

□ 探测跟踪技术 □

# 天线波束对飞机射频隐身性能的影响分析<sup>\*</sup>

李寰宇, 柏鹏, 王谦喆

(空军工程大学 综合电子信息系统与电子对抗技术研究中心, 陕西 西安 710051)

**摘要:** 射频隐身是新一代军用飞机必须具备的重要能力。从隐身飞机的实际使用环境出发, 针对以往只考虑个体对抗特性, 采用 Schleher 截获因子评价飞机射频隐身性能的不足, 提出了基于整体对抗特性, 采用联合截获概率评估射频隐身性能的新方法, 为射频隐身研究提供了新思路。通过对隐身飞机的射频使用环境建模, 计算了天线波束的空、地覆盖区大小, 结合联合截获概率的定义和计算方法, 仿真了不同情况下天线波束宽度对联合截获概率的影响。根据仿真结果, 分析了天线波束对飞机射频隐身性能的影响, 其结论可为隐身飞机天线设计时的折中考虑提供基础和参考依据。

**关键词:** 电子战; 射频隐身; 截获接收机; 天线波束; 截获概率

doi:10.3969/j.issn.1009-086x.2012.04.025

中图分类号: V218; V271.4; TN959.7; TP391.9 文献标志码:A 文章编号: 1009-086X(2012)04-0128-06

## Influence of Antenna Beam on Radiofrequency Stealth

LI Huan-yu, BAI Peng, WANG Qian-zhe

(AFEU, Research Center for Integrated Electronic & Information System and Electronic Countermeasure Technology, Shaanxi Xi'an 710051, China)

**Abstract:** Radiofrequency (RF) stealth is an important property of new generation military aircraft. By analyzing actual application environment of stealth aircraft, the drawbacks of using the Schleher intercept factor to evaluate RF stealth performance is discussed. A new method of joint intercept probability to evaluate RF stealth performance is proposed. By practical circumstance modeling, the overlay area is calculated. With the definition of the joint intercept probability, the influence of the antenna beamwidth on the joint intercept probability is simulated. Result shows that the conclusions can be used as reference for designing stealth aircraft antenna and it is of considerable value to airplane RF stealth design.

**Key words:** electronic warfare; radiofrequency stealth; interception receiver; antenna beam; interception probability

## 0 引言

隐身是新一代军用飞机的主要特征之一, 隐身

不是一项单一的技术而是许多技术的综合。射频隐身是隐身的重要组成部分, 它与 RCS 隐身、红外隐身共同决定了飞机的整体隐身性能<sup>[1]</sup>。随着近几

\* 收稿日期: 2011-07-23; 修回日期: 2011-11-02

基金项目: 有

作者简介: 李寰宇(1984-), 男, 黑龙江哈尔滨人。博士生, 研究方向为信息化作战、射频隐身。

通信地址: 710051 陕西西安长乐东路甲字1号空军工程大学科研部综合电子信息系统与电子对抗技术研究中心

十年航空电子战的不断发展,诸如机载雷达告警接收机(radar warning receiver, RWR)、机载电子对抗系统(electronic counter measures, ECM)、电子情报系统(electronic intelligence, ELINT)、陆基到达方向及辐射源定位系统(direction-of-arrival system & emitter locator system, DOA & EL)以及反辐射导弹(anti-radiation missile, ARM)等多方面的软、硬杀伤威胁,给机载用频设备带来了越来越恶劣的生存使用环境<sup>[2-3]</sup>,为了保证机载雷达、数据链等机载用频设备的作战效能,提高飞机的生存能力,就必须使飞机具有良好的射频隐身性能。Schleher通过比较雷达探测距离和截获接收机截获距离,给出了影响个体截获概率的截获因子<sup>[4]</sup>,并对其影响因素进行了分析。文献[5]从相控阵天线系统的辐射特性与低截获概率(low probability of intercept, LPI)、散射特性与低可探测性(low observability, LO)和战术任务规划等方面论述了实现多功能相控阵系统射频隐身的技术方向<sup>[5]</sup>。文献[6]研究了天线空域扫描方式发生捷变对飞机射频隐身性能的影响<sup>[6]</sup>。文献[7]通过分析信道化接收机、超外差接收机和匹配非相干接收机等无源探测系统的工作特点,研究了雷达信号实现低截获概率的方法<sup>[7]</sup>。大多数研究的中心是通过分析和改进个体特性,减小Schleher截获因子 $\alpha$ ,然而,Schleher截获因子所体现的是1部雷达或通信设备与1部截获接收机之间的个体对抗特性,在隐身飞机的实际作战环境中,个体对抗出现的概率较低,更为常见的情况是,机载射频辐射源在工作时,其波束覆盖范围内部署着多架敌方飞机和陆基防御系统,在这些平台上包含多种截获接收系统,每个截获系统中又包含着多个不同类型的截获接收机<sup>[8-9]</sup>,即飞机在射频辐射时会面对着多部截获接收机的同时截获和定位。因此,根据实际使用环境,从整体角度考虑基于联合截获概率的飞机射频隐身研究是非常必要的。本文基于射频隐身的对抗性,综合考虑Schleher截获因子和机载射频辐射设备的实际使用环境,从环境模型的建立出发,通过研究天线波束宽度与波束覆盖区之间的关系,提出了一种新的基于联合截获概率的飞机射频隐身性能评价方法,从天线方面对影响联合截获概率的主要因素进行了仿真和分析,给出了提高射频隐身性能的途径

和方法。

## 1 使用环境分析与模型建立

从对抗的角度看,射频隐身的目的就是为了对抗敌方截获接收机,保证己方机载射频辐射设备(主要是雷达和数据链)的正常使用,因此,射频隐身的实际性能可以通过截获接收方的截获概率<sup>[10]</sup>来反映,本文将二者的反比例关系表述为

$$C = \frac{A}{P}, \quad (1)$$

式中: $C$ 为射频隐身性能; $A$ 为常数,根据隐身飞机作战效能评估需求所定义的具体值; $P$ 为敌方截获概率。

### 1.1 实际使用环境分析

在整个电子战领域,最重要的一个方面就是用各种参数来定义天线波束。天线波束宽度是其中一个重要参数,常用的是3 dB波束宽度,即天线增益下降到视轴增益一半的2个增益值间的夹角,可分为方位角 $\theta_{az}$ 和俯仰角 $\theta_{el}$ 。

飞机在飞至某一空域时,使用雷达等射频辐射设备对地/空目标 $T$ 进行照射,由于天线波束宽度的存在,会导致天线主瓣覆盖一定的区域,波束宽度、辐射作用距离以及飞行高度等都会影响到覆盖区的大小。同时,天线副瓣覆盖了天线周围大部分的空间,副瓣中包含的辐射能量会使飞机有可能被一定距离内的截获接收机截获定位,破坏隐身性能,因此,天线副瓣也会产生一定的覆盖区。如果已知敌方的电子作战序列(即敌截获接收机的种类和分布密度已定),就可以根据覆盖区的大小确定飞机进行射频辐射时所对抗的截获接收机的数量和质量<sup>[11]</sup>,进而分析其对射频隐身性能产生的影响。

### 1.2 模型建立

根据上述分析,在研究天线波束对射频隐身性能的影响时,建立这样一个模型:在一个位于战斗机之下的垂直于向下矢量的水平面或战斗机前后平行于向下矢量的垂直面上(包括某一恒定高度或相对距离)有一些规则的网格,上面均匀地分布着相互独立的截获接收机,如图1所示。

模型中的主要参数包括:飞机高度 $h$ 、辐射作用距离 $d$ 、对地照射的掠射角 $\alpha$ 以及截获接收机分布密度 $M$ 。

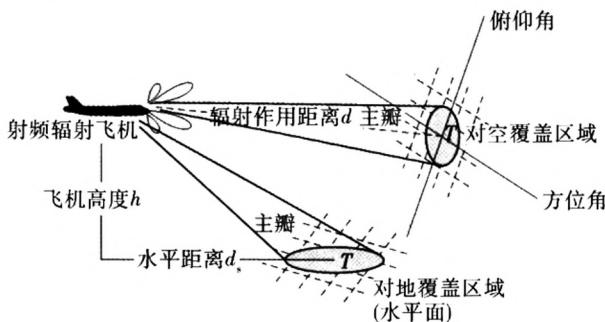


图 1 实际环境的模型

Fig. 1 Model of practical circumstance

## 2 联合截获概率

机载雷达进行射频辐射时,接收来自发射机的信号超过最小门限值的截获接收机都有截获定位该飞机的可能,因此,该飞机的射频隐身性能应由天线波束覆盖区中全部截获接收机的联合截获概率来评估。

设截获接收机接收到来自发射机的信号满足其灵敏度需求时,实现成功截获的概率为  $P$ ,则在考虑每个截获接收机的截获过程相互独立的情况下,天线波束覆盖区中全部截获接收机对该飞机的联合截获概率可表示为

$$P_{\text{total}} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_i), \quad (2)$$

式中: $N$  为覆盖区中包含的截获接收机数量; $P_i$  为截获接收机  $i$  的截获概率。

若将位于天线主瓣和副瓣覆盖区中的截获接收机分开考虑,则式(1)可以表示为

$$P_{\text{total}} = 1 - \prod_{i=1}^{N_1} (1 - P_i) \prod_{j=1}^{N_2} (1 - P_j), \quad (3)$$

式中: $N_1$  为主瓣覆盖区中包含的截获接收机数量; $N_2$  为副瓣覆盖区中包含的截获接收机数量。

## 3 覆盖区计算

机载用频设备在使用时,其天线波束主瓣所形成的覆盖区可认为是一个椭圆椎体。根据机载多功能雷达的典型任务,分对空照射和对地照射 2 种情况<sup>[12]</sup>对图 1 所示模型的覆盖区进行分析计算。下文中,公式符号下标包含 dB 字样的为该值的 dB 数值。

对空照射时,考虑到功率控制技术在射频辐射中的应用<sup>[13]</sup>,相比于辐射作用距离  $d$ ,敌方编组飞机间的水平距离间隔认为是很小的,可以近似忽略

不计,此时,天线波束所形成的椭圆柱体在辐射作用距离  $d$  处被一垂直面截切,其截面为椭圆形<sup>[14]</sup>,如图 2 所示。

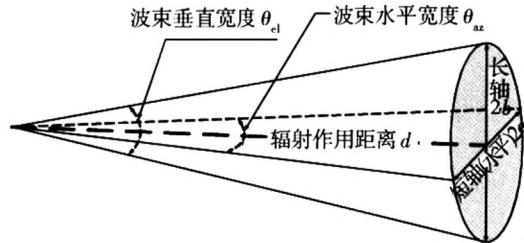


图 2 对空照射覆盖区几何图解

Fig. 2 Geometric illustration of aerial overlay area

因此,对空照射的主瓣覆盖区面积为

$$S_a = \pi a_a b_a = \pi (d \tan \frac{\theta_{az}}{2}) (d \tan \frac{\theta_{el}}{2}). \quad (4)$$

对地照射时,认为地面是一个平坦的水平面,即不考虑由于山丘或低谷等实际具体地形所造成的覆盖区面积变化。此时,天线波束形成的椭圆柱体在辐射作用距离  $d$  处被一水平面斜切,对于绕极轴呈对称性的天线波束,其主波束的水平面斜切面是椭圆形的<sup>[1]</sup>,如图 3 所示。

显然,图 1 中的飞机高度  $h$ 、辐射作用距离  $d$  以及掠射角  $\alpha$  之间具有如下的三角关系:

$$h = d \cos \left( \frac{\pi}{2} - \alpha \right). \quad (5)$$

对于波束宽度较窄的天线,其天线波束主瓣对应的椭圆形截面覆盖区的横向距离可以近似为最大作用距离(视轴为  $AC$  时)对应横向距离与最小纵向距离(视轴为  $AB$  时)对应横向距离的和的一半<sup>[1]</sup>。因此,对地照射模式的波束覆盖区面积可以通过式(6)~(10)计算求得

$$d_{\min} = AB = \frac{h}{\cos \left( \frac{\pi}{2} - \alpha - \frac{\theta_{el}}{2} \right)}, \quad (6)$$

$$d_{\max} = AC = \frac{h}{\cos \left( \frac{\pi}{2} - \alpha + \frac{\theta_{el}}{2} \right)}, \quad (7)$$

$$a_s = \frac{1}{2} (a_{\min} + a_{\max}) = \frac{1}{2} (d_{\min} \tan \frac{\theta_{az}}{2} + d_{\max} \tan \frac{\theta_{az}}{2}), \quad (8)$$

$$b_s = BC = h \left( \tan \left( \frac{\pi}{2} - \alpha + \frac{\theta_{el}}{2} \right) - \tan \left( \frac{\pi}{2} - \alpha - \frac{\theta_{el}}{2} \right) \right), \quad (9)$$

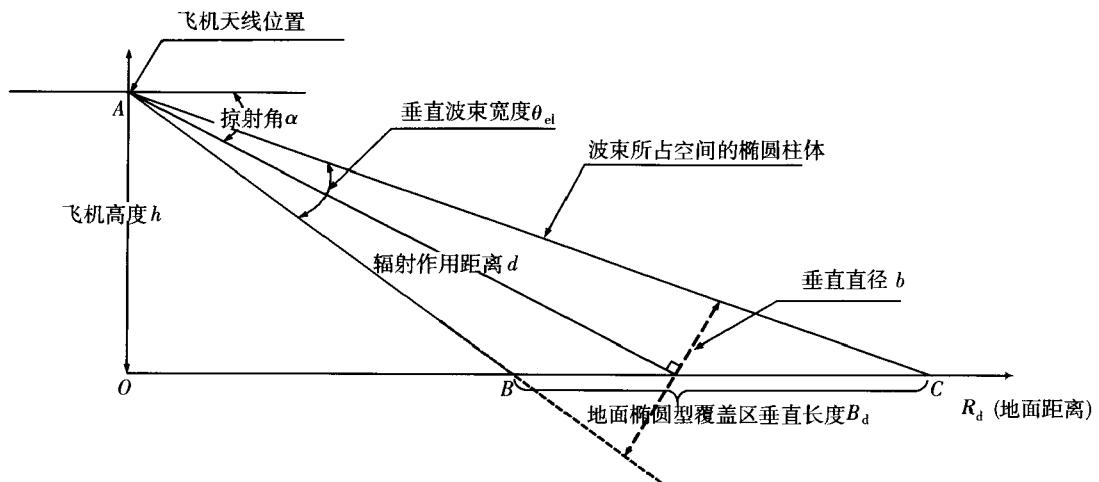


图 3 对地照射覆盖区几何图解(侧剖面)

Fig. 3 Geometric illustration of ground overlay area (side section)

$$S_g = \pi a_g b_g. \quad (10)$$

副瓣覆盖区的分析与主瓣的不同,雷达在工作时能够发现位于其天线波束主瓣覆盖空域中的截获接收平台,而副瓣区域属于无法感知的区域,副瓣中任何位置的截获接收机都有可能在不被发现的情况下截获信号。因此,天线副瓣的覆盖区应该用天线副瓣所覆盖的空间体积来表征,即

$$V = \sum_{k=1}^N V_k, \quad (11)$$

式中: $N$ 为副瓣数量; $V_k$ 为第 $k$ 个副瓣对应的覆盖区体积。

以绕极轴( $\theta=0$ )对称的笔状波束为例分析,具有这种波束的天线,其功率波瓣图如图4所示。

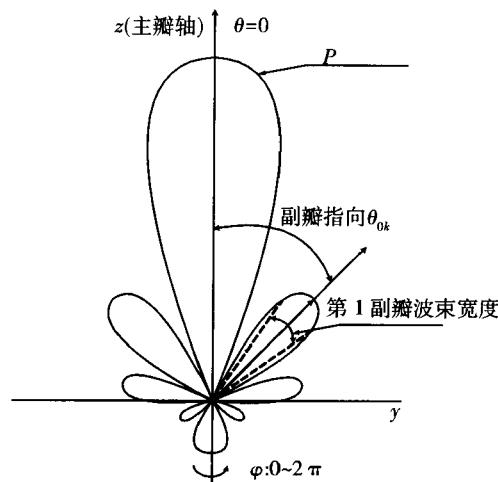


图 4 天线功率波瓣图

Fig. 4 Radiation pattern

根据定向天线的三维场波瓣图<sup>[15]</sup>,第 $k$ 副瓣对应的覆盖区 $V_k$ 可以通过如下积分公式进行计算,

$$V_k = \int_0^{2\pi} d\theta \int_{\theta_{0k}-\frac{1}{2}\theta_k}^{\theta_{0k}+\frac{1}{2}\theta_k} \sin \varphi d\varphi \int_0^{R_k} r^2 dr, \quad (12)$$

式中: $\theta_{0k}, \theta_k, R_k$ 分别为第 $k$ 副瓣的副瓣指向、宽度、副瓣电平所对应的截获距离。

对于采用功率控制技术的低截获概率雷达,其工作距离 $d$ 应满足式(13),同时,对应的副瓣截获距离 $R_j$ 满足式(14)。

$$S_t \geq \frac{P_T G_T G_{RI} \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L_i}, \quad (13)$$

$$S_t = \frac{P_T G_k G_{RI} \lambda^2}{(4\pi)^2 R_k^2 L_i}, \quad (14)$$

式中: $S_t$ 为截获接收机的灵敏度; $G_T$ 为主瓣增益; $G_k$ 为第 $k$ 副瓣增益。

联合式(13),(14)有

$$G_{TdB} - 20 \lg d \leq G_{kdB} - 20 \lg R_k, \quad (15)$$

$$\text{即 } 20 \lg R_k \leq 20 \lg d + T_k, \quad (16)$$

式中: $T_k = G_{kdB} - G_{TdB}$ 为第 $k$ 副瓣的副瓣电平。通过式(16),就可以根据副瓣电平 $T_k$ 求出副瓣 $k$ 所对应的副瓣截获距离 $R_k$ ,再结合其副瓣指向 $\theta_{0k}$ 和宽度 $\theta_k$ 就可以用式(12)计算出副瓣 $k$ 的覆盖区。

## 4 仿真与分析

### 4.1 参数选择

仿真时选择上述分析中提到的绕极轴( $\theta=0^\circ$ )对称的笔状波束进行仿真分析,此时有 $\theta_{az}=\theta_{el}$ 。不

失一般性地,可以认为在大量的随机截获过程中,同型号的截获接收机实现成功截获的平均截获概率趋于相同值  $P_{\text{normal}}$ , 即式(3)中  $P_i = P_j = P_{\text{normal}}$ 。使用 Matlab 进行仿真时的参数选择如表 1 所示。

表 1 仿真参数选择

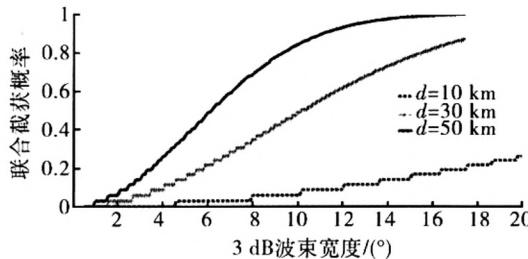
Table 1 Simulation data

工作距离 $d/\text{km}$	主瓣波束宽度 $\theta_m/(\text{°})$	掠射角 $\alpha/(\text{°})$	分布密度 $M$		单体截获概率 $P_{\text{normal}}$
			平面 $M_1/\text{km}^{-2}$	空间 $M_2/\text{km}^{-3}$	
10/30/ 50	0~20	12/30/ 60/90	1 0.1	0.3 0.03	0.3/0.03/ 0.003
副瓣数量 $N$	副瓣宽度 $\theta_k/(\text{°})$	副瓣电平/ dB		副瓣指向 $\theta_{0k}/(\text{°})$	
4	$\theta_1:10$	$G_1 = -17.6$	$G_1 = -40$	$\theta_{01} = 70$	
	$\theta_2:20$	$G_2 = -23.8$	$G_2 = -43$	$\theta_{02} = 90$	
	$\theta_3:20$	$G_3 = -27$	$G_3 = -46$	$\theta_{03} = 120$	
	$\theta_4:20$	$G_4 = -30$	$G_4 = -49$	$\theta_{04} = 180$	

## 4.2 仿真结果

### (1) 不同工作距离的结果

对空照射,  $P_{\text{normal}} = 0.03$ ,  $M_1 = 1$ ,  $M_2 = 0.3$ , 副瓣电平参数选择第 2 组。不同  $d$  下波束宽度对联合截获概率的影响如图 5 所示。

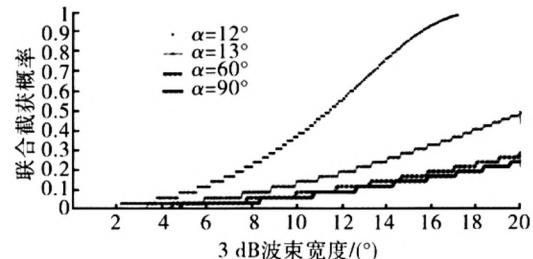
图 5 不同  $d$  下波束宽度对联合截获概率的影响Fig. 5 Simulation result of different parameter  $d$ 

可以看出随着辐射作用距离的增加, 曲线的攀升速度变快, 即作用距离增大时, 波束宽度对联合截获概率的影响更大, 也因此导致天线波束宽度对射频隐身性能的影响变大。

### (2) 不同掠射角的结果

对地照射,  $d = 30 \text{ km}$ ,  $P_{\text{normal}} = 0.03$ ,  $M_1 = 0.1$ ,  $M_2 = 0.03$ , 副瓣电平参数选择第 2 组。不同  $d$  下波束宽度对联合截获概率的影响如图 6 所示。

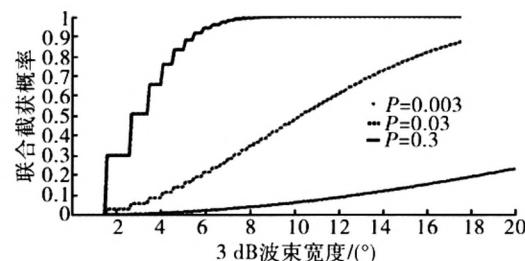
结果表明, 随着掠射角  $\alpha$  的增大, 波束宽度的增加对联合截获概率增长速度的影响减小。也就是说, 在浅掠射角情况下, 天线波束宽度对联合截获概

图 6 不同  $\alpha$  下波束宽度对联合截获概率的影响Fig. 6 Simulation result of different parameter  $\alpha$ 

率的影响较大。这表明, 对于一个天线参数确定的飞机来说, 浅掠射角辐射时射频隐身性能最差, 风险最大。

### (3) 不同单体截获概率的结果

对空照射,  $d = 30 \text{ km}$ ,  $M_1 = 1$ ,  $M_2 = 0.3$ , 副瓣电平参数选择第 2 组。不同  $P$  下波束宽度对联合截获概率的影响如图 7 所示。

图 7 不同  $P$  下波束宽度对联合截获概率的影响Fig. 7 Simulation result of different parameter  $P$ 

结果表明, 单体对抗时, 抗截获能力越差的雷达(即  $P$  值越大的), 其天线的波束宽度对联合截获概率的影响越大, 也就是天线波束对射频隐身性能的影响越大。

### (4) 不同分布密度的结果

对地照射,  $d = 30 \text{ km}$ ,  $\alpha = 60^\circ$ ,  $P_{\text{normal}} = 0.03$ , 副瓣电平参数选择第 1 组。不同  $M$  下波束宽度对联合截获概率的影响如图 8 所示。

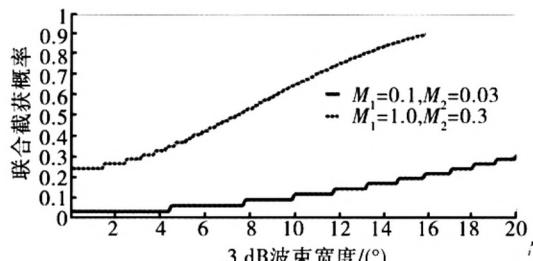
图 8 不同  $M$  下波束宽度对联合截获概率的影响Fig. 8 Simulation result of different parameter  $M$

图 8 表明截获接收机的分布密度越大,联合截获概率随波束宽度变化得越快,相对对射频隐身性能的影响越大。

#### (5) 不同副瓣参数的结果

对空照射,  $M_1 = 1, M_2 = 0.3$ , 对不同工作距离、不同单体截获概率时, 普通副瓣和极低副瓣的仿真结果如图 9 所示。

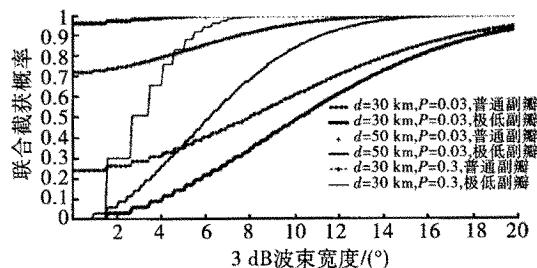


图 9 不同副瓣电平对联合截获概率的影响

Fig. 9 Simulation result of different side lobes

将图 9 中 6 条曲线两两一组分为 3 组比较, 可以发现普通副瓣的初始截获概率都要比极低副瓣高, 并且随着作用距离的增加或者单体截获概率的增加这种现象更加明显。同时, 普通副瓣天线的联合截获概率随波束宽度增加攀升得比较缓慢, 而极低副瓣天线则随着波束宽度的增加而急剧攀升, 这种情况在远作用距离 ( $d = 50 \text{ km}$ ) 和高单体截获概率 ( $P = 0.3$ ) 的情况下尤为明显。

#### 4.3 结果分析

根据上述不同情况的仿真结果, 通过对比分析可以得出以下结论:

(1) 联合截获概率随着天线波束宽度的增加而增加。

(2) 天线波束宽度对联合截获概率的影响随着作用距离  $d$ 、截获接收机个体截获能力  $P$  以及截获接收机分布密度  $M$  的增大而增大, 随掠射角  $\alpha$  的增大而减小。因此, 对于需要在高危险区域、执行中远距离浅掠射角探测任务的飞机, 其天线波束宽度必须严格控制, 以降低联合截获概率, 提高射频隐身性能。

(3) 天线副瓣的形状及副瓣电平大小对联合截获概率有影响; 对于远工作距离、差对抗能力的雷达, 副瓣电平的大小对射频隐身性能的影响更大; 相比于具有普通副瓣天线, 天线波束宽度对低副瓣天线的射频隐身性能影响更大, 因此, 应严格控制低副瓣天线的天线波束宽度, 以保持低副瓣天线原有的低截获概率和高隐身性能。

综上所述, 同时具有针状波束和极低副瓣的天线最有利于提高飞机的射频隐身性能。同时, 为了保持高隐身水平, 应限制机载用频设备的工作距离, 并避免浅掠射角照射。

## 5 结束语

射频隐身能力是新一代军用飞机必须具备的重要能力。根据本文的分析和仿真结果, 机载天线对飞机射频隐身性能的影响主要由以下几个方面决定: ①自身需求, 包括辐射作用距离、作用目标(对空还是对地)、掠射角等; ②单体对抗能力, 单体对抗时被截获接收机截获的概率; ③战场环境, 包括截获接收机的种类和密度; ④自身工艺和设计水平, 副瓣的形状和副瓣电平大小。

虽然仿真结果表明波束宽度越小对飞机的射频隐身性能越有益, 但是由于天线波束宽度与天线尺寸成反比, 而飞机这一特殊平台对天线的体积和重量有着特殊限制, 导致机载天线的设计和选择往往是一种与天线的具体使用任务和实际应用场合相匹配的多需求平衡<sup>[16-17]</sup>, 因此, 在设计隐身飞机的天线时, 也需要紧密结合该隐身飞机需要完成的任务和使用场合, 综合考虑其飞行高度、需要的辐射作用距离以及可能作战地区的敌方无源威胁系统布置情况, 从而平衡隐身需求对天线性能和其他系统设计参数的影响。

#### 参考文献:

- [1] David Lynch Jr. Introduction to RF Stealth [M]. North Carolina: Science Technology Publishing Inc, 2004: 51-55, 323-329.
- [2] SCHROER R. Electronic warfare. A Century of Powered Flight: 1903-2003 [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2003, 18(7): 49-54.
- [3] George W Stimson. Introduction to Airborne Radar [M]. Second Edition. Mendham: SciTech Publishing Inc., 1998: 525-526.
- [4] SCHLEHER D C. LPI Radar: Factor Fiction [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2006, 21(5): 3-6.
- [5] 陈国海. 先进战机多功能相控阵系统综合射频隐身技术 [J]. 现代雷达, 2007, 29(12): 1-4.
- [6] 杨红兵, 周建江, 汪飞, 等. 飞机射频隐身表征参量及其影响因素分析 [J]. 航空学报, 2010, 31(10): 2040-2045.

(下转第 137 页)

能。该天线尺寸较小,结构简单,便于制作和集成于移动通信设备中。

### 参考文献:

- [1] 钟顺时. 微带天线理论与应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1991.
- [2] OHAG M, JIN R, GENG J, et al. Auto-Design of Band-Notched UWB Antennas Using Mixed Model of 2DGA and FDTD [M]. Electronics Letters, 2008.
- [3] 官伯然, 曹建伟. 一种小型超宽带微带天线 [J]. 微波学报, 2011, 27(2): 60–62.
- [4] 刘起坤, 邢锋, 张广求. 一种新型双陷波超宽带天线设计 [J]. 微波学报, 2011, 27(1): 40–43.
- [5] 周海进, 孙宝华, 李建峰, 等. 具有双陷波特性的超宽带天线设计与研究 [J]. 微波学报, 2009, 25(23): 283–293.

- [6] 贾登权, 史志纬. 一种新型超宽带微带天线 [J]. 现代电子技术, 2009, 288(1): 41–43.
- [7] 黄斌, 徐英欣. 加载矩形贴片的圆形缝隙超宽带微带天线 [J]. 现代雷达, 2009, 31(9): 75–78.
- [8] 尤立志, 窦文斌. W 波段雷达导引头低剖面单脉冲天线研究 [J]. 现代防御技术, 2008, 36(6): 124–129.
- [9] 李乐, 高卫东. 基于分形缺陷地结构的微带贴片天线 [J]. 现代雷达, 2011, 33(1): 55–58.
- [10] 常雷, 廖成. 具有寄生单元的新型带阻超宽带天线 [J]. 微波学报, 2011, 27(1): 19–21.
- [11] 史丽, 金洪荣, 耿军平, 等. 一种高增益低旁瓣双贴片微带天线 [J]. 现代雷达, 2009, 31(10): 75–78.
- [12] 张倩, 刘运林, 李智勇, 等. 一种改进的小型化超宽带平面倒锥缝隙天线 [J]. 电讯技术, 2010, 50(11): 85–89.

(上接第 133 页)

- [7] STOVE A G, HUME A L, BAKER C J. Low Probability of Intercept Radar Strategies [J]. IEEE Proceedings of Radar Sonar and Navigation, 2004, 151(5): 249–260.
- [8] TSUI J B Y, STEPHENS J P. Digital Microwave Receiver technology [J]. IEEE Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 699–705.
- [9] GRODEN M, RAFFAELLI L. High Speed Digital Receivers for Electronic Warfare Applications [C] // Micro-waves, Radar & Wireless Communications International Conference, 2006: 142–144.
- [10] KNORR J B. Radiowave Receiving System Intercept Probability Model [J]. Aerospace and Electronic Systems, 1983, AES-19(1): 140–146.
- [11] HMAM H, DOGANCAK K. Passive Localization of Scanning Emitters [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(2): 944–951.
- [12] Merrill I Skolnik. 雷达手册 [M]. 3 版. 南京电子技术研究所, 译. 北京: 电子工业出版社, 2010: 187–191, 481–483, 510–512.

- [13] BARK G. Power Control and Active Channel Selection in an LPI FH System for HF Communications [C] // Military Communication 97Proceedings, 1997, 2 (11): 1031–1035.
- [14] 杨绪利. 圆锥截交线的形状及投影分析 [J]. 东华大学学报, 2005, 31(4): 76–78.
- [15] JOHN D Kraus, Ronald J Marhefka. 天线 (上册) [M]. 3 版. 章文勋, 译. 北京: 电子工业出版社, 2011: 10–60.
- [16] KRIZ J, KRCMER V, PIDANIC J, et al. V. Antenna Beamwidth Control [Antenna Designer's Notebook] [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2010, 52(1): 163–170.
- [17] NOGHANIAN S, Fazel-Rezai R. Antenna Beamwidth Effects on Capacity of MIMO and Multi-Beam Phased Array Systems [C] // Canadian Electrical and Computer Engineering Conference, 2005: 1890–1893.

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…

---



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

---

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>

---



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>