on ICA

1.2 方案优劣排序——逼近理想解法

传统的 TOPSIS 算法是基于计算方案与正负理想解之间的欧里几德距离^[14],从而将接近度最小的方案判定为最劣方案,反之为最优方案。同时,通过接近度大小可对备选方案进行优劣排序。限于篇幅, TOPSIS 的计算流程及公式可参考文献^[4]。

传统的 TOPSIS 可对独立属性下目标方案的优劣进行排序,然而在复杂环境的空战下,载机所获得的目标状态属性间将不再满足独立性的基本前提。此时, TOPSIS 法所计算的欧式距离将包含冗余的信息,进而导致目标威胁度的偏差。因此,为去除冗余的信息,改进的 TOPSIS-M 法引入了二阶统计量——协方差,来考虑两个多维随机变量之间存在的相关性,即引入关联性度量 Σ :

$$\Sigma = E\{(U - E(U))(U - E(U))^T\} \quad (4)$$

式(4)中, U 为已标准化的评估矩阵。同时,其采用马氏距离^[15]来代替欧氏距离以度量每个方案与正负理想解之间的距离。马氏距离 DM 定义如下:

$$DM = \sqrt{(u - u^\pm)^T \Lambda^{-1} \Sigma^{-1} \Lambda (u - u^\pm)}$$

式(5)中, u 为相同指标下不同的目标状态组成的列向量; u^\pm 为不同指标下的正负理想解^[4]; Λ 为指标对应权重 ω 构成的对角矩阵,即 $\Lambda = \text{diag}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M)$; Σ 为关联性度量,即协方差矩阵。

TOPSIS-M 算法通过引入协方差矩阵消除了属性之间的关联性,并以马氏距离作为度量方式,但在确定正负理想解时,仍是以混合后的耦合数据确定的。因此, TOPSIS-M 方法得不到针对原有的独立属性的准确目标理想解,最终可能导致所得到的距离仍离理想解较远。基于 ICA-TOPSIS 的方法就可解决这个理想解的偏差问题,同时,将耦合指标进行解耦分

析,得到的独立属性更适合作为 TOPSIS 的输入。

2 基于 ICA-TOPSIS 的空战威胁评估

2.1 空战目标威胁评估指标体系建立

随着空战武器装备的集成与发展,先进战机的隐身、攻击、机动、干扰等性能不断地提升以及愈加复杂的作战环境,导致载机获取目标状态信息难度增大,进而产生空战威胁评估结果的偏差。空战威胁评估所涉及的指标众多^[3],因此,在进行相应的评估前,需要确定具有代表性且能够提供反映目标威胁信息的关键指标。综合考虑各项因素,仿真实验中主要分析目标的空间态势、空战能力以及作战意图指

标,如图 3 所示。限于文章篇幅,各威胁指标具体的计算公式不再赘述,可参考文献^[7,16—21]。

本文所考虑的空战态势指标包含速度、隐身、角度、距离等 4 个威胁因子,通过空战目标的速度、角度、RCS、距离等信息代入文献^[7,17—20]的威胁模型中即可得到;对目标的空战能力指标,文献^[16]依据相对参数衡量作战飞机的能力,以现代战机先进指标或标准值为基准,采用幂数作为作战能力指数,且针对空战目标的机动性、火力、探测能力、操作效能、生存力、航程和电子对抗能力,采用对数法构建最终得到空战能力指数威胁因子;对目标作战意图指标,文献^[21]通过给定不同的作战意图得分对应得到作战意图威胁因子。

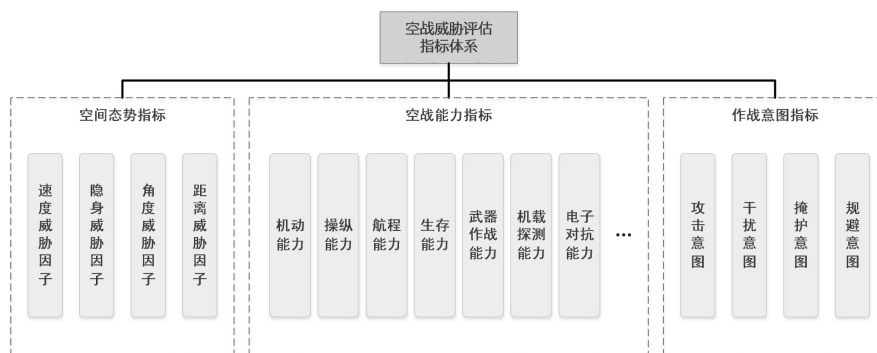


图 3 空战威胁评估指标体系

Fig. 3 Threat assessment index system for air combat

2.2 ICA-TOPSIS 法威胁评估

针对空战威胁指标属性间存在的关联性问题,ICA-TOPSIS 方法通过独立性估计解决该问题,其威胁评估过程如图 4 所示。首先建立 ICA 估计模型

以估计出所观测威胁属性的独立隐属性;接着对估计得到的数据进行处理,避免次序模糊和尺度模糊;最后将调整后的隐属性和权重作为 TOPSIS 的输入,利用 TOPSIS 法进一步得到目标威胁等级排序。

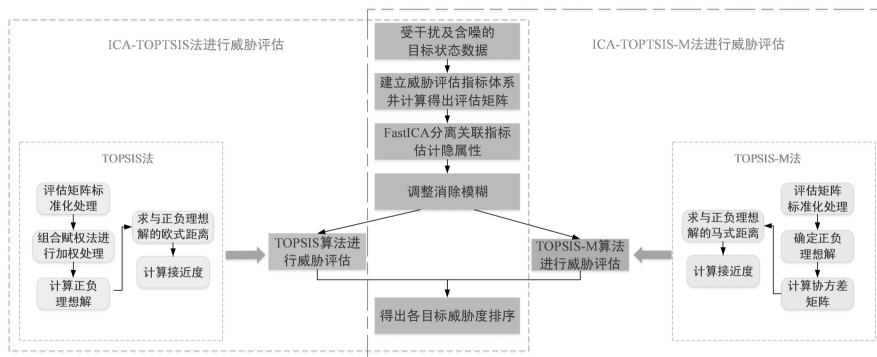


图 4 空战威胁评估流程

Fig. 4 Air combat threat assessment process

具体的步骤如下:

1) 估计独立的隐属性。在观测得到的威胁指标数据 V 上(关系矩阵为 A),应用独立成分分析法估

计独立的隐属性 \hat{L} ;

2) 调整隐属性。对估计的关系矩阵 \hat{A} 以及隐属性 \hat{L} 进行调整以避免次序或尺度模糊;

3) 运用 TOPSIS 法进行评估。把独立隐属性 \hat{L} 以及通过组合赋权法^[22] 得到的各指标权重 W 作为 TOPSIS 法的输入,得到每个威胁指标的接近度 γ ;

4) 对威胁目标进行排序。通过计算得到的接近度 γ ,对目标的威胁度进行排序。

如图 2 所示,空战过程中,载机所想获取的目标的各个指标属性值 $s(t)$ 是相互独立的,但由于传感器所接收的信号可能受到干扰或信号相互叠加,导致载机最终所能观测到的是相关联的属性 $x(t)$ 。为能准确地进行 TOPSIS 威胁评估,采用 ICA 技术估计独立属性 $y(t) \approx s(t)$ 。

如第 1 章所述,ICA 方法估计结果可能存在次序模糊或者尺度模糊,为此,本文考虑主要指标为正的且所占的信息量最大,即其余指标所带来的影响不占主要信息成分,以便在进行 TOPSIS 法评估前,可通过调整关系矩阵 \hat{A} 和 \hat{L} ,解决 ICA 技术的模糊问题。调整过程如下:

1) 置换

对估计的关系矩阵 \hat{A} 的第一行,找到绝对值最大的列 j ,将 \hat{A} 的第一列和第 j 列置换,其他行均重复此过程。对观测得到的指标矩阵 V ,应满足:

$$V = \hat{A}\hat{L} \quad (6)$$

为确保式(6)的等式关系,对估计的独立隐属性 \hat{L} 第一行及第 j 行进行置换。其他列均重复此过程,得到调整矩阵 \hat{A}_1 和 \hat{L}_1 。

2) 反转

若 \hat{A}_1 的对角线元素 \hat{a}_{1i} 小于 0,则将 \hat{a}_{1i} 同一列的元素均乘以 -1 反转。同时,为确保满足式(6)的关系,对于 1) 调整后的独立隐属性矩阵 \hat{L}_1 的每一行进行相应反转,最终得到完成调整过程的 \hat{A}_2 与 \hat{L}_2 。而对于负指标值导致的尺度模糊问题,在 TOPSIS 的第一步规范化处理就可被解决。

通过上述两个步骤的调整,ICA 方法估计得到的隐属性 \hat{L}_2 作为 TOPSIS 法的输入,可以得到更加准确的理想解 PIA 与 NIA。最后,计算每个威胁距离理想解的距离,得到相应的接近度量,最终得到目标的威胁度排序。

3 空战实例分析

3.1 空战对抗过程想定

假设我方战机在空域中遭遇敌方 4 架战机,分别为 F-16C、F-15C、F-5G 三种机型。在某一时刻,我方战机与目标线之间的夹角为 20° ,飞行速度为

300 m/s,导弹的最大射程为 80 km,雷达的最大作用距离为 140 km,RCS 为 6 m^2 ,门限 RCS 为 2 m^2 。通过文献[16]中公式的计算,求得敌方 4 架 3 种机型战机的空战能力指数分别为 16.8、14.4、13.4,其对应 RCS 分别为 4.9、11.3、5.5,且所携带的空空导弹的最大作用距离为 100、60 和 70 km,雷达最大作用距离为 130、160、120 km。某一时刻各敌机的部分空战状态可参考文献[21],如表 1 所示。

表 1 敌机某一时刻的空战状态

Tab 1 Air combat status of enemy at a certain moment

编号	机型	作战意图	$q_T/$ ($^\circ$)	$q_1/$ ($^\circ$)	$D/$ km	$V_T/$ (m/s)
1	F-16C	攻击	80	-45	80	300
2	F-16C	掩护	45	-45	110	325
3	F-15C	干扰	-45	15	70	330
4	F-5G	攻击	-60	80	85	320

注: q_T 为目标航向与目标线的夹角; q_1 为载机航向与目标线的夹角(规定目标线右偏航向为正,左偏航向为负); D 为目标与我方战机的距离; V_T 为目标速度。

3.2 基于 ICA-TOPSIS 的各目标威胁度计算

根据 3.1 节的作战想定,代入威胁指标因子计算公式^[7,16-21],得到各目标威胁因子值,如表 2 所示。

表 2 各目标的威胁因子值

Tab 2 Threat factors value of each targets

编号	T_c	T_a	T_d	T_v	T_y	T_i
1	1	0.347 2	0.569 2	0.5	0.231 8	0.8
2	1	0.25	0.342 9	0.466 7	0.139 6	0.3
3	0.879 1	0.166 7	0.28	0.566 7	0.258 7	0.5
4	0.818 1	0.388 9	0.276 9	0.6	0.126 4	0.8

注: T_c 为空战能力综合威胁因子; T_a 为角度威胁因子; T_d 为距离威胁因子; T_v 为速度威胁因子; T_y 为隐身威胁因子; T_i 为作战意图威胁因子。

由表 2 得到评估的决策矩阵 V 为:

$$V = \begin{bmatrix} 1 & 0.347 2 & 0.569 2 & 0.5 & 0.231 8 & 0.8 \\ 1 & 0.25 & 0.342 9 & 0.466 7 & 0.139 6 & 0.3 \\ 0.879 1 & 0.166 7 & 0.28 & 0.566 7 & 0.258 7 & 0.5 \\ 0.818 1 & 0.388 9 & 0.276 9 & 0.6 & 0.126 4 & 0.8 \end{bmatrix}$$

通过层次分析法,可得到各指标的主观权重为:

$$W_s = [0.394 5, 0.051 7, 0.079 9, 0.158 4, 0.243 5, 0.072 0]$$

FastICA 方法对由 6 个源独立指标构成的决策矩阵 V 进行独立指标分离,得到独立决策矩阵 \hat{L} 为:

$$\hat{\mathbf{L}} = \begin{bmatrix} -0.953\ 8 & -0.635\ 8 & 0.575\ 0 & -1.078\ 8 & 1.052\ 0 & 1.041\ 5 \\ -0.567\ 4 & 1.271\ 6 & 1.134\ 3 & -0.727\ 1 & -1.116\ 1 & 0.004\ 7 \\ -1.107\ 1 & 0.064\ 3 & -0.621\ 9 & 1.124\ 3 & -0.723\ 0 & 1.263\ 5 \\ 1.297\ 8 & -0.657\ 6 & -0.075\ 6 & -0.689\ 5 & -1.031\ 7 & 1.156\ 6 \end{bmatrix}$$

此时,FactICA 所估计的关系矩阵 $\hat{\mathbf{A}}$ 为:

$$\hat{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} 0.403\ 0 & -0.293\ 2 & -0.848\ 3 & -0.178\ 9 \\ -0.335\ 4 & -0.108\ 0 & -0.308\ 3 & 0.883\ 6 \\ -0.830\ 1 & -0.304\ 7 & -0.200\ 0 & -0.422\ 1 \\ 0.190\ 0 & -0.899\ 7 & 0.381\ 2 & 0.095\ 2 \end{bmatrix}$$

主观权重处理独立决策矩阵得到 $\hat{\mathbf{L}}_{\text{sub}}$:

$$\hat{\mathbf{L}}_{\text{sub}} = \begin{bmatrix} -0.338\ 5 & 0.051\ 0 & 0.061\ 3 & -0.167\ 7 & -0.195\ 8 & 0.069\ 7 \\ -0.309\ 7 & 0.011\ 3 & 0.080\ 2 & -0.080\ 5 & 0.310\ 0 & -0.086\ 9 \\ -0.477\ 8 & 0.058\ 5 & -0.088\ 4 & 0.154\ 9 & 0.065\ 2 & -0.004\ 3 \\ 0.377\ 9 & 0.065\ 3 & 0.002\ 9 & -0.010\ 1 & -0.220\ 5 & -0.092\ 8 \end{bmatrix}$$

由于存在尺度模糊和排序模糊,对 $\hat{\mathbf{L}}_{\text{sub}}$ 和 $\hat{\mathbf{A}}$ 进行 2.2 节所述的调整过程,得到调整后的决策矩阵 $\hat{\mathbf{L}}_{2\text{sub}}$ 和关系矩阵 $\hat{\mathbf{A}}_2$ 为:

$$\hat{\mathbf{L}}_{2\text{sub}} = \begin{bmatrix} 1.211\ 3 & -1.131\ 2 & 1.105\ 7 & -0.977\ 4 & -0.267\ 8 & -0.059\ 5 \\ 0.958\ 0 & 1.263\ 3 & 0.036\ 7 & -0.063\ 5 & -0.905\ 8 & -1.288\ 6 \\ 0.858\ 0 & -0.986\ 1 & -0.766\ 5 & 1.058\ 4 & 0.804\ 1 & -0.968\ 0 \\ 0.780\ 6 & -0.218\ 9 & -1.003\ 5 & 0.507\ 9 & -1.273\ 2 & 1.207\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\hat{\mathbf{A}}_2 = \begin{bmatrix} 0.848\ 3 & -0.178\ 9 & -0.4030 & 0.293\ 2 \\ 0.308\ 3 & 0.883\ 9 & 0.335\ 4 & 0.108\ 0 \\ 0.200\ 0 & -0.422\ 1 & 0.830\ 1 & 0.304\ 7 \\ -0.381\ 2 & 0.095\ 2 & -0.190\ 0 & 0.899\ 7 \end{bmatrix}$$

由熵权法确定决策矩阵 $\hat{\mathbf{L}}_{\text{sub}}$ 的客观权重为:

$$\mathbf{W}_0 = [0.014\ 5 \quad 0.133\ 8 \quad 0.252\ 1 \quad 0.250\ 3 \quad 0.115\ 0 \quad 0.234\ 1]$$

最后通过 TOPSIS 法,得到各目标的接近度为:

$$\gamma = [0.473\ 2 \quad 0.407\ 4 \quad 0.471\ 2 \quad 0.509\ 2]$$

从而得到目标威胁的威胁度排序为: $4 > 1 > 3 > 2$ 。ICA-TOPSIS 的结果与 TOPSIS、TOPSIS-M 的结果对比如表 3 所示。

表 3 各算法的威胁评估结果

Tab 3 Evaluation results of each algorithm

目标编号	接近度			目标威胁度排序		
	TOP SIS	TOP SIS-M	ICA-TOP SIS	TOP SIS	TOP SIS-M	ICA-TOP SIS
1	0.891 1	0.838 6	0.473 2	1	1	4
2	0.185 1	0.012 7	0.407 4	4	4	1
3	0.385 6	0.122 6	0.471 2	3	3	3
4	0.567 7	0.169 6	0.509 2	2	2	2

如表 3 所示,本文提出算法得到的威胁结果排序与传统算法结果排序不一致。事实上,由于在获取信息耦合度较强的情况下,采用原耦合数据计算的威胁因子存在偏差较大,进而结果不一致。后续仿真中将进一步做干扰耦合下威胁度偏差分析。

4 仿真对比分析

通过第 3 章的实例分析,ICA 技术用于空战目标威胁评估能够得出较合理的目标威胁等级排序。为进一步对该算法进行仿真验证,采用反向验证法,即在特定条件下一部分独立的威胁评估指标,通过某一关系进行耦合,得到耦合的威胁指标,再通过 ICA 技术进行相应的分离,验证其准确性。同时对比基于耦合性指标下 TOPSIS 法、TOPSIS-M 法的威

胁评估结果。

在忽略机身构造所造成的不同角度可能影响飞行速度,可认为角度因素和速度之间不存在耦合关系,即角度威胁和速度威胁两个评估指标可视为相互独立。同时,忽略因飞机的各器件故障因素造成某些性能的影响,如机动性能间接影响到飞机的角度和速度能力,而间接影响目标到速度威胁和角度威胁,即可认为空战能力威胁与角度威胁、速度威胁三个指标是相互独立的评估指标。为简便计算以及有效说明问题,本文仅选取以上指标进行相应的威胁评估,同时,选取 25 个不同时刻目标数据进行分析,对比其他算法在威胁评估中的结果。

4.1 目标数据的处理及权重、混合矩阵的确定

选取 25 个连续或不连续时间点目标的角度、速度值,计算相应的三个威胁评估指标值,并通过组合赋权法获得相应的权重。

此时,所得到的角度、速度、空战能力都是独立的,而实际观测到的数据往往是相互耦合关联的,因此,利用混合矩阵进行混合,生成相互耦合的数据。针对空战过程中,干扰对真实数据影响反映为目标状态值的偏差,因此,混合矩阵 A 可设为:

$$A = \begin{bmatrix} 1.00 & -0.60 & -0.66 \\ 0.59 & 1.00 & -0.10 \\ 0.30 & 0.38 & 1.00 \end{bmatrix} \quad (7)$$

同时,在真实的对抗过程中,我方获得的数据往往受到敌方及电磁环境的干扰,即获得的数据含有

噪声。因此,考虑不同的信噪比对评估的影响,信噪比定义如下:

$$SNR = 10 \lg \frac{\sigma_{\text{real}}^2}{\sigma_{\text{noise}}^2} \quad (8)$$

式(8)中, σ_{real}^2 为真实独立的源信号功率, σ_{noise}^2 为噪声功率,取值范围为 $(0, 50]$ 。

4.2 算法对比分析

考虑到最初假定角度、速度及空战能力数据独立,因此,将得到的决策矩阵用作 TOPSIS 输入,其所得到的结果可认为是准确理想的,后续的对比将此结果视为真实理想的结果。仿真实验将通过混合矩阵 A 混合得到的决策矩阵作为 TOPSIS、TOPSIS-M、ICA-TOPSIS 输入,所得到的各结果利用评价指标与真实理想的排序结果进行对比分析。

在不同的干扰等级下,所获得的目标真实状态存在偏差,最终导致空战威胁因子的偏差。在仿真实验中,分析不同干扰等级下对目标威胁度的影响。进而分析,在不同干扰情况下,目标信息获取的偏差所导致目标威胁评估的偏差程度,如表 4 所示。

在干扰情况下,由于获取目标的信息含有干扰造成威胁因子的偏差,最终导致威胁度偏差。其中,在干扰等级较强的情况下,目标的威胁度与真实的目标威胁度差距较大;在低干扰情况下,目标威胁度与真实的威胁度接近,所得的目标威胁排序也保持一致。由此说明在干扰的情况下,若对信息不加以处理,则影响空战威胁评估结果。

表 4 某一时刻在部分干扰等级下,目标的威胁度及排序

Tab 4 Threat degree and ranking of targets at certain time under partial interference levels

SNR/dB	目标威胁度				目标威胁排序			
	目标 1	目标 2	目标 3	目标 4	目标 1	目标 2	目标 3	目标 4
5	0.070 7	0.444 5	0.346 9	0.877 5	4	2	3	1
10	0.371 6	0.109 9	0.331 0	0.628 4	2	4	3	1
15	0.349 8	0.298 0	0.126 1	0.650 2	2	3	4	1
20	0.376 4	0.343 1	0.540 2	0.623 6	3	4	2	1
25	0.398 5	0.724 8	0.076 3	0.518 4	3	1	4	2
30	0.750 9	0.405 7	0.215 3	0.542 4	1	3	4	2
35	0.571 9	0.423 9	0.119 8	0.428 1	1	3	4	2
40	0.680 7	0.612 4	0.159 3	0.319 3	1	2	4	3
45	0.746 2	0.487 7	0.148 5	0.287 1	1	2	4	3
50	0.764 4	0.521 8	0.165 7	0.248 6	1	2	4	3
无干扰下	0.770 3	0.509 8	0.156 0	0.238 9	1	2	4	3

对于多属性决策的评价,本文采用评价指标——Kendall^[23]和 Spearman^[24]等级相关系数。两个指标主要用以统计测量两个随机变量相关性的统计值。当输入为两个排列时,反映两个排列的相似程度,其具体计算公式分别为:

$$\tau = \frac{N_c - N_d}{M(M-1)/2} \quad (9)$$

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (10)$$

式(9)、式(10)中, $\tau, \rho \in [-1, 1]$, N_c 为两个排序中排名相同的数量, N_d 为两个排序中排名不同的数量, M 为目标总数, d_i 为两个排序的等级差。当 $\tau = 1$ 时,说明两个目标的威胁度排序是一致的;当 $\tau = -1$ 时,说明两个排序是不一致的;当 $\tau = 0$ 时,说明两个目标威胁度之间相互独立。Spearman 系数类似, ρ 值越接近 1, 两个排序则越接近。

对 4 个目标的 25 组不同时刻数据仿真,最终得到 4 个目标在 TOPSIS、TOPSIS-M、ICA-TOPSIS 算法下不同信噪比下的目标威胁度排序,并均与独立无干扰指标下的 TOPSIS 威胁排序进行 Kendall 一致性和 Spearman 相关性系数对比分析,如图 5 和图 6 所示。在不同的干扰环境下,与真实理想的目标威胁排序结果进行一致性和相关性分析,可以得到在中低干扰的环境中 ($\text{SNR} > 16 \text{ dB}$),基于 ICA-TOPSIS 的目标威胁排序结果相比其他算法与真实理想的排序结果明显保持较优的一致性和相关性,即其结果更靠近理想的结果。而在强干扰的情况下 ($\text{SNR} < 16 \text{ dB}$),其目标威胁排序的结果一致性略低于其他算法。这是由于在空战环境中,低幅度目标状态信号受到目标的强干扰下,不同信号的混合由于强噪声的影响,无法通过数据的统计特性估计其源成分,但其结果与 TOPSIS、TOPSIS-M 算法的差距并不大。

同时,基于 ICA 分离的仿真结果表明:基于 ICA-TOPSIS-M 的排序结果与 ICA-TOPSIS 的排序结果基本吻合(如图 6 所示的两个算法的 Spearman 相关性系数曲线基本重合)。这说明仅经过 ICA 的分离,就能获取接近不相关指标信息。为此,仿真中还通过 ICA-TOPSIS 与 ICA-TOPSIS-M、TOPSIS 的威胁评估结果的相关性检验,进一步验证了 ICA 算法在威胁评估中能对目标进行更加精准地威胁分析。如图 7 所示,ICA-TOPSIS 与

ICA-TOPSIS-M 的相关性基本保持接近于 1,而与未经过 ICA 分离,即输入为耦合指标的 TOPSIS 算法则保持较低的相关性,由此说明,ICA 有较优的解耦能力。

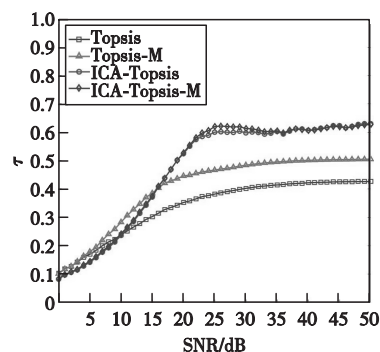


图 5 四种算法在不同噪声等级干扰下的威胁排序一致性比较

Fig 5 Comparison of targets ranking consistency of four algorithms under different SNR

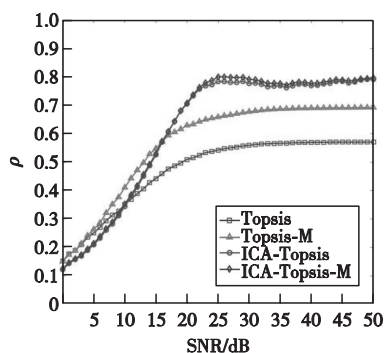


图 6 四种算法在不同噪声等级干扰下的威胁排序相关性比较

Fig 6 Comparison of targets ranking correlation of four algorithms under different SNR

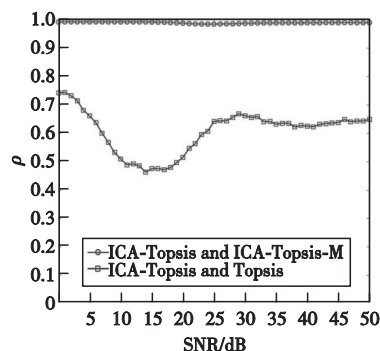


图 7 ICA-TOPSIS 结果的相关性检验

Fig 7 Correlation test of ICA-TOPSIS results

5 结论

本文提出基于 ICA-TOPSIS 的空战威胁评估方法。该方法通过 ICA 方法进行空战干扰环境下耦合状态解耦,得到源目标独立状态的估计,用以解决传统的多属性决策算法在耦合空战状态下存在的理想解偏移而导致的威胁偏差问题。仿真实验结果表明:

1) 在传统的 TOPSIS 基础上,引入 ICA 算法进行耦合性指标的独立性估计,所得威胁度排序与理想威胁排序有较优的一致性,较好地解决了传统算法的理想解偏移问题;

2) 本文采用 FastICA 算法进行独立评估指标的估计,能够快速地实现独立状态估计,同时所得到的目标威胁度排序与经过 TOPSIS-M 去指标相关性的威胁度排序保持高相关性,进一步验证了 ICA 的独立估计能力;

3) 针对不同干扰程度下的空战环境仿真,ICA-TOPSIS 法相对传统的评估方法,在中低干扰环境下能保持较优的表现;在强干扰下能与传统算法保持相当的表现,进一步验证了 ICA 方法在空战环境下的适用性。

参考文献:

- [1] 严建钢,韩玉龙,高武,等. 基于贝叶斯反馈云模型的空战目标威胁评估[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(8): 137-141.
- [2] 高阳阳,余敏建,王子博琳. 基于云模型和改进熵权的空战多目标威胁等级评估[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(9): 35-39.
- [3] 杨爱武,李战武,徐安,等. 基于加权动态云贝叶斯网络空战目标威胁评估[J]. 飞行力学, 2020, 38(4): 87-94.
- [4] 张堃,周德云. 基于熵的 TOPSIS 法空战多目标威胁评估[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(9): 1493-1495.
- [5] 郝英好,张永利,雷川,等. 基于组合赋权-TOPSIS 法的空战目标威胁评估仿真[J]. 战术导弹技术, 2015(5): 103-108.
- [6] 杨远志,于雷,周中良,等. 基于 RS-TOPSIS 的空战目标威胁评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(5): 1001-1007.
- [7] 奚之飞,徐安,寇英信,等. 基于改进 GRA-TOPSIS 的空战威胁评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(2): 388-397.
- [8] Chien J T. Independent component analysis[J]. Source Separation and Machine Learning, 2019:99-160.
- [9] Cardoso J F. High-order contrasts for independent signals[C]// Workshop on Higher-Order Spectral Analysis, Vail. Colorado: IEEE Press, 1989:256-370.
- [10] Jutten C, Herault J, Coinon P, et al. Blind separation of sources[J]. Signal Processing, 1991, 24(1):11-20.
- [11] Comon P, Jutten C. Handbook of blind source separation, independent component analysis and applications [M]. Oxford: Academic Press, 2010:227-276.
- [12] Hyvärinen A, Oja E. A fast fixed-point algorithm for independent component analysis[J]. Neural Computation, 1997, 9(7):1483-1492.
- [13] Cardoso J F, Souloumiac A. Blind beamforming for non gaussian signals [J]. IEE Proc -F, 1993, 140(6): 362-370.
- [14] Hwang C L, Yoon K. Multiple attribute decision making methods and applications[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1981: 69-76.
- [15] Maesschalck R D, Jouan-Rimbaud D, Massart D L. The mahalanobis distance[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2000, 50(1):1-18.
- [16] 朱宝鑫,朱荣昌,熊笑非. 作战飞机效能评估[M]. 第2版. 北京:航空工业出版社, 2006:50-63.
- [17] 董彦非,郭基联,张恒喜. 多机空战目标威胁评估算法[J]. 火力与指挥控制, 2002, 27(4):73-76.
- [18] 郭辉,徐浩军,刘凌. 基于区间数 TOPSIS 法的空战目标威胁评估[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(12): 2914-2917.
- [19] 奚之飞,徐安,寇英信,等. 基于 PCA-MPSO-ELM 的空战目标威胁评估[J]. 航空学报, 2020, 41(9):1-21.
- [20] 张涛,周中良,苟新禹,等. 基于信息熵和 TOPSIS 法的目标威胁评估及排序[J]. 电光与控制, 2012, 19(11): 35-38.
- [21] 杨爱武,李战武,徐安,等. 基于 RS-CRITIC 的空战目标威胁评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(12):2357-2365.
- [22] 张延风,刘建书,张士峰. 基于层次分析法和熵值法的目标多属性威胁评估[J]. 弹箭与制导学报, 2019, 39(2): 163-165.
- [23] Ewa Roszkowska, Tomasz Wachowicz. The impact of decision-making profiles on the consistency of rankings obtained by means of selected. Multiple Criteria Decision-Aiding Methods[J]. Econometrics, 2019, 23(2):1-14.
- [24] 苏丽敏,何慧爽. 基于区间数的 Spearman 秩相关系数的多属性决策方法[J]. 统计与决策, 2019, 35(6):51-53.