

## 基于模糊决策的激光威胁源识别方法\*

孙中涛<sup>1</sup>,程玉宝<sup>1</sup>,高春颖<sup>2</sup>

(1.电子工程学院 501 教研室,安徽 合肥 230037;2.电子工程学院 601 教研室,安徽 合肥 230037)

**摘要:**激光威胁源识别是激光告警数据处理的一个重要方面,识别方法直接影响着识别结果的准确性。基于激光信号各技术参数在表明威胁源时都具有一些模糊性的特点,提出了一种基于模糊决策的激光威胁源识别方法。通过运用模糊决策理论,建立了激光能量、波长、重频等技术参数的模糊化数学模型和激光威胁源识别的模糊决策规则库,设计出模糊决策专家系统。在激光告警系统使用不同类型传感器,获得激光波长、重频和脉冲特性等技术参数后,可借助此模糊决策专家系统,判明激光威胁源的类型。仿真结果表明:该方法能够准确快捷地实现激光威胁源的识别,具有一定的应用价值,且可为激光告警的其他数据融合研究提供参考。

**关键词:**激光技术; 模糊决策; 数据融合; 威胁源识别

**中图分类号:** TN977 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)06-0641-05

## Laser menaces identifying based on fuzzy decision\*

SUN Zhong-tao<sup>1</sup>, CHENG Yu-bao<sup>1</sup>, GAO Chun-ying<sup>2</sup>

(1.501 Staff Room, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China;

2.601 Staff Room, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

**Abstract:** Identification of laser menaces is an important aspect in laser warning and data disposing. The identifying method has direct effect on its veracity. Based on the fact that technique parameters of laser signal have some fuzzy characters in presenting menaces, a method of identifying laser menaces based on fuzzy decision is presented. The fuzzication mathematical models of laser technique parameters such as laser energy, wavelength, repeat frequency, and fuzzy decision rules library of identifying laser menaces are built, which are set up by using fuzzy decision theory. Professional system of fuzzy decision is designed. Using different kinds of sensors in the laser warning system, parameters such as laser orientation, wavelength, repeat frequency, and characteristic of pulse are acquired. In virtue of the professional system of fuzzy decision, the type of the laser menaces is identified. Simulation result shows that the method can exactly identify the laser menaces, and has some practical value. The method can offer references for the study on the other data fusion of laser warning.

**Key words:** Laser technology; Fuzzy decision; Data fusion; Menace identifying

收稿日期:2005-05-22; 修订日期:2005-06-10

\* 基金项目:国防预研基金资助项目

作者简介:孙中涛(1974-),女,安徽萧县人,讲师,硕士,主要从事光电对抗及大气激光传输方面的研究。

## 0 引言

激光武器作为现代战场的杀手锏正越来越多地投入使用,实际战场上敌方激光威胁源是不一样的,作为激光对抗的第一要务,就是对来袭激光武器迅速、正确告警。正在研制的高性能激光告警器借助多个不同类型的传感器,在进行激光威胁源识别时,实现激光信号的方位、波长、重频和脉冲特性等技术参数的探测,然后借助专家决策系统对获得的技术参数进行数据融合,判明激光威胁源的类型,达到正确对抗的目的。这将是未来激光告警器数据处理的一个重要方面,也是今后的发展方向。激光武器各个技术参数都具有一定的模糊度,如激光辐射能量高、重频低等,都没有明确的内涵与外延,不能简单地用“是”或“否”来回答,只能用模糊集合来描述。所以,本文以模糊决策理论为基础,着重对激光告警器在威胁源识别这一级进行数据融合技术研究。

## 1 激光威胁源识别模糊决策系统的组成

激光告警器使用模糊决策系统对敌方激光威胁源进行识别。该系统一般由三部分组成<sup>[1]</sup>,如图 1 所示。模糊器是将精确量转化为模糊量;模糊规则即为模糊决策,是关于输入与输出的模糊关系;解模糊器是把模糊决策所得到的模糊量转换为精确量。这三部分均由软件编程实现。

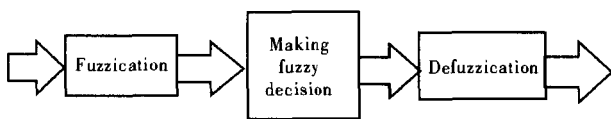


图 1 模糊决策系统基本框图

Fig.1 Diagram of fuzzy decision system

### 1.1 模糊决策系统常用的两种模糊器<sup>[1-6]</sup>

#### (1) 单值模糊器

单值模糊器是将一实值点  $x^* \in U$  映射成  $U$  上的模糊单值  $A'$ ,  $A'$  在点  $x^*$  的隶属度值为 1, 在  $U$  中其他所有点上的隶属度值为 0, 即:

$$\mu_{A'}(x) = \begin{cases} 1 & x = x^* \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

#### (2) 梯形隶属度函数模糊器

梯形隶属度函数的定义是:令  $[a, d] \subset R$ , 模糊集  $A$  的隶属度函数是  $R$  上的一个连续函数, 即:

$$\mu_A(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & c \leq x \leq d \\ 0 & d \leq x \end{cases} \quad (2)$$

式中  $a \leq b \leq c \leq d$ 。梯形隶属度函数可简单地记为  $\mu_A(x; a, b, c, d)$ 。

### 1.2 模糊规则<sup>[1,4]</sup>

许多模糊规则组成模糊规则库,它是模糊决策系统的核心,系统的其他组成部分都是以一种合理而有效的方式来执行这些规则的。

模糊规则用 IF-THEN 来表示, 如用 IF<FP1> THEN<FP2>来表示一条模糊规则, FP1 和 FP2 都是模糊命题。模糊命题有子模糊命题和复合模糊命题两类。对于模糊规则 IF<FP1> THEN<FP2>的解释常用的模糊蕴含关系(模糊算子)有布尔运算, 算术运算, 最大、最小运算, 最小运算, 代数积运算等:

#### (1) 布尔运算

$$\mu_{Q_b}(x, y) = \max[1 - \mu_{FP1}(x), \mu_{FP2}(y)] \quad (3)$$

#### (2) 算术运算

$$\mu_{Q_c}(x, y) = \min[1, 1 - \mu_{FP1}(x) + \mu_{FP2}(y)] \quad (4)$$

#### (3) 最大、最小运算

$$\mu_{Q_d}(x, y) = \max[\min(\mu_{FP1}(x), \mu_{FP2}(y)), 1 - \mu_{FP1}(x)] \quad (5)$$

#### (4) 最小运算

$$\mu_{Q_m}(x, y) = \min(\mu_{FP1}(x), \mu_{FP2}(y)) \quad (6)$$

#### (5) 代数积运算

$$\mu_{Q_w}(x, y) = \mu_{FP1}(x) \mu_{FP2}(y) \quad (7)$$

### 1.3 解模糊器<sup>[1,4]</sup>

解模糊器用来确定一个最能代表模糊决策所得到的模糊量的点。常用的解模糊器有重心解模糊器、中心平均解模糊器、最大值解模糊器。重心解模糊器

对计算要求高,使用较少。中心平均解模糊器计算简便,直观合理,是最好的解模糊器。最大值解模糊器计算最简便,使用较多,但模糊集的微小变化可能会造成映射点的很大变化。

## 2 激光威胁源识别的模糊决策模型

为提高反应速度,减少运算量,提出了一种简化且易于实现的激光威胁源识别的模糊决策参考模型。

### 2.1 激光威胁源典型参数

现代战场的激光威胁源多种多样,其主要装备的形式是激光测距机、激光目标指示器、激光雷达、激光低能武器(包括激光致盲武器)和激光高能武器。主要军用激光系统的典型参数如表 1 所示<sup>[7-10]</sup>。

表 1 军用激光系统的典型参数

Tab.1 Typical parameters of military laser systems

Technical parameters	Wavelength / $\mu\text{m}$	Repeat frequency/Hz	Power/W
Laser range finder	0.69;1.06;1.54; 10.6	0.1~20	$10^5\sim 10^7$ (Peak value)
Target indicator	1.06;1.54;10.6	10~20	$10^6\sim 10^7$ (Peak value)
Laser lighting	0.9;10.6	$10^3\sim 10^5$	$10\sim 10^2$ (Peak value)
Lidar	0.53;1.06;10.6	$\leq 200$	Average
Low energy laser weapon	0.53;10.6;1.54 3.8	$\geq 2$ kHz $\leq 20$ kHz	$10^4\sim 10^7$ (Average)
High energy laser weapon	0.24;10.6;1.3; 2.7;3.8	$\geq 20$ kHz or continuous	$10^5\sim 10^9$ (Average)

### 2.2 激光威胁源类型模糊集

在建立模糊决策系统之前,首先要确定模糊决策系统最终输出的激光威胁源的种类。根据战术需要,可将激光威胁源分为 7 个模糊子集,分别是激光测距机(TG0)、激光目标指示器(TG1)、激光照明器(TG2)、激光雷达(TG3)、激光低能武器(TG4)、激光高能武器(TG5)和不确定(TG6)。“不确定”这个模糊子集,既用于系统不能正确识别威胁源的情况,又是模糊子集完备性所必须的。使用单值模糊器是将确切值映射成论域上的模糊单值,即对模糊子集赋予数值含义,根据公式(1)则敌方激光威胁源的模糊子集及

隶属度函数如图 2 所示。

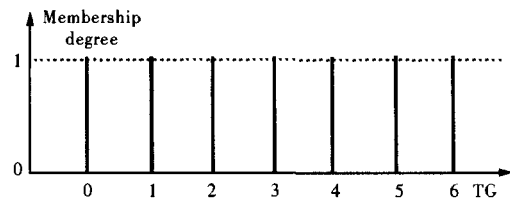


图 2 激光威胁源的模糊子集与隶属度

Fig.2 Fuzzy subset and membership degree of laser menaces

### 2.3 激光各技术参数输入模糊化模型

激光各技术参数必须经过模糊器模糊后,才能进入模糊决策系统。首先要建立各技术参数的模糊集和相应的模糊器(即隶属度函数)。在确定各参数的数学模型时,要考虑两方面:一是该技术参数的本身特点,二是激光告警探测设备对该参数的探测方法和输出形式。为了简化,将精确量分成几档,每一档对应一个模糊子集。每个子集用一个语言标号来代表,并赋予相应的隶属度。

#### (1) 激光重频输入模糊化模型

由表 1 可将激光脉冲重复频率划分为 6 个模糊子集,分别是很低(FQ0)、低(FQ1)、中(FQ2)、高(FQ3)、很高(FQ4)和连续(FQ5)。然后在每个模糊子集上,使用梯边型隶属度函数,由公式(2)将激光告警设备测得的激光脉冲重复频率精确值转换为模糊值。模糊子集的划分和梯形隶属度函数覆盖域的大小,必须具备完备性、一致性、高峰性、排序性等特点,因此,6 个模糊子集的隶属度函数为  $\mu_{FQ}(x:0,0.5,10)$ 、 $\mu_{FQ}(x:6,11,30,80)$ 、 $\mu_{FQ}(x:50,100,200,300)$ 、 $\mu_{FQ}(x:250,350,800,1000)$ 、 $\mu_{FQ}(x:900,1300,2500,5000)$ 、 $\mu_{FQ}(x:4000,6000,8000,\infty)$ 。激光脉冲重复频率的子集划分和输入隶属度函数的形状结构如图 3 所示。

若测得激光脉冲频率为 8 Hz,根据图 3 可得:属于“很低重频”(FQ=0)子集的隶属度值是 0.4,属于“低重频”(FQ=1)子集的隶属度值是 0.6。

#### (2) 激光辐射量变化率输入模糊化模型

对于激光辐射量,以辐射量变化率来衡量较为准确。因为信号探测电路具有自动增益功能,对信号输入有一定的动态范围。通常,单脉冲激光测距机的辐射量变化率为零;地面多脉冲激光测距机和激光雷达的辐射量变化率较小;机载多脉冲激光测距机和激光

雷达的辐射量变化率稍大;机载激光目标指示器和照明器的辐射量变化率较大;激光武器的辐射量变化率最大。由此可将激光辐射量变化率划分为 5 个模糊子集,分别是无(EG0)、低(EG1)、中(EG2)、高(EG3)和较高(EG4)。然后在每个模糊子集上,使用梯形形隶属度函数,由公式(2)将激光告警设备测得的辐射量变化率精确值转换为模糊值,即  $\mu_{EG}(x:0,0,5,12)$ 、 $\mu_{EG}(x:10,15,50,200)$ 、 $\mu_{EG}(x:100,300,500,800)$ 、 $\mu_{EG}(x:600,900,1500,3000)$ 、 $\mu_{EG}(x:2500,4000,8000, \infty)$ ,如图 4 所示。

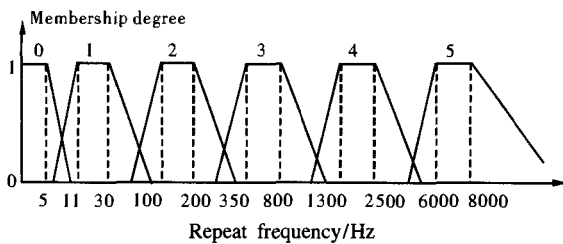


图 3 激光重频的模糊子集与隶属度

Fig.3 Fuzzy subset and membership degree of repeat frequency

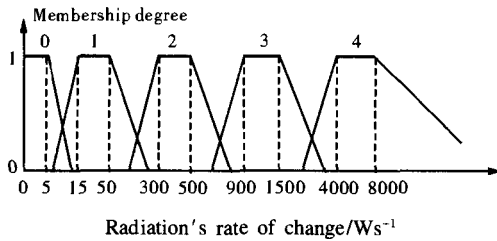


图 4 激光辐射量变化率的模糊子集与隶属度

Fig.4 Fuzzy subset and membership degree of laser radiation's rate of change

radiation's rate of change

### (3) 激光波长输入模糊化模型

目前激光波长分为 3 个波段:可见光~近红外波段,大部分军用激光器工作在这个波段,用于测距机、驾束制导等;远红外的 8~12  $\mu\text{m}$  波段,主要是 10.6  $\mu\text{m}$  使用的  $\text{CO}_2$  激光器,用于对抗前视红外和激光雷达;中红外的 3~5  $\mu\text{m}$  波段,主要用于对抗热寻的导弹、红外搜索与跟踪系统和激光致盲等高能激光武器。这样将激光波长划分 3 个模糊子集,分别是波段 0(WL0)、波段 1(WL1)、波段 2(WL2),由公式(2)建立如图 5 所示使用梯形输入的隶属度函数,即  $\mu_{WL}(x:0.4,0.5,1.6,2.4)$ 、 $\mu_{WL}(x:2,2.5,5,8)$ 、 $\mu_{WL}(x:7,9,15,30)$ 。

需指出的是,上述所给出的各技术参数的模糊子集在其变量论域上的位置及覆盖域的大小,只是一种

参考。在实际应用过程中,要根据经验和决策效果反复调整后确定,而且告警系统结构不同,其数学模型也有所差异。

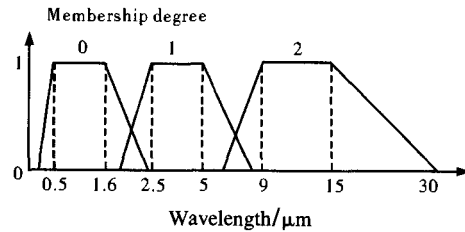


图 5 激光波长的模糊子集与隶属度

Fig.5 Fuzzy subset and membership degree of laser wavelength

### 2.4 激光威胁源识别的模糊决策规则库

模糊决策专家系统的核心是模糊控制规则,模糊规则是关于输入与输出的模糊关系。对于激光信号来说,有重频、辐射量、波长等技术参数,激光威胁源识别的模糊规则可用“IF A & B & C THEN D”语言形式来表示。

按照激光各技术参数的特点来拟定模糊规则,并根据实际决策效果反复试验后确定。由上述激光各技术参数输入模糊化的模型可得模糊规则共有 6(重频模糊子集个数) $\times$ 5(辐射量变化率模糊子集个数) $\times$ 3(波长模糊子集个数)=90 条,其形式如下:

规则 1 IF  $FQ=0$  &  $EG=0$  &  $WL=0$  THEN  $TG=0$

规则 2 IF  $FQ=2$  &  $EG=1$  &  $WL=0$  THEN  $TG=3$

规则 1 表示:若测得敌方激光信号的技术参数是重频很低、辐射量变化率很小、且波长处于可见光至近红外波段,则激光威胁源可能是激光测距机。

规则 2 表示:若测得敌方激光信号的技术参数是重频中等、辐射量变化率较低、且波长处于可见光至近红外波段,则激光威胁源可能是激光雷达。

当输入参数的模糊子集符合某个规则时,该规则就成为有效规则。每个有效规则的决策结果都得到一个模糊子集(即激光威胁源)和隶属度值。每个有效规则的模糊蕴含关系(模糊算子)可采用最小值运算或代数积运算方式。

当激光威胁源采用的模糊器是单值模糊器时,其隶属度值均为 1,相当于  $\mu_{FP2}=1$ ,则每个有效规则的隶属度值由  $\mu_{FP1}$  决定。公式(3)~(7)的运算方式均可用来计算每个有效规则的  $\mu_{FP1}$ 。

## 2.5 模糊决策结果的输出算法

模糊决策结果的输出是一个逆模糊化的过程。由于输入参数的模糊子集是交叉的,通常一种参数输入对应多个模糊子集,使得多个模糊规则成为有效规则,得到多个激光威胁源及其隶属度值。在输出的多个模糊子集及其隶属度中,可用重心解模糊器、中心平均解模糊器、最大值解模糊器3种解模糊器中的任何一种,选取一个最优决策的确定值,使得激光告警器识别激光威胁源,并采取相应的对抗措施。

## 2.6 仿真结果

建立激光威胁源的模糊决策系统后,对该系统输入激光信号,其技术参数为重频9 Hz、辐射量变化率170 W/s、波长1.06  $\mu\text{m}$ ,则得到输入参数的模糊子集及其隶属度值分别为( $FQ=0, \mu=0.2$ )、( $FQ=1, \mu=0.6$ )、( $EG=1, \mu=0.2$ )、( $EG=2, \mu=0.35$ )、( $WL=0, \mu=1$ )。在模糊决策系统的规则库中,有4条规则对上述模糊输入成立,即:

IF  $FQ=0$  &  $EG=1$  &  $WL=0$  THEN  $TG=0$   
 IF  $FQ=1$  &  $EG=1$  &  $WL=0$  THEN  $TG=1$   
 IF  $FQ=0$  &  $EG=2$  &  $WL=0$  THEN  $TG=0$   
 IF  $FQ=1$  &  $EG=2$  &  $WL=0$  THEN  $TG=1$

对每条有效规则使用代数积的方式计算其隶属度值,输出结果分别为:

$$\begin{aligned} TG=0, \mu &= 0.2 \times 0.2 \times 1 = 0.04; \\ TG=1, \mu &= 0.6 \times 0.2 \times 1 = 0.12; \\ TG=0, \mu &= 0.2 \times 0.35 \times 1 = 0.07; \\ TG=1, \mu &= 0.6 \times 0.35 \times 1 = 0.21. \end{aligned}$$

在逆模糊化运算中,采用最大值解模糊器,直接选择隶属度最大值  $\mu_{\max}=0.21$  所对应的激光威胁源作为模糊决策系统的最终输出,则激光威胁源是目标指示器。

## 3 结束语

本文提出的基于模糊决策专家系统来识别激光威胁源的方法,可为准确告警和激光对抗措施的战术运用提供理论依据,也可为激光告警技术的进一步研究提供参考。

## 参考文献:

- [1] WANG Li-xin, WANG Ying-jun. Fuzzy System and Fuzzy Control Course[M]. Beijing: Tsinghua University Press(王立新,王迎军. 模糊系统与模糊控制教程. 北京:清华大学出版社), 2003. 46-50, 80-88, 102-104.
- [2] DENG Yong, SHI Wen-kang. Research on application of random sets theory to data fusion[J]. Infrared and Laser Engineering(邓勇, 施文康. 随机集理论在数据融合中的应用研究. 红外与激光工程), 2002, 31(6): 545-549.
- [3] GONG Jian-yong, DING Ming-yue, ZHOU Cheng-ping. Fusion of dual color data with a Dempster-Shafer approach based on fuzzy sets [J]. Infrared and Laser Engineering(龚建勇, 丁明跃, 周成平. 基于模糊集的 Dempster-Shafer 双色数据融合. 红外与激光工程), 1998, 27(3): 1-5.
- [4] YANG Lun-biao, GAO Ying-yi. Theory and Application of Fuzzy Mathematics. 3rd ed [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press(杨纶标, 高英仪. 模糊数学原理及应用. 第3版. 广州: 华南理工大学出版社), 2001. 69-81.
- [5] KANG Yao-hong. Data Fusion Theory of Multi-sensor Target Detection and Tracing[D]. Xi'an: Xi Dian University(康耀红. 多传感器目标检测和跟踪的数据融合理论. 西安: 西安电子科技大学), 1995.
- [6] GUO Hui-yong. Researches and advances in multi-sensor information fusion technology science[J]. Foundation in China(郭惠勇. 多传感器信息融合技术的研究与进展. 中国科学基金), 2005, 19(1): 17-21.
- [7] WEI Guang-hui, Yang Pei-gen. Laser Technology Applying in Weapon Technology[M]. Beijing: Weapon Industry Press(魏光辉, 杨培根. 激光技术在兵器工业中的应用. 北京: 兵器工业出版社), 1995. 198-199.
- [8] LIU Jing-jiao. Electro-optical Countermeasures Technology and System[M]. Beijing: Chinese Science and Technology Press(刘京郊. 光电对抗技术与系统. 北京: 中国科学技术出版社), 2004. 45-48, 296-297.
- [9] SUN Xiao-quan, LV Yue-guang. Principles and Techniques on Laser Jamming[M]. Beijing: Publishing House of PLA(孙晓泉, 吕跃广. 激光对抗原理与技术. 北京: 解放军出版社), 2000.
- [10] Yan Ji-xiang. Laser Weapons[M]. Beijing: National Defence Industry Press(阎吉祥. 激光武器. 北京: 国防工业出版社), 1996.