

通用LPI射频隐身控制技术研究

四川九洲电器集团有限责任公司 孟小粟

【摘要】根据对典型机载射频传感器辐射方式，以及不同辐射特征对射频无源侦察系统的影响分析，多域多方面地探讨缩减或控制机载有源传感器对外辐射信号射频特征的技术方法。

【关键词】低截获技术（LPI）；射频隐身控制；能量域；空域；时域；频域；波形设计；辐射功率控制；辐射时间控制

一、引言

随着世界新军事革命深入发展，武器装备远程精确化、智能化、隐身化、无人化趋势明显。在未来开放对抗的战场中，机载有源辐射传感器应用的电磁环境具有辐射源多、目标分布密度大、分布范围宽、信号交叠严重等特点，且舰载、空中、岸基的先进无源探测系统接收的覆盖范围、灵敏度、情报共享能力逐步提高，对机载设备的作战能力和生存能力形成严重威胁。因此，机载设备的射频隐身设计需求越来越迫切。

射频隐身设计应包括无源目标特征缩减和有源目标特征缩减两大部分，相应的技术分别为低可探测性（LO）技术和低截获概率技术（LPI）。①低可探测性（LO），就射频隐身而言，低可探测性首先考虑的天线设计，即是与机体共形设计，并具有宽带隐身特性。②低截获概率技术（LPI），即是主动减少机载平台电子装备的辐射能量、时间、覆盖、频率等多方面特征，降低敌方先进无源探测系统的截获性的技术。

本文主要研究如何保证平台辐射信号的低截获性（LPI）。要获得尽可能低的LPI，一是从能量域、空域或时域直接减少辐射源的发射功率以降低信号被能量检测系统检测到的概率或距离，二是通过丰富辐射源信号的信息量（频域、时域、脉内、处理等）的手段来增大辐射信号的不确定性，从而提升电子侦察截获、分选、识别、定位信号的难度。

目前国内的研究主要借鉴了电子对抗的部分技术以及美军射频隐身控制技术，在天线和波形设计方面，采用空域、频域、时域的技术手段，降低辐射源信号被ESM、RWR和ELINT截获的概率，从而应对电子情报搜集、电子干扰以及反辐射导弹攻击。

二、研究内容

射频隐身控制技术是在保持武器平台射频有源传感器任务性能的前提下，减缩、控制其工作时辐射信号的射频特征，实现其射频辐射信号的低截获性或不确定性，以降低无源侦察设备对其截获、分选、识别和定位的能力。

根据对典型机载射频传感器辐射方式，以及不同辐射特征对射频无源侦察系统的影响分析，下面将从能量域、空域、时域、频域、波形设计和天线极化六个方面，探讨缩减或控制机载有源传感器对外辐射信号射频特征的技术方法。

（1）能量域——减少对外辐射功率

从能量域来说，主要考虑如何在保证有源传感器功能性能的前提下，减少其向外辐射的功率，包括实现辐射功率最小化的方法和控制的策略。

最小化辐射功率的研究方法：研究控制有源传感器辐射功率，使其处于功能实现所需最小能量状态的方法。从分析影响传感器辐射功率的因素（如距离、飞机姿态、工作模式等）出发，研究有源传感器辐射功率控制的范围、步进、误差以及实现方式等内容。

辐射功率控制策略：从系统控制策略上研究功率控制的实现原理，分为基于相对位置的策略、基于信号能量的策略以及基于位置-能量的联合策略。基于相对位置的策略是指根据先验信息或通过传感器探测获得平台与目标的相对位置和距离，再根据传感器自身天线反馈参数控制辐射功率使其与距离相匹配；基于信号能量的策略是指不依赖位置信息，仅依靠接收到的信号强度，通过控制辐射功率，使其接收信号能量刚能满足功能要求；位置-能量联合策略是以上两种策略的综合。策略的制定受位置信息的获取方式、自适应控制收敛条件、协同系统内收发链路一致性误差、非协同系统处理算法估计误差等影响。

（2）空域——缩减信号在空域中覆盖范围

从空域来说，主要研究缩减有源传感器向外辐射信号的覆盖范围的方法。减少辐射信号空域覆盖从根本上来说控制信号辐射方向，使其仅覆盖目标所在空间。考虑到各有源设备的工作体制和基于平台的工程实现，对天线阵来说，即是尽可能的压窄主瓣波束宽度和降低副瓣电平，或在特定方向上实现波束零陷；对单独振子的天线来说，即是采用空间分集、定向辐射的技术，缩减信号在非必要方向上的辐射。

（3）时域——缩减辐射时间或控制辐射时机

从时域来说，在辐射功率一定的情况下，辐射时间决定了辐射能量的大小，合理地管理辐射时间也是提高射频隐身性能的有效途径，无源的接收机总需要一定的处理时间才能完成未知信号的积分，从而提取信号特征用以完成分类和识别，而辐射源一方面可以减少发射时间，让无源接收机没有足够的时间完成积累，另一方面可以无序、随机的触发辐射，在时域上躲避无源接收的时间窗口，增大其根据时域规律捕获、分类信号的难度或成本。

（4）频域——缩减和控制频谱特征

频率控制策略的研究内容就是通过选取合适的工作频率和带宽降低敌方无源探测器截获概率。虽然意料之外的频段内发射信号可能出奇制胜，但是必须假定敌方具备通过侦查和利用已获得的有用资源来发现这个频率的能力。从LPI的角度出发，频谱控制最优的策略就是发射信号能够占据任务期间全部的工作频段，使每个单位时间和单位频率被探测到得峰值功率最低，以防止敌方无源探测器的对频率的长期积分，从而截取信号进行探测。换言之，隐身系统不允许对频率的长期积分，必须迫使敌方无源探测器去侦查产生最高虚警率和最低探测率的最大的频率范围。

最优频率控制策略的准则是覆盖所有工作频率波段，但实现这一目标并不能总与有源探测设备的最佳性能相匹配。从考虑得到大带宽的同时使硬件复杂度最小条件出发，常用的频率控制策略有频率分集技术和扩频技术。

（下转封三）

(上接第208页)

频率分集技术：就是在多于一个的载频上发射信号，这样处理相当于扩展了信号的发射带宽，增加了传输信号频率的复杂度特征，从而减小了敌方无源探测器对信号频率的积分，降低了截获概率。常用于射频隐身的频率分集技术包括跳频技术、层叠频率发射、同步发射与接收、层叠发射和同步发射与接收的组合。

扩频技术：是使用的传输带宽比要求的最小信号带宽大几个数量级。扩频信号的设计包括编码和伪随机两个要素，编码可以增加信号冗余度，减小信息密度；而伪随机序列扩频使发射信号看上去很像噪声，使得指定接收机之外的其他接收机很难解调。解调难度的增加和发射信号峰值功率的降低，使得敌方无源探测器难于从背景噪声中对信号进行检测、分类、识别和定位。常用的扩频技术有直接序列扩频（DSSS）、跳频扩频技术等。

(5) 波形域——LPI波形设计

LPI波形设计的目标就是通过扩展发射信号的波形特征集从而降低被敌方无源探测器探测的概率。脉冲压缩是低截获概率信号设计中的关键，其发射信号是采用编码形式的宽脉冲信号，接收和处理可输出窄脉冲。脉冲压缩波形采用频率调制和相位调制的混合波形设计信号，把频率调制技术和相位编码技术组合在一起。保留了频率调制技术和相位编码技术的特点，可以在获得大的时宽带宽积和处理增益的同时，增加发射信号的复杂度，降低了被敌方截获的概率。满足LPI波形的设计中选择大的带宽满足距离分辨率的首要需要，并通过编码的混合调制方式获得了所需的模糊函数特性。

(6) 极化域——变极化处理

空间中的电磁波可由幅度、相位、频率以及极化等参数作完整的表达，极化主要表现电磁波的矢量传播特性。极化特征是指天线在其最大辐射方向上，电场矢量的取向随时间变化的规律，根据该轨迹分为线极化波、圆极化波、椭圆极化波等。在通信中，发射端的极化与接收端极化需要尽量保持一致，这样电磁波由于极化损失的能量才最低，才能保证通信距离最远，若发射端与接收端极化不匹配，例如发射端为垂直极化波，而接收端为水平极化波，会造成电磁波极大的极化损失。该技术可应用到射频隐身技术上，对已知的敌无源侦察设备的极化方式，采用最大极化损失的方式避免敌方截获。

目前对于极化的研究主要呈现以下几个方向，极化特性研究、极化测量的研究、极化滤波、虚拟极化的等多个方面。

三、采用的技术途径

基于上文分析，从传感器射频隐身的影响因素入手，拟采用熵函数对辐射特征六域的进行表征。由于不同传感器在频域、波形、极化、空域的控制方法不同，而时域和能量域属于射频隐身控制的通用技术，下面从通用技术手段（功率、时间）的约束条件进行分析。

1. 辐射功率控制（能量域）

机载有源传感器功率控制方法的约束条件有隐身性能、能量影响因素、控制范围、步进、误差、实现方式等。从分析影响传感器辐射功率的因素（如距离、飞机姿态、工作模式等）的出发，优化功率控制的范围、步进、误差以及实现方式。

(1) 能量影响因素

①对辐射功率影响最大的因素是距离，距离影响主要是分析空间衰减值；②飞机姿态对辐射功率的影响主要表现在飞机大动作在非必要方向上的能量泄漏，以及天线增益的变化；③大部分传感器的发射功率会随工作模式变化而变化，需考虑不同工作方式对功率管理影响。

(2) 辐射功率控制范围

空间路径衰减与距离是对数关系衰减，针对不同的传感器系

统，不管是协同系统还是非协同系统，对其进行功率控制时，必然存在一个不再需要进行控制的距离，即辐射功率控制范围。

(3) 辐射功率控制步长及误差

辐射功率控制步长主要受到目标距离的影响，我们希望辐射功率控制后，所辐射的信号在到达目标或经目标反射回传感器，能恰好满足系统工作的接收灵敏度要求。分析不同步长的辐射距离变化情况，发现：当目标处于远距离时，若采用较大的步长则辐射距离变化太大，不符合恰好覆盖目标的需求，此时应采用较小的步长；当目标处于近距离时，若采用较小的步长则辐射距离变化太小，不能快速的控制到合适的档位，此时应采用较大的步长。因此，需根据目标所在距离，设计得到一个能够动态控制的控制步长，既不使功率控制时辐射距离变化太大，又能够快速达到合适档位。

在实际工程中，控制步长及误差值的设计主要根据功放器件能够达到的步长及误差决定，同时需要考虑输出功率达到稳定收敛状态所需的时间。控制方法及器件的不同，造成的步长及误差不同。

(4) 辐射功率控制方法

针对有源辐射传感器对发射机输出功率管理的需求，在线监测输出信号的波形和幅度，自适应调整功放的工作状态，实现对射频脉冲信号功率和波形的自适应控制，减小高低温工作环境和宽带工作引起的输出波形和输出功率变化，提高功率程控的精度，提高功放效率和线性度。可以利用连续反馈方式（自动幅度控制技术）、程控衰减器、放大器栅压等方式来实现辐射功率控制。

(5) 功率控制策略

功率控制策略分为基于相对位置的策略、基于信号能量的策略以及基于位置-能量的联合策略。基于相对位置的策略是指根据先验信息或通过传感器探测获得平台与目标的相对位置和距离，再根据传感器自身天馈参数控制辐射功率使其与距离相匹配；基于信号能量的策略是指不依赖位置信息，仅依靠接收到的信号强度，通过控制辐射功率，使其接收信号能量刚能满足功能要求；位置-能量联合策略是以上两种策略的综合。策略的制定受位置信息的获取方式、自适应控制收敛条件、协同系统内收发链路一致性误差、非协同系统处理算法估计误差等约束。

(6) 辐射时间控制（时域）

对机载有源传感器进行辐射时间进行控制和管理，在保证功能及性能的前提下对传感器的工作方式、工作模式、有效参数进行辐射最小时控制策略和辐射最佳时机控制策略。

(7) 辐射最小时控制策略

从优化辐射模式、组合、处理算法的角度，提高传感器性能指标，为辐射次数的减少提供前提，在保证传感器功能性能的前提下，尽可能的减少向外发射信号的次数。

(8) 辐射最佳时机控制策略

根据目标状态、载机姿态等因素综合设计任务的发射触发时机，减少因非系统因素影响而造成的无效辐射；同时对辐射信号的触发时序开展仿真验证设计，通过无序、随机的触发方式增大信号序列熵。

四、结束语

本文讨论的机载有源辐射传感器的射频隐身控制技术研究，覆盖能、时、频、空、波形、极化等多个领域，从理论分析角度介绍了多领域缩减或控制对外辐射信号射频特征的研究方向和技术方法。进一步介绍了辐射源的发射功率管理、辐射时间管理、抗截获波形设计等的设计思路，为射频隐身控制技术的研究提供了参考。