

低截获概率波形在战术数据链中的应用研究

金旭东

江南机电设计研究所 贵州 贵阳 550009

【摘要】：随着现代战场电磁环境的日益复杂和电子侦察和干扰技术不断更新，低截获概率波形依靠优化信号时频域特征，可显著减被敌方截获和识别几率，是提高战术数据链生存能力的重要技术。本文主要对低截获概率波形的基本原理、技术特点进行分析，结合战术数据链的应用场景形成典型低截获波形的适配方案，通过性能对比和搭建典型场景验证，研究该技术在提高数据链射频隐身能力方面的核心价值。

【关键词】：低截获概率波形；战术数据链；抗截获通信

DOI:10.12417/3041-0630.26.06.057

1 引言

随着无源探测、频谱分析、信号分选等电子对抗技术的不断升级，敌方对通信信号的截获距离、识别精度越来越高，传统的数据链通信安全受到严重威胁。在这种情况下，低截获概率（Low Probability of Intercept, LPI）波形技术随之产生，利用时域、频域、空域、码域多维优化来减小信号的可检测性，实现信号在可靠通信的前提下被截获概率。将低截获概率波形用到战术数据链上，可以削弱数据链射频辐射特征，缩短敌方截获距离，提高数据链在复杂对抗环境下的抗截获能力。本文根据战术数据链的工作特点和战场需求，对LPI波形的主要设计原理和技术优势进行分析，整理出主流的波形类型及其适用方案，通过典型场景模拟测试来检验其应用效果。

2 LPI波形核心原理与技术特性

2.1 LPI波形核心内涵

LPI波形的主要设计目的，是使己方可靠通信的同时，尽量减小敌方对信号的检测、截获、识别和干扰概率。本质是通过信号体制优化，降低信号的功率谱密度，模糊信号特征参数，使信号隐藏在战场背景噪声和杂波之中，使敌方无源侦察设备无法有效地捕捉到信号特征，从而达到射频隐身的目的。

2.2 核心技术特性

LPI波形的核心技术特性主要包括：（1）低功率谱密度特性，利用扩频、宽带调制等手段把信号能量散布到宽频带内，减小信号功率谱密度，使敌方侦察设备很难从噪声中分辨出有用信号。（2）特征不确定性，通过伪随机序列、跳频、调制跳变等技术，随机变化信号频率、相位、码型、脉冲间隔等参数，使敌方无法通过特征匹配来完成信号分选和识别。（3）短时突发传输特性，用脉冲突发模式缩短信号单次发射时长，控制信号占比，减少信号在空域的暴露时间，降低敌方截获接收机的捕捉概率。

2.3 典型LPI波形类型及特性对比

目前适配战术数据链的LPI波形主要有扩频类、宽带调制类和混合波形，各类型波形的主要特性及适配场景如下表所示。

表1 LPI波形类型及特性对比

波形类型	核心技术	带宽特性	低截获性能
直接序列扩频波形	高速伪随机码扩频，相位编码	宽带，带宽远大于信号速率	优良，功率谱密度低
跳频扩频波形	伪随机频率跳变，快速频率切换	窄带跳变，整体覆盖宽频域	优秀，抗截获、抗干扰均衡
混合扩频波形	直扩+跳频联合，多维编码	超宽带，时频域联合优化	最优，多维隐蔽特性

混合扩频波形结合直扩和跳频的双重优势，低截获性能和抗干扰性能最好，是新一代隐身战术数据链的首选波形；跳频扩频波形的难度适中、兼容性强，适合于现有数据链的升级改造；直接序列扩频波形传输稳定性好，适合远距离、低速率的战术指令传输。

3 LPI波形在战术数据链中的应用设计

3.1 战术数据链对LPI波形的核心需求

战术数据链应用场合多种多样，不同的场景对于LPI波形的基本需求主要有：第一，隐蔽性优先，在高对抗战场环境之下，首先保证信号不被截获、平台不被定位；第二，可靠性兼顾，低截获设计不能因为过分牺牲通信质量而降低战术数据的准确性；第三，实时性适配，适应数据链短时、突发、高速的传输特点，满足实时态势共享和指令交互的要求；第四，兼容

性好,可以适配现有的数据链硬件平台,降低升级改造的成本;第五,自适应可调,可以根据战场电磁环境的变化来改变波形参数,以适应不同的对抗强度。

3.2 波形与数据链系统融合设计要点

3.2.1 发射波形优化设计

为达到发射信号的低截获设计,发射端主要作用就是减弱信号的辐射特性。首先根据通信距离和信道环境动态调节发射功率,用最小功率满足通信要求,防止功率冗余造成信号暴露;其次选择连续相位调制、伪随机相位编码等恒包络调制方式,避免信号峰均比过高引起特征明显;同时优化脉冲结构,采用短脉冲、随机间隔的猝发模式,缩短信号暴露时间。

3.2.2 接收解调与同步设计

LPI 波形信号功率小,接收端须具备弱信号检测和快速同步的能力。对于低截获波形信号解调与同步设计,可使用基于伪随机码的相关解调技术来提高弱信号下的解调灵敏度,用提前预置的同步序列和跳频图案来达到快速载波同步和码同步的目的,避免因同步时间过长而增加信号截获的风险。

3.2.3 波形参数自适应调度

根据战场电磁态势感知的结果来建立波形参数自适应调度机制,动态地改变波形类型、扩频码长、跳频速率、发射带宽等参数。低对抗环境用常规低截获波形,通信效率和隐蔽性兼顾;高对抗、强干扰环境切换到混合扩频波形,提高低截获、抗干扰能力;隐身突防场景使用超低功率猝发波形,尽量缩短敌方截获距离。

3.3 典型作战场景应用方案

3.3.1 隐身作战平台数据链应用

隐身作战平台对射频隐身要求很高,传统的数据链信号很容易暴露其位置,需要使用混合扩频低截获波形,配合窄波束定向天线和超低发射功率来降低信号截获概率。波形采用超宽带直扩和高速跳频相结合的方式,跳频速率大于敌方侦察设备扫描速率,信号功率谱密度小于战场噪声,敌方无源探测设备不能有效检测信号,从而实现隐身突防。

3.3.2 地面战术组网数据链应用

地面战术组网存在多径衰落、电磁干扰繁杂等情况,采用跳频扩频低截获波形,配合自适应功率控制和信道编码技术,可以保证组网通信的可靠性并减少地面侦察设备截获信号的可能性。

3.3.3 无人集群协同数据链应用

无人集群作战节点数量多、分布范围广、通信时延低,用

线性调频低截获波形配合短时猝发传输模式来实现集群内的高速、隐蔽通信。波形具有恒包络、低截获、抗多径的特点,可以实现多节点并行通信,避免集群内信号干扰,用波形参数的统一调度来达到集群整体射频隐身的目的。

4 应用性能测试与效果分析

4.1 测试环境与指标设定

为了检验 LPI 波形在战术数据链上的实际应用效果,搭建了如下图所示的模拟战场电磁环境测试系统,测试场景包含低对抗、中对抗、高对抗三种电磁环境,对传统常规波形和低截获概率波形的截获距离等指标进行了比较。测试条件为通信距离 10km-100km,信噪比范围-10dB 到 20dB,模拟敌方无源侦察设备灵敏度-90dBm。

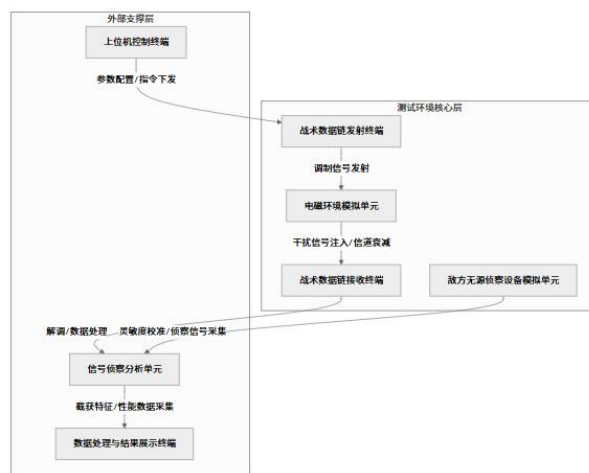


图1 系统框图

4.2 测试结果与分析

截获距离是反映平台射频隐身的核心指标,测试在低/中/高对抗三种场景下,固定发射终端发射功率等参数,记录无源侦察设备成功检测并定位信号的最大距离,关键测试数据如下表所示。

表2 两种波形截获距离测试数据对比

对抗等级	信噪比 (dB)	传统常规波形截获距离(km)	低截获混合扩频波形截获距离(km)	截获距离缩短比例	截获因子 (LPI 波形截获距离/常规波形)
低对抗	20	92	21	77.17%	0.23
中对抗	10	85	18	78.82%	0.21
高对抗	-10	72	15	79.17%	0.21

在各对抗等级与信噪比下,低截获混合扩频波形的截获距离均远低于传统常规波形,平均截获距离缩短比例达77%以上,且截获因子始终小于0.3,说明LPI波形在复杂战场环境下的信号隐蔽性更稳定,可有效避免作战平台在高对抗场景下被敌方侦察设备发现。

4.3 工程应用短板分析

低截获概率波形在战术数据链的应用中仍然存在一些不足,一是频谱资源占用大,宽带扩频波形要占用较多频谱,在频谱资源紧张的战场上容易和其它电子设备发生频谱冲突;二是同步精度要求高,跳频、混合扩频波形对收发端同步精度要求很高,在复杂的信道环境里容易造成同步失锁的情况;三是硬件成本高,高性能低截获波形需要高速信号处理芯片和宽频带射频模块,硬件投入大;四是多波形兼容性差,影响新型低截获波形和常规数据链波形之间组网通用性。

4.4 发展趋势展望

未来LPI波形在战术数据链的应用将会是智能化、一体化、

多维化的。一是智能化波形设计,用深度学习技术实现波形参数的自主感知、决策与优化,实时适应战场电磁环境的变化;二是探通一体化波形,设计探测和通信功能一体化低截获波形,提高作战平台射频资源利用率;三是多维域联合隐身,时域、频域、空域、码域、极化域多维优化,打破传统波形设计的限制,达到极致射频隐身的目的。

5 结论

战术数据链是现代联合作战的信息生命线,在高烈度电磁对抗条件下,加强其抗截获性是保证作战成效的关键手段。低截获概率波形依靠多维信号特征的改善,大幅度缩短了敌方截获的距离,加强了数据链隐蔽通信的能力。本文通过理论分析和仿真测试,验证低截获概率波形在战术数据链中应用的可行性及优势。随着军事技术的发展,LPI波形将不断迭代升级,和各种新的通信技术紧密结合,成为战术数据链隐身化的重要技术手段,给战场信息安全保障赋予强有力支撑。

参考文献:

- [1] 彭润龙,王福来,崔畅,等.针对数字宽带接收机信号截获机制约束的低截获概率雷达波形设计方法[J].中国科学:信息科学,2026,56(01):216-236.
- [2] 宁晓燕,李书凯,孙志国,等.信息跳时架构下分层捷变低截获概率通信波形[J].哈尔滨工程大学学报,2023,44(04):664-672.
- [3] 郝志梅,孙进平,罗美方.基于复合频率编码的低截获概率波形簇设计[J].系统工程与电子技术,2021,43(11):3137-3143.
- [4] 杜江,娄光普.一种低截获概率靶载射频辐射源设计[J].舰船电子工程,2019,39(02):77-79+84.
- [5] 时晨光,董璟,周建江,等.飞行器射频隐身技术研究综述[J].系统工程与电子技术,2021,43(06):1452-1467.
- [6] 顾兵.一种抗转发式干扰的低截获波形优化设计方法[J].舰船电子对抗,2019,42(02):14-19+23.
- [7] 宫新玉,张友益.几种常用 AESA 多功能雷达低截获概率波形的仿真设计[J].舰船电子对抗,2016,39(06):5-12.