

大气波导环境下的隐身飞机突防方法研究

Penetration Path Planning Method for Stealth Aircraft in Atmospheric Ducts Environment

中国航空规划建设发展有限公司 李建新
北京航空航天大学航空科学与工程学院 莫松 武旭东

[摘要] 针对现代隐身技术发展遇到的瓶颈,本文提出了感知大气波导环境下雷达探测盲区进行突防的新型飞机隐身技术。分析了大气波导的成因和分布规律,及其对雷达探测区域的影响。提出了一种利用顶层盲区进行突防的航迹规划方法的构架,使得隐身飞机能够充分利用敌方防空雷达系统的缺陷,获得一条安全的突防路线。

关键词: 大气波导 探测盲区 航迹规划 隐身飞机

[ABSTRACT] Inspired by the idea of probing and using the shadow zone of radar in atmospheric ducts environments, a novel penetration path planning method is proposed to address the development bottleneck of the stealth technology. Firstly, the formation factors and the distribution characteristic of atmospheric ducts are analyzed. Then, architecture of path planning method is presented, which takes advantage of the top blind area to achieve penetration safety. With this new method, stealth aircrafts can well utilize the flaws in surveillance radar net and obtain an flight route without being observed.

Keywords: Atmospheric ducts Blind area Path planning Stealth aircraft

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.09.066

近 20 年来,没有哪项航空技术能够像隐身技术一样,在军用航空领域引起如此大的轰动和广泛的关注,隐身技术已经成为航空发展史上的一个重要里程碑。先进的隐身技术可极大提高飞行器的纵深打击能力和突破力。隐身飞机对敌方重要目标的大纵深精确打击,已经成为现代立体化战争中最重要作战手段之一^[1-4]。

隐身技术主要包括:隐身外形设计、涂覆吸波材料、有源/无源对消和干扰技术。随着现代隐身技术的发展,反隐身技术也越来越受到重视,雷达防御系统日益完备,极大地削弱了隐身技术给隐身飞机带来的优势。飞机自身的电磁散射强度不能无限降低,单纯依靠现有的这些隐身技术手段,已不能完全满足其作战需求^[3]。因

此,必需另辟蹊径,利用雷达防御系统自身存在的缺陷,寻求一种新的隐身突防途径^[2]。

隐身飞机在执行突防任务时,采用的飞行路线对其生存能力和作战效能也有着较大的影响。本文提出的基于大气波导现象的隐身飞机突防新方法,正是要寻找防空雷达系统的探测死角和盲区,制定一条合理的隐身突防路线,使得隐身飞机能够更好地发挥其低可探测性特点,完成纵深打击任务。

1 大气波导现象介绍及其军事价值

现代战争中几次远程空中打击的成功战例,大多是突袭一方充分利用对方防空雷达的防御空隙,精确规划飞行航路的结果。但是随着防空雷达体系的日趋完善,特别是预警机、机动雷达站、补防雷达和分布式雷达系统的应用,使得进攻方往往难以找到安全的突防路线^[4]。众所周知,电磁波的传播会受到气候和地理因素的影响。因此,大气温度、湿度、地形遮蔽、地球曲率等都会改变雷达的探测能力。设计再严密的防空系统,在实际运用中都会不可避免地受到这些外界环境因素的影响^[2, 5-7]。本章将对大气波导这种异常天气现象进行介绍,阐述其对雷达系统的影响和潜藏的巨大军事价值。

1.1 大气波导现象

电磁波在大气中传播时,不但会受到气体分子和气溶胶粒子的吸收、散射所造成的衰减影响,还会受大气折射影响。其中,负折射、超折射和陷获折射等异常折射均会造成电磁波的异常传播现象。当电磁波遇到逆温或大气密度随高度急剧减小的空气层(陷获层)时,部分电波辐射会被限制在一个空气层内传播,称为超折射传播,定义这种现象为电磁波的大气波导传播现象,而该空气层称为波导层^[5-6]。例如,预警机对于突防飞行器的威胁极大,但是由于大气波导的存在,预警雷达发出的很大一部分电磁波都会被限制在一定高度之内,而在这个高度层之上会出现大面积电磁“真空”区域,成为盲区,使突防飞行成为可能。

常见的大气波导现象根据大气折射率的变化规律不同,分为蒸发波导和表面波导,其中当存在上升气流

时,表面波导还会变成波导层整体提高的抬升波导。不同类型波导的高度不同,海面上最常见的蒸发波导的出现高度通常在 5~30m,而表面波导的高度为 100~200m,抬升波导则能将波导层整体抬高到 400m 以上^[7]。

1.2 大气波导现象造成的雷达探测盲区

只要防空雷达发射的电磁波束满足一定的陷获频率和陷获角要求,在大气波导环境下,就会有较大一部分雷达辐射能量被陷获在波导层中,同时在陷获层上空出现能量空缺区域,从而形成了雷达探测盲区^[7-9]。例如在表面波导情况下,会在雷达探测区域中波导层高度之上一定区域形成损耗较大的区域,通常定义为顶空盲区,盲区中会形成楔形损耗区域,即雷达孔(Radar Hole)。此外,被陷获的雷达电磁波在大气波导层内跳跃传播,又会形成跳跃盲区^[8]。本文将主要探讨雷达顶空盲区的应用,如图 1 所示。

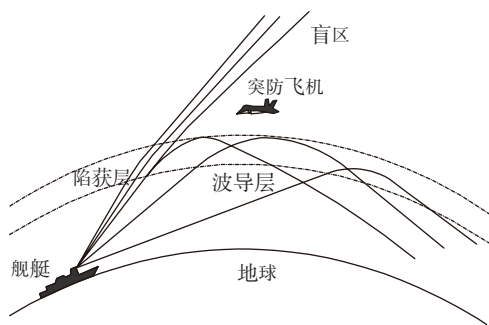


图1 大气波导条件下雷达探测顶空盲区

Fig.1 Top blind area in atmospheric ducts environments

1.3 大气波导盲区的军事价值

目前,国内外学者对大气波导现象及大气波导条件下雷达电磁盲区现象的特点、分布特征以及出现时间进行了研究,可以总结得出以下几个重要结论^[5-8]:(1)最容易受波导影响而形成波导传播的电磁波是分米波(频率 0.3~3GHz)和厘米波(频率 3~30GHz)。防空网中常见的探测雷达工作频段为 X、C 以及 S 波段,都在分米波和厘米波范围内,较易受大气波导影响并形成波导条件下的雷达探测盲区,为利用探测盲区进行突防提供了可能性。(2)国外研究机构利用世界范围无线电观测站资料对全球海域进行大气波导发生规律的统计表明,表面波导的世界平均发生概率约为 15%,而波斯湾海域的表面波导发生概率高达 50%,蒸发波导由于其形成机制的特殊性,几乎能够存在于任何海域的任何时间。同时,国内相关机构通过对东南沿海观察发现,稳定的大气波导存在的时间长度为几小时至一天。大气波导现象发生概率高及持续时间长的特点,使得利用大气波导条件下的雷达探测盲区进行突防的战术策略,具备了真正的军事应用价值。(3)通过理论计算发现,大气波导条件下的雷达探测盲区纵深可达几十公里,国内

学者同时也指出,出现在大气波导顶部上方的大面积雷达探测盲区,具有非常重要的军事应用价值。

综上所述,在大气波导条件下,雷达探测区域会出现大面积、长时间的探测盲区,为突防飞机利用盲区进行突防提供了条件。雷达的探测盲区是防御系统的薄弱部位,但却是突防飞行器躲避雷达探测威胁,实施突防的最佳路径。2010 年 10 月,俄罗斯苏-27 飞机就曾有效利用在美小鹰号航母上空出现的大气波导所造成的电磁盲区逼近飞行,对美小鹰号航母进行多次侦察拍照,而美小鹰号航母的宙斯盾雷达电子系统却无法侦测到苏-27 飞机,甚至肉眼可见的情况下,其电子系统都无法找到目标^[2]。

2 基于大气波导现象的突防研究

要利用大气波导现象进行突防,就要建立起从大气波导预测到盲区分布计算的一整套信息获取和处理体系,并结合一定的突防航迹规划方法,在盲区中找到合理的穿越路线。

2.1 大气波导盲区的军事价值

利用大气波导盲区进行突防,首先必须测量出突防区域的波导分布情况及其出现的高度。目前,国内外的大气波导预测预报方法包括两类^[6]:(1)直接测量方法。利用无线电探空仪等设备,直接测量大气的温度、湿度以及气压来获取大气折射率剖面,从而对大气波导现象进行预测。(2)雷达回波反演技术。根据雷达探测回波判断大气波导,并采用快速、准确的反演算法(例如,神经网络、最小二乘支持向量机等)建立反演模型,反演计算出大气折射率的主要参数。最后,利用微波折射仪或气象传感器测量从地面向上一定高度范围内的大气折射率,绘制大气折射率的垂直廓线,与反演结果进行对比,并进一步修正反演模型和算法,最终实现对大气波导预报。

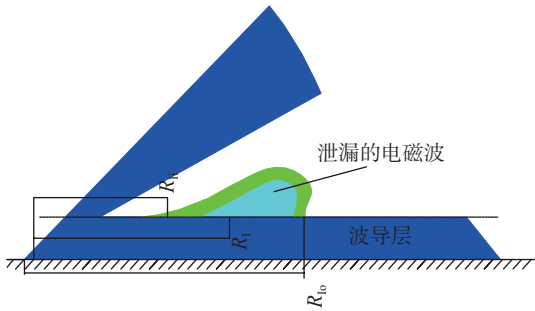
2.2 大气波导环境下雷达波传播模型

已知了突防区域的大气波导情况,接下来就需要计算该大气波导环境下,雷达电磁波传播衰减情况,进而可以得到探测区域中的威胁分布,为后续雷达探测区域建模提供数据。

近几年,美国、俄罗斯等军事强国以及国内的多家单位的许多学者都针对大气波导环境中的电磁波传播模型及理论开展了深入研究^[5-7]。目前被广泛用于解决大气波导环境中电磁波传播计算问题的方法为抛物方程法(PE),该方法稳定性好,计算快速准确。另外,由 Barrios A.E 提出了 APM (Advanced Propagation Model) 计算模型,比单一的 PE 模型运行更快,而且精度可以和 PE 媲美^[5]。同时,国内外已开发出多套高效的雷达电磁波传播计算软件,例如,美国海军开发的 AREPS 软件^[8]。

获得大气波导分布的相关数据之后,就可以通过上述电磁传播模型计算电磁波在大气波导条件下的传播衰减情况,然后与雷达获取目标的信号强度门限值比较,得到每部雷达的探测区域,进而得到整个突防区域中的威胁分布。同时,也就获得了雷达探测盲区的分布,进而可以分析和利用。

例如,蒸发波导条件下雷达的电磁传播情况,可将其抽象为图 2 中的形式,其中波导层顶层的绿色和浅蓝色区域即为从波导层中逃逸出来的电磁波,这个区域的电磁波衰减较大,强度明显低于波导层内跳跃传播的电磁波和未被陷获的电磁波(如图中的蓝色区域)。

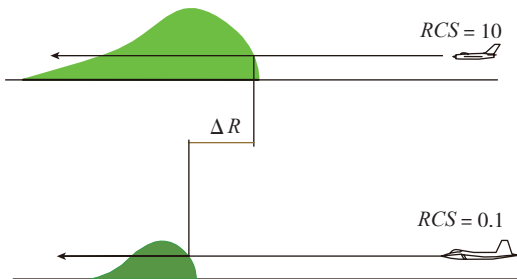


注: R_1 为泄漏电磁波的平均半径; R_{11} 为泄漏电磁波的最小半径; R_{10} 为泄漏电磁波的最大半径。

图2 顶空盲区抽象图

Fig.2 Abstract graph of top blind area

为了使得突防过程具有更好的隐蔽性,飞机在顶层盲区中飞行时,还需要尽量避开泄漏的电磁波。而不同目标散射特性的飞机,盲区中泄漏的电磁波对其影响也会不同,如图 3 所示,具有一定隐身性能的飞机在顶层盲区中将获得更多的飞行空间。



注: RCS 为雷达反射截面积; ΔR 为减缩的探测半径。

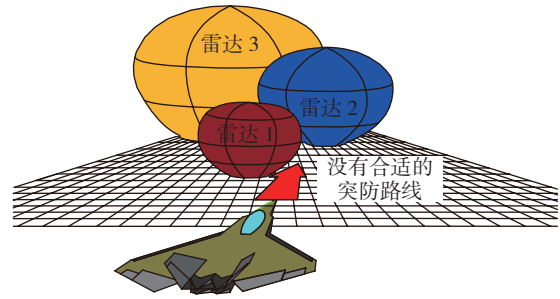
图3 目标散射特性对盲区的影响

Fig.3 Influences of RCS to blind area

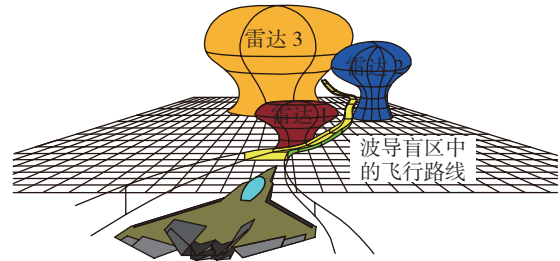
显然,隐身飞机结合其自身的隐蔽性优势,就能利用顶层盲区,在敌方的防空雷达体系中找到一条安全可行的通道,如图 4 所示。

2.3 大气波导环境下的突防规划方法研究

已知整个突防区域中的可飞行区域,问题就回到了航迹规划上来,即要在可行区域中找到一条合适的飞行路径,避开敌方雷达的探测^[9-10]。飞机航路规划的方法



(a) 一般情况下没有可以突防的通道



(b) 大气波导环境下出现可利用空隙

图4 利用波导盲区进行隐身突防的示意图

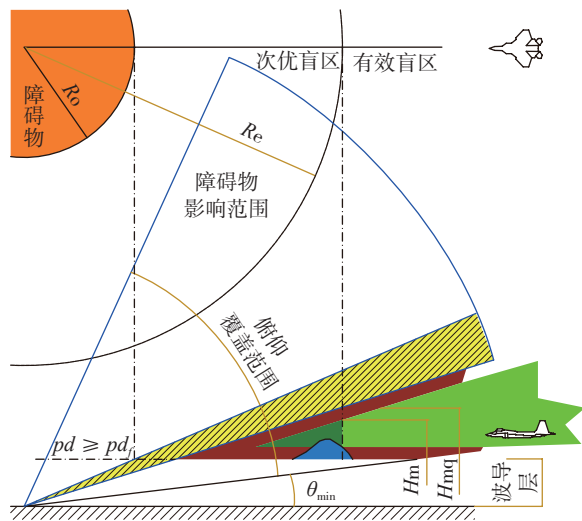
Fig.4 Stealth penetration taking advantage of atmospheric ducts blind area

众多,下面以基于人工势场的航迹规划方法为例,简要介绍隐身无人机利用大气波导现象进行突防规划的方法构架。人工势场方法是由 Khatib 等提出的一种虚拟方法^[11],被广泛应用于机器人的路径规划,其基本思想是将机器人在环境中的运动视为一种在虚拟人工受力场中的运动,障碍物对机器人产生斥力,目标点产生引力,引力和斥力的合力控制机器人的运动方向。场可形象描述出环境对运动物体的作用与约束,与突防飞机面对的防空雷达网威胁环境具有类似性^[12]。因此,人工势场方法适合对隐身无人机的突防作战环境进行描述和建模。而关键问题就是构建威胁区域中各部雷达的人工势场模型。该模型要能够反映出顶层盲区及其构成,最终合理抽象出人工势场建模所需的“障碍物”边界和“障碍物”影响范围,如图 5 所示。

此外,由于防空雷达体系是以一个联网系统出现的,因此还必须对各部雷达的信息融合情况进行建模,即建立联网雷达的人工势场模型。基于以上模型,就可以利用人工势场方法生成满足要求的突防航迹。图 6 即为本文提出的大气波导环境下基于人工势场方法的突防规划方法构架。

2.4 应用前景展望

美国洛克希德·马丁公司的 ESAI (Expanded Situational Awareness Insertion) 计划,就旨在为突防飞机提供一种在线实时路径规划系统,综合战场的实时态势,敌防空系统信息和飞机自身的信号特点,在执行任



注: R_0 为雷达探测范围内不可穿越区域的半径; R_e 为雷达探测范围内部分可穿越区域的半径; pd 为探测概率; pd_t 为探测概率阈值; H_m 为实际盲区可利用高度; H_{mq} 为不考虑电磁波泄漏情况的盲区可利用高度; θ_{min} 为雷达波束最小俯仰角。

图5 雷达探测区域的人工势场模型

Fig.5 Artificial potential field model of radar detect area

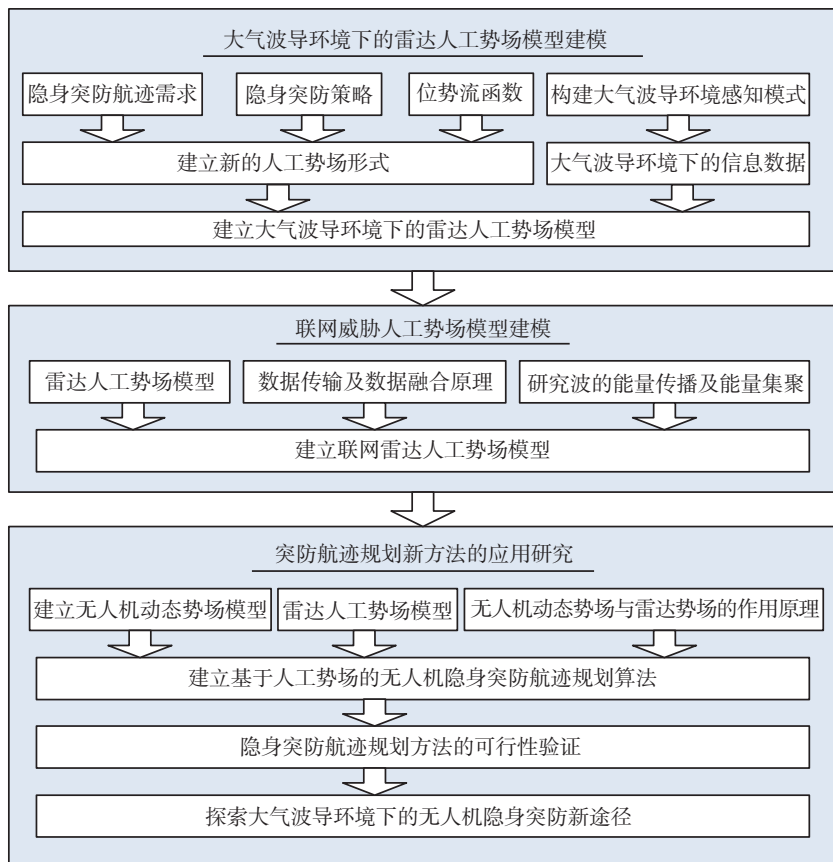


图6 突防方法构架图

Fig.6 Penetration method model

务的过程中实时生成一条建议的飞行通道。只要在这套系统中加入上节所述的突防规划系统,就能够帮助飞

行员利用大气波导盲区选择更为安全的飞行路径。

早在 80 年代初,美国的基恩·亚当就提出了大座舱显示系统的概念。如今这个概念已经在 F-35 的头盔显示系统中得到应用,可以综合已存储的数据和实时遥感数据和图像,显示前方敌雷达防御的虚拟影像。采用微波指示技术,将探测盲区信息及时提供给飞行员,也将具有非常大的实战价值。

3 结论

大气波导现象会对防空雷达网的探测范围造成很大影响。借助大气波导预测技术,可以计算出突防区域中顶层盲区的分布。结合隐身飞机优异的隐蔽性,充分利用这些大面积盲区,就能够在日趋严密的防空雷达区域中完成纵深打击任务。这也为我国未来隐身技术的发展提供了一条新思路。

参考文献

- [1] 朱华邦,杜娟. 四大威胁环境下雷达生存与对抗技术浅析. 飞航导弹, 2005(1):61-64.
- [2] 戎华,曲晓飞,高东华. 大气波导对电子系统作战性能的影响. 现代雷达, 2005 27(2):15-18.
- [3] 张考,马东立. 军用飞行器生存力与隐身设计. 北京:国防工业出版社, 2002:12-34.
- [4] 王小谟,张光义. 雷达与探测——信息化战争的火眼金睛. 北京:国防工业出版社, 2008:264-269.
- [5] 赵小龙. 电磁波在大气波导环境中的传播特性及其应用研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2008:32-39.
- [6] 韩星星. 雷达海杂波反演海面大气波导的研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2009:40-44.
- [7] 蔺发军,刘成国,成思,等. 海上大气波导的统计分析. 电波科学学报, 2006, 20(1):64-68.
- [8] Patterson W. L. Engineer's refractive effect prediction system (EREPS), San Diego: Naval Command Control and Ocean Surveillance Center, 1994:32-36.
- [9] Pierre T, Kabamba, Semyon M, et al. Optimal path planning for unmanned combat aerial vehicles to defeat radar tracking. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2006, 29(2):279-288.
- [10] Norbert J. Karczewski III. Optimal aircraft routing in a constrained path-dependent environment[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2007:63-68.
- [11] Frank W, Moore. Radar cross-section via route planning and intelligent control. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 10(5): 696-700.
- [12] 彭建亮,孙秀霞,蔡满意,等. 基于人工势场的防空威胁建模与仿真. 系统工程与电子技术, 2010, 32(2):338-409.

(责编 玲犀)