

射频隐身技术研究综述

王谦喆^① 何召阳^{①②} 宋博文^③ 李寰宇^{*①}

^①(空军工程大学装备发展与运用研究中心 西安 710051)

^②(空军工程大学装备管理与安全工程学院 西安 710051)

^③(中国科学院遥感与数字地球研究所 北京 100094)

摘 要: 机载用频设备的增加和截获接收技术的发展, 导致航空器在电子对抗中的生存能力受到严重威胁。该文阐述了射频隐身的概念和基本原理, 概括射频隐身技术的研究现状及主要矛盾。其次, 重点以雷达射频辐射模型为主线, 归纳了功率控制、波形设计、环境利用等时域、空域、频域、能量域的射频隐身技术, 总结射频隐身领域的重要研究成果。最后, 基于对已有算法和研究成果的分析, 提出当前研究中存在的射频隐身技术局限性、评估指标单一性等问题, 预测了射频隐身技术未来的研究方向。

关键词: 射频隐身; 低截获概率; 功率控制; 性能评估; 航空集群

中图分类号: TN978

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)06-1505-10

DOI: 10.11999/JEIT170945

Overview on RF Stealth Technology Research

WANG Qianzhe^①

HE Zhaoyang^{①②}

SONG Bowen^③

LI HuanYu^①

^①(Equipment Development and Application Research Department, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

^②(College of Equipment Management and Safety Project, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

^③(Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: With the development of airborne equipment and the intercepted receiving technology, the survivability of aircraft in electronic confrontation is seriously threatened. The concept and basic principles of radio frequency stealth, the research status and major contradictions of radio frequency stealth technology are summarized in this paper. Secondly, focusing on the radar RF radiation model as the main line, in power control, waveform design, etc, the RF stealth technology of power control, waveform design and environment utilization in time domain, spatial domain, frequency domain and energy domain is expounded. The important research achievements in the field of RF stealth are summarized. Finally, on the basis of the analysis of existing algorithms and research results, the limitations of RF stealth technology and the uniqueness of evaluation indicators in current research are summarized, and the future research direction of RF stealth is forecasted.

Key words: Radio frequency stealth; Low Probability of Interception (LPI); Power control; Performance evaluation; Aviation warm

1 引言

隐身、反隐身是未来空中攻防作战的基本特征和发展趋势。随着美军 F-22 和 F-35 的研制成功和装备部队投入使用, 迅速发展的无源探测系统对航空器的生存构成了严重威胁, 隐身/反隐身问题就成为我军在空战中亟需解决的关键问题^[1]。射频隐身^[2,3]技术也称有源目标特征减缩技术或低截获概率技

术。通过对航空器上的辐射源进行设计和管理, 在保证其能满足多样化军事需求情况下, 尽可能地降低发射机的辐射功率和工作时间, 对抗无源侦察威胁是射频隐身的最终目的。对我军新一代作战飞机来讲, 隐身能力是最重要、最基本的作战能力之一。隐身航空器的隐身能力包括雷达隐身、红外隐身和射频隐身 3 个方面^[4]。雷达隐身的本质是减小飞机在不同方向、不同频段的被动电磁散射特征, 降低被敌方雷达探测发现的范围和概率, 其实质是一个低可探测性(LO)问题, 是飞机的一种固有特性, 其特性可以用单一参数(RCS)来定量描述^[5]。红外隐身的本质是减小飞机发动机和机体的主动红外辐射特

收稿日期: 2017-10-13; 改回日期: 2018-03-22; 网络出版: 2018-04-11

*通信作者: 李寰宇 wbbandytt@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61502523)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61502523)

征,降低被敌方红外传感器探测发现的范围和概率,其实质是一个低可截获性(LPI)问题,也是飞机的一种固有特性,其特性可以用单一参数(红外辐射强度)进行定量描述^[6,7]。雷达隐身和红外隐身技术已经相对成熟,射频隐身技术还处于发展阶段,根据“木桶效应”原理,射频隐身成为迫切需要弥补的短板,3种隐身能力的有效实现和平衡是作战飞机隐身能力重要保证,只有实现雷达、红外和射频隐身的协调发展,才能确保在隐身、反隐身对抗作战中的相对优势^[8]。

2 射频隐身概念及基本原理

2.1 射频隐身的概念及特征

航空器隐身并不是单一的技术手段而是许多技术的综合体现,这些技术使得航空器更难被探测、截获和攻击。射频隐身是指减少包括雷达在内的射频信号特征,使敌方(雷达等)传感器处于不断的信息处理和猜测中,从而不能及时发现和确定目标,一旦发现,为时已晚^[9-11]。与雷达隐身和红外隐身不同,射频隐身面对的是低截获^[12]问题,航空器平台上的所有射频辐射源都会面临被截获的风险,在不影响正常工作的条件下将这些辐射源进行低截获处理一个具有多元、多维动态特征性的综合性课题。它具有以下特点:

(1)是一个多设备综合技术问题。射频隐身涉及到作战飞机所有具有主动电磁信号辐射的用频设备,例如机载雷达、数据链系统、敌我识别器、无线电高度表、通信导航设备、电子对抗设备等,要求对在空域、时域、频域这些设备的电磁辐射进行综合控制,因此它是一个机载航电系统层面的综合技术问题。

(2)是一个LPI与辐射管控相结合的问题。对作战飞机设计来讲,即要解决机载雷达、电子对抗等主动辐射设备的LPI设计问题,降低设备电磁辐射特征,同时还要基于战场环境感知与评估,解决射频辐射的管控问题,确保在风险可控的前提下进行电磁辐射。

(3)是一个智能化决策问题。作战飞机要完成作战任务,就必须辐射,而辐射就意味着有被截获和攻击的风险,因此射频隐身与作战任务、作战过程、作战状态以及作战对手的特性密切相关,是一个攻击与防御交织的智能化决策问题。

2.2 射频隐身技术基本原理

射频隐身技术的最终目的是采用LPI技术对抗反辐射导弹(ARM)、到达方向(DOA)系统、雷达告警接收机(RWR)、电子对抗(ECM)设备和段子侦查

(ELINT)系统等无源威胁,从而达到目标特征缩减提高生存能力。所有的无源威胁都来自具有探测、分类和识别功能的截获接收机,LPI系统的设计必须能降低截获接收机的所有3种功能^[13]。目前,大多数射频隐身技术研究都是基于Schleher截获因子:

$$\alpha = \frac{R_I}{R_D} = \frac{\left(\frac{P_t G_t' G_l L_1 \lambda^2}{(4\pi)^2 L_{RT} L_{IR} k T_0 F_l B_l P_{Ri}} \right)^{1/2}}{\left(\frac{P_t G_t G_r \lambda^2 L_2 \delta}{(4\pi)^3 k T_0 F_R B_{Ri} P_{Ri} L_{RT} L_{RR}} \right)^{1/4}} \quad (1)$$

Schleher截获因子 α 越小,飞机射频隐身性能越好。 α 越大,飞机射频辐射风险越大。当 $\alpha < 1$ 时,截获接收机的截获距离小于机载雷达自身的探测距离,机载雷达不易被截获,射频隐身性能较好。当 $\alpha > 1$ 时射频隐身性能较差。当 $\alpha = 1$ 时处于临界状态。

综上所述,射频隐身技术是以雷达、数据链等射频辐射源的探测距离与截获接收机的截获距离为模型对模型中参数进行研究,通过功率控制、波形设计、控制等技术手段,使敌方截获接收机难以截获我方辐射源信号或者被截获到后难以识别,最终达到射频隐身的目的^[14]。

3 射频隐身技术研究现状及主要矛盾

由于涉及军事应用且拥有较高机密性,国外关于射频隐身项目研究的大部分内容仍处于高度保密状态,目前已经公开发行的研究资料和已经具备相应隐身功能的战斗机资料相对较少。

3.1 国内外研究现状

在国外研究中,美国在射频隐身技术和隐身航空器的研究上处于主导地位,在已经公开的资料中显示自20世纪70年代美军“Have Blue”项目以来,美军已经成功研制了F-22、F-117等多种型号的隐身航空器,对航空器的隐身技术已经有了熟练的掌握^[15]。

射频隐身技术实验最早出现在美军F-117战斗机上,面对复杂的电磁环境,处于工作状态的航空器需要辐射大量电磁信号,即使雷达隐身、红外隐身技术相对成熟,航空器的生存能力也会因为射频信号被截获而受到威胁。美军意识到实现整体隐身的重要性,射频隐身逐渐成为美军研究的重点。于是,在1973年美军开启了“Have Blue”研究计划,美军开始了低截获概率雷达(LPIR)系统的试飞试验,其中部分研究内容是将不同型号雷达进行评估对比,最后结果显示采用射频隐身技术的雷达被截获概率有了显著的降低,由于处于初始研究阶段,美军还没有掌握成熟的射频隐身技术。

到了20世纪80年代,射频隐身技术得到了大力发展,在美军秘密研制的隐形轰炸机B-2上进行了大量的射频隐身实验,B-2上装备有APQ-18相控阵机载雷达,该雷达频谱较窄有功率控制和波形选择功能,具有一定的低截获概率(Low Probability of Intercept, LPI),相比以前的雷达隐身性能有较大改善,可以说美军已经掌握了部分的射频隐身技术。

从上世纪90年代开始,随着科学技术的发展,武器装备和侦察探测技术有了较大的飞跃,航空器的生存面临的威胁更加严重,美军开始以最新的战斗机F-35和F-22为载体对射频隐身技术进行研究,并将其应用在通信导航、敌我识别、机载雷达等航电系统上。综合隐身理论的提出是在F-22战斗机的发展研制过程中提出的,可以大大降低机载雷达设备的辐射特征,通过高度集成的航空电子系统,利用人为管控和机载航电系统自动决策的方法,对航空器的用频设备进行合理均衡的控制,最大程度地降低了航空器被截获接收机探测、跟踪和截获的几率。美军以F-22为平台,开展了机载AN/APG-77雷达和IFDL(机载数据链)技术装备的研制。

综合一体化的隐身的理论在F-35战斗机中更加得到了重视,在其装备的AN/APG-81机载雷达中,将有源相控阵雷达和电子对抗进行高度融合,实现了航空器射频隐身能力自动化。Harris公司开发的具有波束指向性的天线,具有更强的定位能力。此时美军的射频隐身技术已经具备作战能力,基本上拥有了射频隐身技术。

国内对机载雷达、航空通信等航电设备的低截获研究起步较早,在基础理论研究上成果丰硕,但关于射频隐身技术的复杂一体化研究还处于初步阶段。

2007年,陈国海研究员^[16]发表了关于射频隐身领域的论文,阐述了未来战斗机对于射频隐身的需求,从机载雷达的辐射特性、低截获概率、和未来军事需求等方面预测未来射频隐身技术的发展方向;2009年,现任DL科学公司的董事长David Lynch, Jr.的著作《射频隐身导论》进入我国,David Lynch是“沉默之蓝”雷达航电的项目经理,参与“Have Blue”, F-117, B-2, “Sea Shadow”, F-22, 先进巡航导弹等许多隐身项目,书中所有资料都来源于解密的原始资料,阐述了射频隐身的历史、概念和基本原理及实现射频隐身的技术手段,为国内科研人员开展新研究提供了研究的依据,从此开启了国内射频隐身研究的热潮;2010年,中国航空工业发展研究中心朱良成、张红霞等人对射频隐身技术的实现途径进行划分类别,通过比较使用射频隐身

技术前后航空器的截获距离远近,对射频隐身技术中存在的矛盾进行了分析,展望了射频隐身的发展趋势;南京航空航天大学的周建江、汪飞、杨宇晓、张贞凯等人对雷达和数据链的采样周期和辐射功率控制方法进行了论述,利用混合混沌粒子群优化算法和改进的粒子群多目标优化算法对数据链通信模型进行优化,实现了功率控制;在已知被探测航空器的距离和雷达横截面的基础上设定了天线扫描方向的功率,根据截获接收机的方位建立探测模型,提出了较好射频隐身性能的基于射频隐身的宽带发射波束形成方法。还对跳频通信的跳频间隔和跳频周期进行研究,将跳频系统先验数据作为研究样本,利用混沌粒子群优化算法(HCPSO)对最大熵的对偶规划进行优化计算,提出的最大条件熵的跳频周期、跳频间隔射频隐身联合设计方法具有最大的不确定性和最小的截获概率^[17]。

“十二五”期间,在国外相关资料的基础上,国内许多科研单位对射频隐身技术进行了研究,得出了一些结论,取得了初步成果。南京航空航天大学、中航××所等单位对射频隐身的基本概念和指标体系进行了研究,初步建立了射频隐身的理论基础;××大学从作战任务规划角度,对射频隐身的理论模型开展了研究;××大学、中电××所和国营××厂正在对射频隐身的关键技术展开研究,从隐身对抗的角度,利用博弈学理论,提出了射频辐射风险、收益评估准则,为射频隐身的理论深化奠定了基础。

3.2 射频隐身技术的主要矛盾

20世纪70年代美国空军上校博伊德提出了作战能力的OODA(Observe Orient Decide Act)环理论,如图1所示。

它分为感知、评估、决策和行动4个阶段,通过传感器感知所处的电磁环境,通过核心处理机过滤、

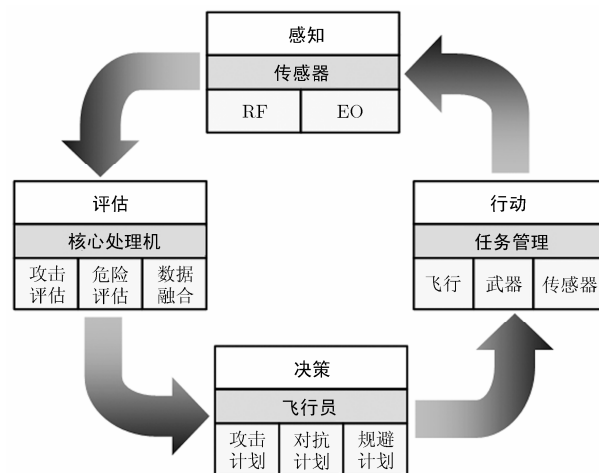


图1 作战能力OODA环描述

分选、识别和融合等手段对信息进行处理,并对战机在战场环境中所处的状态做出评估,是有利于我机还是有利于敌机,同时制定出相应的计划,供飞行员选择。当飞行员选择后,命令就会对飞机平台、武器和传感器进行相应的管理。采取这样一个行动后,再通过传感器来获取战场态势,并进行评估,从而形成一个闭环回路。

战场态势涉及武器以及由与武器相关的包括通信设备和雷达设备产生的信号综合构成的威胁信号环境,交战双方传输的信号综合在一起反映了总的战术态势,如图2所示。交战双方用接收机收集并分析敌方信号,以获取有关敌方武器和其他资源的必要信息。雷达、红外、光电探测器以及射频无源探测系统都是用于感知的探测器。

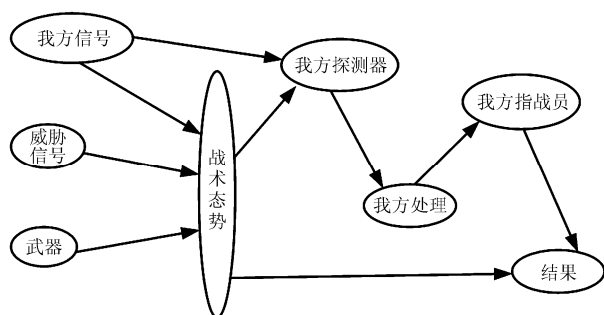


图2 战术态势图

感知环节是隐身/反隐身对抗的主要环节。该环节隐身方需要考虑如何避免被发现,反隐身方则需要考虑如何发现隐身目标。由于作战任务的需要,在感知环节,作战双方都会考虑利用射频获取信息以掌握战场态势,利用射频感知态势的方式有主动感知和被动感知两种。主动感知包括利用雷达探测和利用数据链从友军处获取信息等。被动感知主要是利用射频无源探测系统截获对方射频信号从而获取信息。隐身方需要同时避免反隐身方的主动探测和被动探测,因此隐身飞机除了需要具备雷达隐身能力和红外隐身能力外,还需要在自身利用射频主动感知的同时避免被反隐身方被动感知,也就是需要具备射频隐身能力。

显然,出于隐身考虑,不进行射频辐射能够获得最好的射频隐身效果。然而,不主动探测会在感知环节处于被动地位,并且可能无法完成作战任务。因此,射频隐身的主要矛盾在于既需要在感知环节利用射频主动感知战场态势,又需要避免因使用射频而导致无源截获被敌方感知。

4 射频隐身核心技术分类

航空器辐射的电磁信号难以被截获是射频隐身

的最终目的,影响射频隐身的因素来自时域、空域、频域、能量域、极化域、波形域,实现射频隐身的技术手段大致分为低截获波形技术、辐射源功率控制技术、定向天线技术、信号的最大不确定性技术等。所以,射频隐身核心技术不是某个单一技术或者单一机载设备的问题,而是多个设备和多项技术的综合体现。

4.1 辐射源功率控制技术

辐射功率管理(即发射正好可以实现所需误码率或探测性能的功率)是通信射频隐身的基础技术。为了达到较好的射频隐身性能一般采用最小辐射能量策略,机载数据链发射机的辐射功率与机载数据链的辐射特征、传播损耗、接收机特性存在如下关系^[17]:最小辐射能量策略则要求主动辐射源在任何时间都应以系统所需的最小能量向外辐射,目的是使辐射信号始终保持在截获接收机门限值以下。从探测角度考虑,最小辐射能量策略的重要性最大^[18]。

文献[19,20]对雷达的采样周期和辐射功率控制方法进行了研究,通过分析雷达采样周期与辐射功率,在满足系统跟踪性能要求的前提下,建立了控制参数的优化模型;然后,利用粒子群算法^[21]优化采样周期和自适应辐射功率等参数,有效降低了跟踪性能误差,提高了雷达系统的射频隐身性能。而后以最小化辐射功率函数和最小化能量消耗函数作为目标,对数据链的功率控制方法进行研究,利用混合混沌粒子群优化算法和改进的粒子群多目标优化算法对数据链通信模型进行优化,通过对射频隐身性能参数的深入分析,又提出了基于位置关系和基于信号强度的功率控制方法,实现了功率控制。

文献[22-25]对战机在电子对抗过程中实施有源干扰的射频隐身问题进行研究,分析了现有干扰功率评估准则的不足,在雷达信号检测模型和侦察截获概率模型的基础上,提出了一种干扰功率自适应控制方法,在有效干扰的同时提高干扰的射频隐身能力。

文献[26,27]对战斗机跟踪状态下的功率自适应问题进行了研究,建立跟踪状态下截获概率模型,提出了射频隐身能力指标,以截获概率为目标,雷达跟踪精度为约束条件,建立单次辐射能量实时最优控制模型,得到了基于射频隐身的雷达跟踪状态下功率实时控制方法。

4.2 定向天线技术

定向天线技术主要分两个方面:一是通过对主瓣增益、副瓣增益的控制在正常工作的前提下尽量使用较小的功率对截获接收机进行照射;二是通过控制波束对空域辐射方向或控制飞行器机动位置避

免被敌方探测设备截获以达到射频隐身的目的。在定向天线技术中主要采用窄波束、超低副瓣技术将辐射能量集中在主瓣内,减小天线副瓣辐射的功率,从而减小被敌方截获的概率。定向天线技术对机载辐射源通信性能和隐身性能的优化方向一致,有利于提高通信性能和隐身性能。

在研究天线波束对射频隐身性能的影响时,通常建立这样的对抗模型: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3所示^[28]。

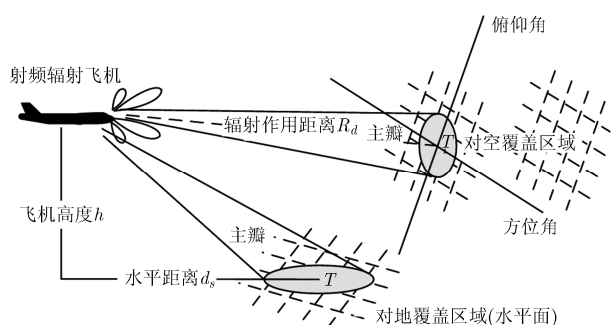


图3 实际环境模型

基于图3模型,文献[29,30]从隐身飞机的战场环境出发,指出 Schleher 截获因子评价飞机射频隐身性能的不足,通过对隐身飞机的射频使用环境建模,计算天线波束的空、地覆盖区大小和天线辐射方向图,结合联合截获概率的定义和计算方法,得出不同情况下天线波束宽度对联合截获概率的影响,对天线波束和射频隐身性能的关系进行了较为清晰的分析。为了降低干扰方向的功率以及提高接收信号的信噪比,文献[31-35]在波束形成算法和零陷设计方面进行了深入的研究。在此基础上张贞凯等人^[36]根据目标距离和目标雷达横截面积设计了主瓣方向的功率,确定工作的阵元数。然后考虑截获接收机位置信息的角度误差,建立宽带信号频域模型,利用旋转信号子空间方法对宽带信号进行聚焦并计算信号的自相关矩阵。最后利用约束最小方差准则产生权向量,完成了发射波束的零陷设计。提出了具有较低的截获概率和较好的射频隐身性能的基于射频隐身的宽带发射波束形成方法。

在图4所示模型的基础上分析发射机对截获接收机的照射时间,截获接收机的帧时间,无线波束的覆盖面积,接收机密度等参数的关系得到截获率计算模型,研究机载雷达天线空域扫描方式发生捷

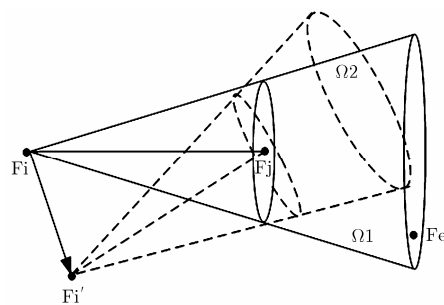


图4 通信隐身规避后态势示意图

变对射频隐身性能的影响,在此基础上通过对波束的控制和飞行器的机动也能达到射频隐身目的,如图4中 F_i 与 F_i' 之间的连线为机动方式示意轨迹。 Ω_2 为新的天线波束通信区域,敌机 F_e 已被移出通信区域。 F_i 可以安全地与 F_j 进行通信^[37]。

文献[38,39]综合考虑到机载雷达探测距离和无源截获接收机截获距离之间的关系以及天线空域扫描方式发生捷变对飞机射频隐身性能的影响,提出用信号截获率来表征飞机射频隐身特性,对影响信号截获率的因素进行分析与计算,给出了飞机在时域、频域和空域上实现射频隐身的途径与方法。

在辐射时间控制方面研究文献相对较少,文献[39]和文献[40]在此基础上对发射机对截获接收机的照射时间,截获接收机的帧时间,无线波束的覆盖面积,接收机密度等参数的关系进行研究,构建射频辐射风险评估指标体系,得到截获率计算模型。为机载雷达射频隐身性能评估打下了基础,具有一定参考价值。

4.3 低截获波形设计

隐身(低截获)波形设计须满足的一个重要准则是适度平滑且覆盖全部工作波段,这通常与数据链或雷达模式的性能不匹配,需要根据不同的任务对波形进行设计,如:发射周期可变性增加、功率管理、大的压缩比、大的瞬时带宽、均一的瞬时带宽、最小的预处理、最小的所需数据率等技术手段。同时另一个基于射频隐身的要求是发射信号的瞬时带宽尽可能大,使功率达到与可接受的性能或误码率一致的最低电平。为了使射频辐射设备在性能正常工作的情况下减小辐射功率或减小功率谱密度通常采用信号处理技术获得的信噪比增益。这样,不仅减小敌方无源探测设备的截获的距离而且对非协作的无源侦察设备的侦察参数的精度也会减小。另外,在低截获波形中采用跳频技术也能降低被截获的概率。

文献[41]在战场检测系统得到的通信距离和截获距离的基础上对调制方式、编码码率、消息序列

长度和波形分集度等参数进行优化,以特定通信速率和被截获概率为优化目标,使用遍历法得到总优化目标的最大值并将对应的通信波形参数作为最优解,建立了基于射频隐身的通信波形参数优化模型,很大程度地提高了数据链波形的射频隐身波形。文献[42]设计和研究了基于伪随机码调制与正交频分复用技术的雷达信号,提出了机载雷达射频隐身信号的设计原则,为雷达射频隐身信号的设计提供了一套行之有效的标准。同时,又对雷达信号自适应变化进行研究,通过发射信号反馈战场态势,然后将这些信息回传给雷达系统,系统根据这些信息自适应设计雷达发射信号,结合最优匹配照射-接收机(OTR)理论与序贯假设检验(SHT)方法,提出了一种新的射频隐身雷达信号设计方法。

文献[43,44]对射频隐身波形的周期进行研究,通过分析相控阵雷达采样周期与射频隐身性能的关系,提出目标跟踪时基于射频隐身的采样周期设计方法,根据运动状态的不同,自适应设计下一时刻的采样周期,在满足跟踪精度同时,有效地设计了采样周期,增大了跟踪过程中的采样周期,提高了雷达射频隐身性能。

4.4 辐射源信号最大不确定性技术

辐射源信号最大不确定是射频隐身设计的重要手段,将混沌思想和熵特征引入到信号设计中使辐射源参数的不确定性最大,敌方截获接收机的脉冲分选功能就会受辐射信号在频域、时域、空域的不规则影响,从而提高信号的抗分选、识别能力,使截获接收机从航空器波形中提取的信息越少越好,例如在跳频通信中就是利用频率特征的不确定性变化来实现信号的射频隐身,通过调频序列来增加其频率的不确定性。雷达中的频率捷变、波束随机扫描,通信中的变速跳频、调制跳变等都属于不确定性范畴^[45]。

文献[45]采用 Logisti 映射生成混沌序列,并在跳频周期空间进行映射,实现跳频周期参数的控制,提出了混沌序列的射频隐身调频周期设计方法。文献[46]对雷达信号源的香浓熵、范数熵和近似熵特征提取算法进行分析,根据特征的灵敏性、识别率、稳定性和时间复杂度设计评估指标,提出多元集对分析的熵特征评价方法,为下一步射频隐身性能评估指标的选取提供了技术支撑。杨宇晓等人^[47]对调频通信的跳频间隔和跳频周期进行研究,将跳频系统先验数据作为分析样本,利用混沌粒子群优化算法(HCPSO)对最大熵的对偶规划进行优化计算,提出的最大条件熵的跳频周期、跳频间隔射频隐身联合设计方法具有最大的跳频周期、跳频间隔不确定性和最小的截获概率。

5 当前问题及未来展望

5.1 当前研究问题分析

射频隐身不是单一技术,而是各种技术的集合运用,它的发展需要系统性的技术积累支撑,目前国内射频隐身研究领域还存在着综合体系论证和关键技术积累不足的问题。主要有以下几个方面:

(1)在核心技术层面射频隐身技术仍存在大量的薄弱环节,有些技术国内已经起步,但是在研究技术方面并没有统一的度量标准。辐射功率控制方面,在满足任务需求的基础上如何在射频隐身和发挥装备最大性能之间找到一个平衡点,是急需解决的技术难题。定向天线技术方面,相比较传统天线窄波束定向天线的应用有利于实现射频隐身,但在高机动通信过程中容易造成通信中断,缺少相应的波束互锁算法。信号的最大不确定性方面,利用信号的复杂程度来增加敌方截获难度,当前的研究主要倾向于熵特征和跳频序列的研究,研究比较分散,缺乏系统性的技术路线。

(2)缺乏射频隐身效能验证与评估手段。射频隐身技术的发展离不开效能验证与评估手段的支撑,这种支撑往往要跨越多个装备技术领域。相对于第3代装备,第4代装备对验证与评估手段提出了更高要求,单靠试验试飞不可能完成,其中实验室环境验证与评估不可或缺。目前射频隐身技术尚缺乏实验室级的效能验证与评估平台。

(3)射频隐身是自身使用需求与隐身需求的一种矛盾,射频隐身的实现是一个风险/收益的动态博弈过程。所以,射频隐身不仅仅是低截获的技术问题,还涉及到针对作战对抗环境和对抗形式的射频作战使用管控问题,技、战术的有效结合、综合优化才能实现飞机的射频隐身。现有相关理论研究都集中在工业技术的创新和改进上,并未重视战术使用方式对射频隐身性能的重大影响,仅有的一些射频使用管控方法研究也都是基于施里海尔截获因子进行的功率管理,从未对时间因素造成的重大影响进行深入分析,具有极大的不平衡性和局限性。

5.2 未来研究方向展望

综上所述,当前国内射频隐身技术研究有很大进展同时存在巨大挑战,未来值得关注的方向可概括为以下两个方面:

(1)航空集群射频隐身技术。随着当代军事装备技术的发展,大规模集群作战^[48]已成为现代战争的主流,航空器间协同作战技术地位凸显,同时所面临的被截获威胁也越大,以往射频隐身领域基本都是基于单平台的射频隐身技术研究,技术也相对成熟,一旦涉及航空集群,射频辐射源的增多就会使

射频隐身性能大打折扣, 所以航空集群射频隐身技术将会是射频隐身研究的重点发展方向。

(2) 射频隐身性能评估技术。目前, 在射频隐身性能评估方面已经有些基础工作, 比如: 单个领域的性能评估指标设计^[49-51], 特定战场环境的射频隐身性能评估模型等, 都可在特定条件下对航空器的射频隐身性能进行评估, 但是也存在适用性不强的问题, 一旦其中某个条件发生改变模型将不再适用。在本人研究领域以典型用频设备和综合电子系统的射频隐身指标评估为应用背景, 解决用频设备/电子系统的射频隐身指标定量评估问题, 重点开展了极化域、能量域、波形域射频隐身指标的设计构建和多域联合定量评估技术的研究, 突破了传统的基于“辐射-接收”模型的射频隐身评估方法, 建立了基于用频设备/电子系统自身辐射信号工作状态和工作参数的射频隐身定量评估方法。该方法实现了对任意辐射源的射频隐身能力的定量评估, 评估结果和敌方截获接收机的性能无关, 完全由辐射源自身辐射信号的性质和结构决定, 是辐射源射频隐身能力的一种本质描述, 实现了对机载雷达射频隐身能力的定量评估, 形成了较为系统的射频隐身定量评估的技术能力, 在射频隐身方面对机载雷达设备的设计制造和战术使用具有一定的指导意义。总地来说, 在射频隐身性能评估方面缺乏通用的射频隐身性能评估指标和方法, 在下一步研究中, 设计类似 RCS 指标的射频隐身评估指标将是射频隐身研究的发展趋势, 可为机载装备的选取提供技术支撑和参考依据^[52]。

6 结束语

射频隐身技术是现代战争必不可少的电子对抗手段之一, 只有实现雷达、红外和射频隐身的协调发展, 才能确保在隐身、反隐身对抗作战中的相对优势。本文对射频隐身技术的基本原理和意义进行了概括, 重点阐述了射频隐身技术的研究现状和存在的问题以及下一步的发展趋势。射频隐身技术是集复杂性、综合性于一体的电子对抗技术, 随着未来科技的进步和装备的发展, 必将面临更加复杂的挑战。我们相信, 本文的射频隐身技术研究综述会对下一步射频隐身技术研究起到一定的指导作用。

参考文献

- [1] WANG Fei, SELLATHURAI M, LI Huanyu, *et al.* Mutual information in airborne radar RF stealth[J]. *International Journal of Tuberculosis & Lung Disease the Official Journal of the International Union Against Tuberculosis & Lung Disease*, 2015, 18(2): 174-179. doi: 10.2495/ICIEE140111.
- [2] 李军政. 飞行器射频隐身技术发展[J]. *现代导航*, 2012, 3(3): 209-214.
LI Junzheng. Development on RF stealth of aircraft[J]. *Modern Navigation*, 2012, 3(3): 209-214.
- [3] YANG Hongbing, ZHOU Jianjiang, and WANG Fei. Design and analysis of Costas/PSK RF stealth signal waveform[C]. *IEEE CIE International Conference on Radar*, 2011: 1247-1250. doi: 10.1109/CIE-Radar.2011.6159782.
- [4] 李寰宇, 查宇飞, 李浩, 等. 联合截获威胁下的雷达射频隐身目标搜索算法[J]. *航空学报*, 2015, (6): 1953-1963. doi: 10.7527/S1000-6893.2014.0363.
LI Huanyu, ZHA Yufei, LI Hao, *et al.* Radar search algorithm based on RF stealth in the case of joint intercepted threats[J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2015, 36(6): 1953-1963. doi: 10.7527/S1000-6893.2014.0363.
- [5] 肖志河, 高超, 白杨, 等. 飞行器雷达隐身测试评估技术及发展[J]. *北京航空航天大学学报*, 2015, 41(10): 1873-1879. doi: 10.13700/j.bh.1001-5965.2015.0220.
XIAO Zhihe, GAO Chao, BAI Yang, *et al.* Aircraft radar stealth test and evaluation technology and progress[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 41(10): 1873-1879. doi: 10.13700/j.bh.1001-5965.2015.0220.
- [6] ZHANG Zhiyong, XU Manzhang, RUAN Xiongfei, *et al.* Enhanced radar and infrared compatible stealth properties in hierarchical SnO₂@ZnO Nanostructures[J]. *Ceramics International*, 2017, 43(3): 1546-1580. doi: 10.1016/j.ceramint.2016.11.034.
- [7] QI Dong, WANG Xian, CHENG Yongzhi, *et al.* Design and characterization of one-dimensional photonic crystals based on ZnS/Gefor infrared-visible compatible stealth applications [J]. *Optical Materials*, 2016, 45(6): 62-69. doi: 10.1016/j.optmat.2016.09.024.
- [8] 李金梁, 涂泽中, 刘振庭. 美第六代战斗机研究进展情况[J]. *电光与控制*, 2014, 21(6): 9-12. doi: 10.3969/j.issn.1671-637X.2014.06.03.
LI Jinliang, TU Zezhong, and LIU Zhenting. The research progress of the sixth generation fighter of USAF[J]. *Electronics Optics & Control*, 2014, 21(6): 9-12. doi: 10.3969/j.issn.1671-637X.2014.06.03.
- [9] WANG Fei, SELLATHURAI M, LIU Weigang, *et al.* Security information factor based airborne radar RF stealth[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2015, 26(2): 258-266. doi: 10.1109/JSEE.2015.00031.
- [10] WANG Zhe. Cognitive RF stealth radar using spoiled weighting vector for doppler compensation[C]. *IEEE Beijing Section, IET Beijing Local Network, Beijing Jiaotong University*, 2016: 435-469. doi: 10.1109/ICSP.2016.7877832.
- [11] YANG Hongbin, ZHOU Jianjiang, WANG Fei, *et al.*

- Characterization parameters of warplane RF stealth and analysis of its affecting factors[J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2010, 31(4): 1000–1008.
- [12] LIU Yongjian, PENG Xiao, WU Hongchao, *et al.* LPI radar signal detection based on radial integration of Choi-Williams time-frequency image[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2015, 26(5): 973–981. doi: 10.1109/JSEE.2015.00106.
- [13] FARRELL T C and PRESCOTT G. A low probability of intercept signal detection receiver using quadrature mirror filter bank trees[C]. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1996: 1558–1561. doi: 10.1109/ICASSP.1996.544098.
- [14] SURRE F. Introduction to RF Stealth [Book Review][J]. *IEEE Antennas & Propagation Magazine*, 2004, 46(6): 106–107.
- [15] LIAO Wenwen, CHENG Ting, and HE Zishu. A target tracking algorithm for RF stealth performance optimization of MIMO radar[J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2014, 35(4): 1134–1141. doi: 10.7527/S1000-6893.2013.0368.
- [16] 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. doi: 10.3969/j.issn.1004-7859.2007.12.001.
- CHEN Guohai. General RF stealth of airborne multifunctional phased array systems[J]. *Modern Radar*, 2007, 29(12): 1–4. doi: 10.3969/j.issn.1004-7859.2007.12.001.
- [17] YANG Yuxiao, WANG Fei, ZHOU Jianjiang, *et al.* RF stealth design method for hopping cycle and hopping interval based on conditional maximum entropy[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(4): 841–847. doi: 10.11999/JEIT140892.
- [18] 杨宇晓, 周建江, 徐川. 射频隐身数据链功率控制方法研究[J]. *现代雷达*, 2013, 35(12): 80–84.
- YANG Yuxiao, ZHOU Jianjiang, and XU Chuan. A study on power control methods for radio frequency stealth datalink[J]. *Modern Radar*, 2013, 35(12): 80–84.
- [19] 李邱斌, 张贞凯, 田雨波. 基于射频隐身的采样周期和辐射功率控制方法研究[J]. *电讯技术*, 2016, 56(4): 430–435. doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2016.04.014.
- LI Qiubin, ZHANG Zhenkai, and TIAN Yubo. Study on sampling period and radiation power control method for radio frequency stealth[J]. *Telecommunication Engineering*, 2016, 56(4): 430–435. doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2016.04.014.
- [20] 张贞凯, 周建江, 田雨波, 等. 基于射频隐身的采样间隔和功率设计[J]. *现代雷达*, 2012, 34(4): 19–23. doi: 10.3969/j.issn.1004-7859.2012.04.004.
- ZHANG Zhenkai, ZHOU Jianjiang, TIAN Yubo, *et al.* Design of sampling interval and power based on radio frequency stealth[J]. *Modern Radar*, 2012, 34(4): 19–23. doi: 10.3969/j.issn.1004-7859.2012.04.004.
- [21] SHI Ronghua, ZHU Xuanzi, DONG Jian, *et al.* A hybrid approach based on PSO and GA for array optimization in MIMO radar[J]. *Zhongnan Daxue Xuebao*, 2013, 44(11): 4499–4505.
- [22] 宋海方, 吴华, 邬蒙, 等. 雷达干扰射频隐身特性及自适应功率控制方法[J]. *电讯技术*, 2012, 52(12): 1934–1939. doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.12.014.
- SONG Haifan, WU Hua, WU Meng, *et al.* RF stealth characteristic of radar jamming and adaptive power control method[J]. *Telecommunication Engineering*, 2012, 52(12): 1934–1939. doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.12.014.
- [23] GINI F, FARINA A, and GRECO M. Selected list of references on radar signal processing[J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 2001, 37(1): 329–359. doi: 10.1109/7.913696.
- [24] WANG R, WANG X, CHENG S, *et al.* Power control of defensive electronic countermeasures based on radio frequency stealth[J]. *Telecommunication Engineering*, 2015, 55(1): 19–26. doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2015.01.004.
- [25] SONG Haifan, WU Hua, CHENG Siyi, *et al.* Adaptive control method of AECM power based on radio frequency stealth[J]. *Fire Control & Command Control*, 2014, 39(6): 118–121.
- [26] LIU Hongqiang, WEI Xianzhi, LI Fei, *et al.* The real time control method of radar single radiation power based on RF stealth at the tracking[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2015, 43(10): 2047–2052. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.10.025.
- [27] 刘宏强, 魏贤智, 黄俊, 等. 雷达单目标跟踪射频隐身控制策略[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2013, 14(4): 32–35. doi: 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.04.008.
- LIU Hongqiang, WEI Xianzhi, HUANG Jun, *et al.* Control strategy of radar stealth for single target tracking[J]. *Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition)*, 2013, 14(4): 32–35. doi: 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.04.008.
- [28] CAPPES C P and KOHLER J L. Directional antenna[P]. US, US 20060104642 A1. 2006.
- [29] 李寰宇, 柏鹏, 王谦喆. 天线波束对飞机射频隐身性能的影响分析[J]. *现代防御技术*, 2012, 40(4): 128–133. doi: 10.3969/j.issn.1009-086x.2012.04.025.
- LI Huanyu, BAI Peng, and WANG Qianzhe. Influence of antenna beam on radiofrequency stealth[J]. *Modern Defence Technology*, 2012, 40(4): 128–133. doi: 10.3969/j.issn.1009-086x.2012.04.025.
- [30] WANG Jing, WANG Fei, and ZHOU Jianjiang. Radar target scattering center extraction based on the full-polarization GTD model[C]. *IEEE International Joint Conference on*

- Computational Sciences and Optimization, 2009: 882-885. doi: 10.1109/CSO.2009.64.
- [31] 李文兴, 毛晓军, 孙亚秀. 一种新的波束形成零陷展宽算法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(12): 2882-2888. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.02018.
- LI Wenxin, MAO Xiaojun, and SUN Yaxiu. A new algorithm for null broadening beamforming[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(12): 2882-2888. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.02018.
- [32] FERRANDO N and FONSECA N J G. Investigations on the efficiency of array fed coherently radiating periodic structure beam forming networks[J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2011, 59(2): 493-502. doi: 10.1109/TAP.2010.2096392.
- [33] DIMOUSIOS T D, MITILINEOS S A, PANAGIOTOU S C, *et al.* Design of a corner-reflector reactively controlled antenna for maximum directivity and multiple beam forming at 2.4 GHz[J]. 2011, 59(4): 1132-1139. doi: 10.1109/TAP.2011.2109348.
- [34] PARIHAR M S, BASU A, and KOUL S K. Efficient spurious rejection and null steering using slot antennas[J]. *IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters*, 2011, 10: 207-210. doi: 10.1109/LAWP.2011.2127437.
- [35] LI M, DEMPSTER A G, BALAEI A T, *et al.* Switchable beam steering/null steering algorithm for CW interference mitigation in GPS C/A code receivers[J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 2011, 47(3): 1564-1579. doi: 10.1109/TAES.2011.5937250.
- [36] 张贞凯, 周建江, 汪飞. 基于射频隐身的雷达发射波束形成方法[J]. 雷达科学与技术, 2013, 11(2): 203-208. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2013.02.017.
- ZHANG Zhenkai, ZHOU Jianjiang, and WANG Fei. A novel method of radar transmit beamforming based radio frequency stealth[J]. *Radar Science & Technology*, 2013, 11(2): 203-208. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2013.02.017.
- [37] WANG F, SELLATHURAI M, LIU W, *et al.* Security information factor based airborne radar RF stealth[J]. 系统工程与电子技术(英文版), 2015, 26(2): 258-266. doi: 10.1109/JSEE.2015.00031.
- [38] YANG Hongbin, ZHOU Jianjiang, WANG Fei, *et al.* Characterization parameters of warplane RF stealth and analysis of its affecting factors[J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2010, 31(4): 1000-1008.
- [39] 冯博宇, 王瑛, 安航, 等. 机载雷达射频隐身性能风险的计算模型[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(1): 73-77. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2013.01.12.
- FENG Boyu, WANG Yin, AN Hang, *et al.* Computational model of radio frequency risk on stealth performance of airborne radar[J]. *Systems Engineering & Electronics*, 2013, 35(1): 73-77. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2013.01.12.
- [40] 谢桂辉, 田茂, 王正海, 等. 射频隐身数据链的通信波形参数优化建模[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(4): 116-122. doi: 10.7652/xjtub201504019.
- XIE Guihui, TIAN Mao, WANG Zhenghai, *et al.* An optimization model for communication waveform parameters of radio frequency stealth datalink[J]. *Journal of Xian Jiaotong University*, 2015, 49(4): 116-122. doi: 10.7652/xjtub201504019.
- [41] 肖永生, 周建江, 黄丽贞, 等. 基于 OTR 和 SHT 的射频隐身雷达信号设计[J]. 航空学报, 2016, 37(6): 1931-1939. doi: 10.7527/S1000-6893.2016.0058.
- XIAO Yongsheng, ZHOU Jianjiang, HUANG Lizhen, *et al.* Radio frequency stealth radar signal design based on OTR and SHT[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(6): 1931-1939. doi: 10.7527/S1000-6893.2016.0058.
- [42] WANG W Q. Moving-target tracking by cognitive RF stealth radar using frequency diverse array antenna[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2016, 54(7): 3764-3773. doi: 10.1109/TGRS.2016.2527057.
- [43] 白迪, 田茂, 陈小莉. 基于自适应多目标优化技术的调制模块设计[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(09): 11-15. doi: 10.13245/j.hust.160903.
- BAI Di, TIAN Mao, and CHEN Xiaoli. Modulation module design with the adaptive multi-objective optimization technique[J]. *Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 44(9): 11-15. doi: 10.13245/j.hust.160903.
- [44] 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(4): 1000-1008.
- YANG Hongbing, ZHOU Jianjiang, WANG Fei, *et al.* Characterization parameters of warplane RF stealth and analysis of its affecting factors[J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2010, 31(4): 1000-1008.
- [45] 肖永生, 周建江, 黄丽贞, 等. 机载雷达射频隐身的空域不确定性研究与设计[J]. 现代雷达, 2012, 34(8): 11-15. doi: 10.3969/j.issn.1004-7859.2012.08.003.
- XIAO Yongsheng, ZHOU Jianjiang, HUANG Lizhen, *et al.* Study and design of spatial domain uncertainty of airborne radar RF stealth[J]. *Modern Radar*, 2012, 34(8): 11-15. doi: 10.3969/j.issn.1004-7859.2012.08.003.
- [46] 杨宇晓, 左瑞芹. 基于混沌序列的射频隐身跳频周期设计方法[J]. 航空兵器, 2016, (5): 34-38. doi: 10.19297/j.cnki.41-1228/tj.2016.05.007.
- YANG Yuxiao and ZUO Ruiqin. A design method for hopping cycle of RF stealth based on chaotic sequences[J]. *Aero Weaponry*, 2016, (5): 34-38. doi: 10.19297/j.cnki.41-1228/tj.2016.05.007.
- [47] 杨宇晓, 汪飞, 周建江, 等. 跳频周期和跳频间隔的最大条件

- 熵射频隐身设计方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(4): 841-847. doi: 10.11999/JEIT140892.
- YANG Yuxiao, WANG Fei, ZHOU Jianjiang, *et al.* RF stealth design method for hopping cycle and hopping interval based on conditional maximum entropy[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(4): 841-847. doi: 10.11999/JEIT140892.
- [48] 梁晓龙, 孙强, 尹忠海, 等. 大规模无人系统集群智能控制方法综述[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(1): 11-16. doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2015.01.003.
- LIANG Xiaolong, SUN Qiang, YIN Zhonghai, *et al.* Review on large-scale unmanned system swarm intelligence control method[J]. *Application Research of Computers*, 2015, 32(1): 11-16. doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2015.01.003.
- [49] 何杰. 飞机射频隐身性能评估指标研究与软件实现[D]. 南京航空航天大学, 2016.
- HE Jie. Research on aircraft RF stealth performance evaluation indexes and simulation system implementation[D]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [50] 蔡茂鑫, 舒其建, 李勇华, 等. MIMO 雷达射频隐身性能的评估[J]. 雷达科学与技术, 2013, 11(3): 267-270. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2013.03.008.
- CAI Maoxin, SHU Qijian, LI Yonghua, *et al.* Evaluation of RF stealth performance of MIMO radar[J]. *Radar Science & Technology*, 2013, 11(3): 267-270. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2013.03.008.
- [51] 何召阳, 王谦喆, 宋博文, 等. 雷达信号波形域射频隐身性能评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(10): 2234-2238. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2017.10.12.
- HE Zhaoyang, WANG Qianzhe, SONG Bowen, *et al.* RF stealth performance evaluation method for radar signal waveform[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 39(10): 2234-2238. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2017.10.12.
- [52] 何召阳, 王谦喆, 宋博文, 等. 基于模糊评价的雷达射频隐身性能多域联合评估方法[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2017, 18(3): 70-76. doi: 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.03.007.
- HE Zhaoyang, WANG Qianzhe, SONG Bowen, *et al.* Multi domain joint fuzzy evaluation method for RF stealth performance of airborne radar system[J]. *Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition)*, 2017, 18(3): 70-76. doi: 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.03.007.
- 王谦喆: 男, 1978 年生, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为通信与信号处理.
- 何召阳: 男, 1990 年生, 硕士生, 研究方向为电子系统综合化工程.
- 宋博文: 女, 1994 年生, 硕士生, 研究方向为高光谱遥感、图像处理.
- 李寰宇: 男, 1984 年生, 博士, 讲师, 主要研究方向为射频隐身、航空集群.