

文章编号:1000-6788(2006)06-0130-05

# 飞行器被雷达发现概率的计算方法研究

王旭,宋笔锋,郭晓辉

(西北工业大学航空学院,陕西西安710072)

**摘要:** 给出了飞行器遭遇多雷达探测系统时被发现概率的计算方法。首先根据飞行器的 RCS(Radar Cross Section)模型、飞行航路、雷达系统的特征参数以及坐标,计算出各个分雷达对飞行器的探测次数以及各次探测的状态参数,进一步计算出各次瞬时探测概率。累积各次瞬时探测概率,计算出各个分雷达的发现概率。最后,根据数据融合准则,计算出多雷达探测系统对飞行器的发现概率。该方法充分考虑不同方位飞行器的 RCS 不同这一特点,比固定 RCS 的方法更加接近实战情况;用累积发现概率取代传统的瞬时探测概率,更能反映飞行器在整个航路上遭受探测的情况;把多个雷达视为一个探测系统,更适用于现代雷达探测系统的发展方向。实际算例表明该方法是有效和可行的。

**关键词:** 探测概率;发现概率;飞行器 RCS;多雷达探测系统

**中图分类号:** V221

**文献标识码:** A

## Research on the Approach for Calculating the Probability of Detecting an Aircraft by Radar System

WANG Xu, SONG Bi-feng, GUO Xiao-hui

(College of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** The purpose of this paper is calculating the detection probability of an aircraft traveling near an opponent multi-radar system. Based on the aircraft RCS (Radar Cross Section) model, flight route, radar character parameter and locations, detection times of sub-radars and detection state parameters are calculated. Further more; the instantaneous detection probabilities of each radar are given. Then, the accumulated detection probability is calculated. At last, multi-radar system detection probability is obtained. The method here takes into account the aircraft RCS changing with the different detection attitude; this is more precise than the method which considers the RCS as constant. The accumulated detection probability is used to replace the traditional instantaneous detection probability; so the result get here is the probability of the whole flight process. Taking multi-radar as a detection system is more suitable for the further development of radar. The numerical result shows that the method is effective and feasible.

**Key words:** detection probability; radar cross section (RCS); radar system

### 1 引言

执行任务的飞行器不可避免的要遭到敌方雷达的探测,飞行器被敌雷达发现的概率是关系到任务成败的一个重要参数。传统的计算方法是将飞行器 RCS 看作定值,把飞行器某一时刻的被探测概率作为整个飞行过程被发现的概率<sup>[1~3]</sup>。此类方法只适用于一个雷达且方位变化很小的情况,而当几个雷达分散在不同的地理位置时,由于每个雷达方位都明显不同,用定值的 RCS 就可能得出错误的计算结果。同时,飞行器在执行任务过程中会遭遇多个雷达的探测,每个雷达又会对飞行器进行多次探测,而且多个雷达往往会组成一个探测系统。

本文综合考虑整个任务过程飞行器遭遇多个雷达多次探测的因素,提出了一种新的航路中飞行器被发现概率的计算方法。该方法有以下三个特点:1)不把 RCS 看作定值,而把它看作方位角和俯仰角的函

收稿日期:2005-06-21

资助项目:航空基础科学基金(01A53008)

作者简介:王旭(1982-),男,河南唐河,西北工业大学航空学院博士,主要研究方向:飞机总体,生存力和航路规划。

数;2)用累积探测概率取代瞬时探测概率;3)考虑多雷达组成探测系统的情形,给出了它对目标的发现概率计算方法。

### 2 基本模型及计算方法

图 1 给出飞行器遭遇多个雷达多次探测时被发现概率的计算流程图。

本文假定飞行器以等高度、等速率飞行,雷达处于地面。

#### 2.1 飞行器的 RCS 模型及航路

飞行器的 RCS 是俯仰角 和方位角 的函数  $\sigma = f(\theta, \phi)$ 。如图 2 所示为某飞机 RCS 模型。需要注意的是  $\sigma = f(\theta, \phi)$  是测试后经滑动平均处理的结果,由于飞机的运动和抖动,在计算某一方位角和俯仰角的探测概率时,假设 RCS 服从 Swerling-1 波动模型<sup>[4]</sup>。从图 2 可以看出飞机 RCS 随着俯仰角 和方位角 的变化比较剧烈,在以下的发现概率计算中,将充分考虑 RCS 随方位角和俯仰角的变化。

飞行器的航路由一系列航路点表示。第一个航路点为飞行器的起点,最后一个为目标点,各个航路点间由直线连接。

由于本文研究的重点是飞行器被发现的概率,所以,这里认为飞行器的 RCS 以及航路数据是已知的。根据飞行器的航路以及雷达的坐标,可以计算出任一飞行时刻,飞行器相对于雷达的俯仰角、方位角以及距离  $R$ ,同时可以计算出雷达天线的仰角等,这里就不再赘述。

#### 2.2 瞬时探测概率模型

雷达一次扫描判定目标存在的概率称为瞬时探测概率。本文以最常用的单元平均恒虚警处理技术 (Cell Averaging Constant False Alarm Rate, CA-CFAR) 为例进行研究,假定背景杂波服从高斯分布,经平方律检波器,针对飞机服从 Swerling-1 波动模型,探测概率  $P_d$  和虚警概率  $P_{fa}$  分别为<sup>[5]</sup>:

$$P_d = (1 + t / (1 + S))^{-K}; \tag{1}$$

$$P_{fa} = (1 + t)^{-K}. \tag{2}$$

式中,  $K$  为 CA-CFAR 恒虚警处理器的参照单元个数,  $t$  为探测门限因子,  $S$  为目标信噪比。

从雷达方程出发,考虑目标 RCS,目标与雷达间的距离,大气和地理环境对雷达波传输的影响,得到<sup>[4]</sup>:

$$S = S_0 \left( \frac{R_0}{R} \right)^4 \frac{F^4/L}{F_0^4/L_0}. \tag{3}$$

式中,  $S$  为目标信噪比;  $R$  为雷达与目标间的距离;  $\sigma$  为目标 RCS;  $F$  为天线方向图传播因子;  $L$  为大气损耗;  $S_0$ 、 $R_0$ 、 $F_0$  以及  $L_0$  为雷达的特征探测性能参数。  $F$  和  $L$  是与天线高度、仰角以及传播路径有关的参数,参考文献[6]提供了成熟的计算方法。

#### 2.3 单雷达累积发现概率模型

如图 3,当飞行器按照某一航路飞过雷达时会遭到雷达的多次探测,如  $a, b, c, d, e$  等,而每次探测由于距离、方位、以及飞行器 RCS 的不同,探测概率也不相同,用传统的瞬时探测概率已经不能反映整个航路遭受探测的情况,必须把各次瞬时探测概率综合起来考虑。我们把这种综合考虑各次探测的累积概率称为发现概率。雷达对飞行器的累积发现概率为  $P_D$ :

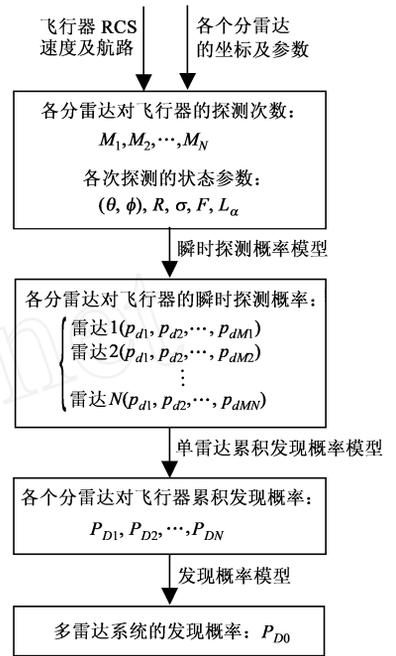


图 1 计算流程图

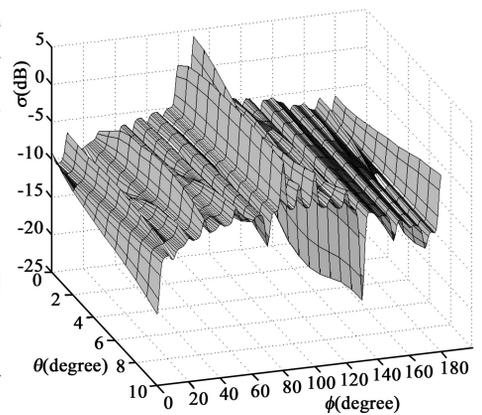


图 2 某飞机 RCS 随角度变化模型

$$P_D = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - p_{di}) \tag{4}$$

式中  $p_{di}$  为雷达对飞行器第  $i$  次探测的瞬时探测概率;  $M$  为探测次数, 它与飞行器在雷达探测区域内的暴露时间  $t_{\text{exposure}}$  以及雷达扫描周期  $T$  有关,  $M$  的表达式如下:

$$M = \lfloor \frac{t_{\text{exposure}}}{T} \rfloor \tag{5}$$

式中  $\lfloor \cdot \rfloor$  表示取计算结果的整数部分。

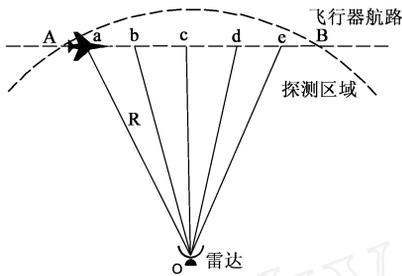


图3 单雷达情形示意图

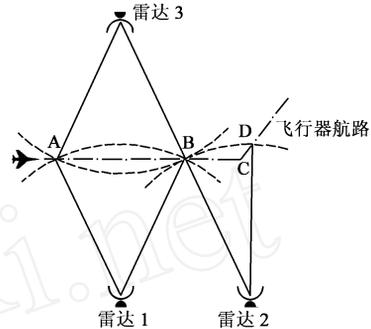


图4 多雷达情形示意图

### 2.4 多雷达系统发现概率模型

如图4的多雷达情形, 多雷达往往构成一个探测系统, 各雷达之间通过数据链等实现数据共享与信息融合, 其探测能力取决于多雷达的空间分布、体系结构、信息融合准则等多种因素。

多雷达探测系统的发现概率是指信息融合中心得出的目标发现概率。以典型的分布式多雷达探测系统为例, 假设探测系统由  $N$  部雷达组成, 对目标的发现采用“ $K$  out of  $N$ ”融合准则<sup>[7]</sup>, 即当探测系统内发现目标的雷达数超过检测门限  $K$  时, 则判为发现目标, 其融合判决流程如图5所示。

在此作二元假设:  $H_0$  表示飞行器不存在;  $H_1$  表示飞行器存在。

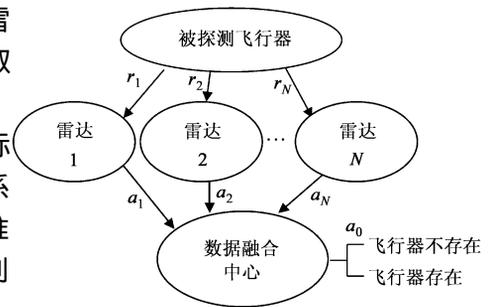


图5 数据融合判决流程

$i$  为 1 到  $N$  之间的整数, 第  $i$  个雷达对接收到的数据  $r_i$  进行预处理, 处理结果  $a_i$  为,

$$a_i = \begin{cases} 0, & H_0 \text{ 成立} \\ 1, & H_1 \text{ 成立} \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, N. \tag{6}$$

第  $i$  个雷达对飞行器的累积发现概率  $P_{Di}$  为:

$$P_{Di} = P(a_i = 1 | H_1) = 1 - \prod_{j=1}^{M_i} (1 - p_{dj}) \tag{7}$$

式中,  $M_i$  为第  $i$  个雷达对飞行器的探测次数,  $p_{dj}$  为第  $j$  次探测的瞬时探测概率。

$A$  假定表示各分布雷达组成的判决向量, 即  $A = (a_1, a_2, \dots, a_N)$ , 则判决向量被送到数据融合中心, 数据融合中心根据  $A$  做出全局判决,  $A$  的所有组合共有  $2^N$  种:

$$\begin{cases} A_1 = (0, 0, \dots, 0, 0) \\ A_2 = (0, 0, \dots, 0, 1) \\ \dots \\ A_{2^N} = (1, 1, \dots, 1, 1) \end{cases} \tag{8}$$

假定数据融合准则用函数  $R(A)$  表示, 则“ $K$  out of  $N$ ”准则可表示为:

$$R(A) = \begin{cases} 1, & \text{如 } \sum_{i=1}^N a_i \geq K, \text{判 } H_1 \\ 0, & \text{如 } \sum_{i=1}^N a_i < K, \text{判 } H_0 \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $K$  为 1 到  $N$  之间的整数。

则融合后系统对飞行器总的发现概率为:

$$P_{D0} = \sum_A R(A) \cdot \sum_{S_0} (1 - P_{Dk}) \sum_{S_1} P_{Dk} \quad (10)$$

式中,  $S_0$  表示判决向量  $A$  中元素值为 0 的雷达集合, 即在该集合中的雷达均判决目标不存在;  $S_1$  表示  $A$  中判决结果为 1 的雷达集合;  $P_{Dk}$  为第  $k$  个雷达对飞行器的发现概率。

### 3 算例

例 1 飞机航路遭遇一个雷达, 如图 3 所示, 飞行速率为 903km/h, 航路依次经过的两点为  $A(-81.3, 169.5, 15)$ ,  $B(81.3, 169.5, 15)$ , 雷达坐标为  $(0, 0, 0)$ , 坐标单位 km, 雷达参数见表 1。由文中方法计算得到飞机被雷达发现的累积概率为 0.21902, 表 2 给出了详细计算结果。

表 1 雷达参数表

参数	数值	参数	数值
雷达类型	警戒雷达	$R_0$	150km
波段	S 波段	$S_0$	25.56
中心频率	3 GHz	$\sigma$	1m <sup>2</sup>
极化方式	水平极化	$F_0^A/L_0$	2.31
参照单元	24	虚警概率	10 <sup>-6</sup>
扫描周期	12s	天线高度	30m

表 2 单雷达累积发现概率计算结果

各次探测的雷达截面积 $i$	最小值	0.30130m <sup>2</sup>
	最大值	2.07900m <sup>2</sup>
瞬时探测概率 $P_{di}$	最小值	0.00016
	最大值	0.09569
探测次数 $M$	54	累积发现概率 $P_D$
		0.21902

例 2 飞机航路遭遇某三雷达系统, 如图 4 所示, 飞行速率为 903km/h, 航路依次经过四点  $A(-81.3, 169.5, 15)$ ,  $B(81.3, 169.5, 15)$ ,  $C(154, 169.5, 15)$ ,  $D(164.4, 188.0, 15)$ ; 三个雷达坐标依次为雷达 1  $(0, 0, 0)$ , 雷达 2  $(161.5, 0, 0)$ , 雷达 3  $(0, 340.0, 0)$ ; 坐标单位为 km, 三个雷达具有同样的参数性能, 见表 1, 三个雷达组成一个分布式探测系统, 数据融合准则为“2 out of 3”。

由文中方法计算得到飞行器被雷达系统发现的概率为 0.10150, 表 3 给出了详细的计算结果。

表 3 多雷达系统发现概率计算结果

各个分雷达探测情况	判决向量 $A$	$R(A)$	$R(A) \cdot \sum_{S_0} (1 - P_{Dk}) \sum_{S_1} P_{Dk}$	飞机被发现概率
雷达 1 $M_1 = 54$ $P_{D1} = 0.21902$	$(0, 0, 0)$	0	0	$P_{D0} = \sum_A R(A) \cdot \sum_{S_0} (1 - P_{Dk}) \sum_{S_1} P_{Dk} = 0.10150$
	$(0, 0, 1)$	0	0	
	$(0, 1, 0)$	0	0	
雷达 2 $M_2 = 32$ $P_{D2} = 0.17583$	$(0, 1, 1)$	1	0.02550	
	$(1, 0, 0)$	0	0	
雷达 3 $M_3 = 54$ $P_{D3} = 0.20751$	$(1, 0, 1)$	1	0.03746	
	$(1, 1, 0)$	1	0.03052	
	$(1, 1, 1)$	1	0.00800	

### 4 结论

本文给出了飞行器遭遇多雷达组成的探测系统时被发现概率的计算方法, 该方法在以下三个方面对传统的方法进行了有效改进:

- 1) 该方法以飞行器的 RCS 模型为基础, 充分考虑不同方位飞行器的 RCS 不同这一特点, 从而更加接

近实战情况。

2) 该方法得到的结果不是某一时刻飞行器被探测到的概率,而是整个飞行过程飞机遭遇多个雷达多次探测概率的累积,使得结果更能反映执行任务整个过程的探测情况。

3) 该方法把多个雷达视为一个探测系统,更适合于现代雷达探测系统的发展方向。实际算例表明该方法是有效和可行的。

#### 参考文献:

- [1] Hebert J, Jacques D, Novy M, Pachter M. Cooperative Control of UAVs [C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit 6 - 9 August 2001 Montreal, Canada, A01-37127, AIAA 2001-4240.
- [2] 何佩,金长江,屈香菊. 航迹规划中雷达探测空间的生成[J]. 飞行力学, 2001,19(4):78-80.  
He P, Jing C J, Qu X J. Generation of radar detection space in the flight vehicle route planning[J]. Flight Dynamics, 2001,19(4):78-80.
- [3] 许诚,曾亮. 航迹规划中反舰巡航导弹的雷达突防能力[J]. 飞行力学, 2004,22(2):82-84.  
Xu C, Zeng L. Computation of anti-ship cruise missiles ability over region of radar detection [J]. Flight Dynamics, 2004,22(2):82-84.
- [4] M. I. 斯科尔尼克. 雷达手册[M]. 北京:国防工业出版社,1978,60-78.  
Skolnik M I. Radar Handbook[M]. Beijing: Defense Industry Press,1978,60-78.
- [5] Gandhi P, Kassam S A. Analysis of CFAR Processors in Non-homogeneous Background [C]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1988, 24(4):428-445.
- [6] 张考,马东立,等. 军用飞机生存力与隐身设计[M]. 北京:国防工业出版社,2002,171-250.  
Zhang K, Ma D L. Military Aircraft Survivability and Stealth Design [M]. Beijing: Defense Industry Press, 2002, 171-205.
- [7] 高宏建. 飞机探测敏感性评估系统中的基本模型研究[R]. 西安:西北工业大学飞机系, 2002,48-57.  
Gao H J. Basic model research of aircraft survivability assessment [R]. Xi'an: College of Aeronautic, Northwestern Polytechnical University, 2002,48-57.

(上接第129页)

从数据表中的结果可以看出,由于考虑了弧的容量约束,经优化计算后,可以认为每条弧上的总流量基本没有超过弧的容量限制.大部分弹药能够及时运抵相应的需求点.其中约有近330吨弹药,经过附加节点到达需求点,也就是说这部分弹药无法及时运到需求点.通过分析,认为这是由于运输网络中I、J、K三个中转点的中转、装卸能力限制而引起的.因为需要运输弹药的总量为3010吨,而这三点的中转、装卸能力总和为2680吨,其差值为330吨,恰为经附加节点,从旁路运输到需求点的弹药总量.

通过数据分析,可以认为通过KSHWC算法能够在容量限制的范围内,充分优化运输方案.而且,能够从附加节点相连的旁路中的每条弧的各种弹药运输量,得知与该条弧相连的需求点所无法及时得到供应的弹药种类和数量.决策人员也能从数据分析中了解到整个运输网络中的薄弱环节-即制约弹药及时供应的瓶颈所在,以便及时采取措施,保障弹药供应顺利进行.

#### 参考文献:

- [1] 傅家琪,迟成文. 实用运筹网络[M]. 安徽教育出版社,1985. 121-128.  
Fu Jiaqi, Chi Chengwen. Practical Operation Network[M]. Anhui Education Press,1985. 121-128.
- [2] 钱颂迪,等. 运筹学[M]. 清华大学出版社,1996. 20-32.  
Qian Songdi, et al. Operational Research[M]. Tsinghua University Press,1996. 20-32.
- [3] 盛昭瀚,曹忻. 最优化方法基本教程[M]. 东南大学出版社,1990. 143-151.  
Sheng Zhaohan, Cao Xin. Optimization Method Basic Tutorial[M]. Southeast University Press,1990. 143-151.
- [4] 杨洪. 图论常用算法选编[M]. 中国铁道出版社,1985. 84-92.  
Yang Hong. Selections from Graph Theory Common Algorithms[M]. Chinese railway Press, 1985. 84-92.
- [5] 李宁萍,陆廷金. 航空弹药勤务[M]. 黄河出版社,1995,11:43-50.  
Li Ningping, Lu Tingjin. Aviation Ammunition Service[M]. The Yellow River Press, 1995,11:43-50.