

复杂电磁环境下的 LPI/LPD 通信技术研究

冯 微¹, 杨仕平², 王 健², 郑晨熹²

(1.中国电子系统工程公司研究所,北京 100141; 2.广州海格通信集团股份有限公司,广东 广州 510663)

摘 要: 随着通信干扰技术的不断发展, 战术通信系统也将面对诸如阻塞干扰、跟踪干扰、录放干扰以及灵巧干扰等干扰手段, 如何对抗这类干扰手段, 提升无线通信的可靠性, 针对相应的 LPI/LPD 抗干扰技术进行了研究。

关键词: 无线通信; 抗干扰; 跳频通信; 扩频通信; LPI/LPD

中图分类号: TN925-34

文献标识码: A

文章编号: 1004-373X(2014)15-0020-03

Study on LPI/LPD communication technology under complicated EM environment

FENG Wei¹, YANG Shi-ping², WANG Jian², ZHENG Chen-xi²

(1. China Electronics System Equipment Engineering Corporation Institute, Beijing 100141, China;

2. Guangzhou Haige Communications Group Incorporated Company, Guangzhou 510663, China)

Abstract: With constant development of communication interference technology, tactical communication systems will be faced with various interference means, such as blockage interference, tracking interference, recording/playing interference, ingenious interference, etc. The corresponding LPI/LPD interference-free technology is studied in this paper to deal with the interference means and upgrade the reliability of wireless communication.

Keywords: wireless communication; interference-free; frequency-hopping communication; spectrum-spreading communication; LPI/LPD

目前,我国周边局部地区局势仍显紧张,迫使我国军事斗争策略要顺应新军事变革而积极调整与变化,要革命性地应用信息新技术,增强武器装备性能,提高部队的作战效能,“制电磁权”斗争已成为赢得战争胜利的关键。为保障作战部队在电磁环境高度复杂密集的现代战场上执行任务和机动作战,通信系统必须具备较强的电子防御能力;否则,作战编队通信一旦遭到干扰、压制和破坏,就会使指挥协同中断,中枢神经瘫痪,指挥控制失灵,使任何强大的兵力和先进的武器系统都无法发挥其应有的效能^[1]。因此,研究无线通信装备的低截获/低检测(LPI/LPD)技术具有重要的现实意义。

1 国外抗干扰通信发展趋势

随着用户话音、数据、视频等应用业务的日益增多,对无线传输带宽提出了更高的要求,在民用领域,出现了以WiMAX,LTE为代表的民用宽带通信系统,在军用领域,出现了以美军宽带网络波形WNW、单兵电台波形SRW为代表的军用宽带通信系统。从技术发展阶段来讲,军用宽带波形WNW/SRW与民用宽带波形WiMAX/LTE的对应关系如图1所示,他们都属于第四

代通信系统,其中WNW波形的最高速率达5 Mb/s,SRW波形的最高速率达2 Mb/s。

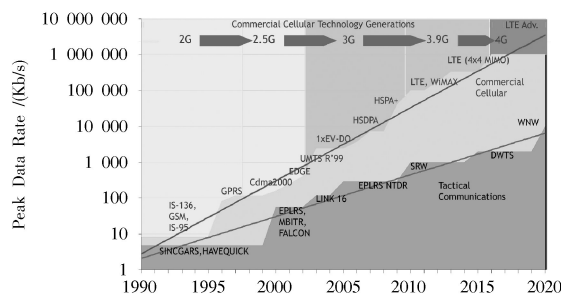


图1 美军宽带波形的发展趋势

就抗干扰能力而言,美军的宽带网络波形 WNW 与单兵电台波形 SRW 也根据应用环境,设计了多种工作模式,如图 2 所示,WNW 波形主要包括 OFDM 宽带模式、LPI/LPD 模式、AJ 模式、BEAM 模式;SRW 波形则主要包括 Combat Comms、LPI/LPD 模式、电子战模式。

2 LPI/LPD 技术简介

从抗干扰的侧重点来讲,低截获(Low Probability of Interception, LPI)与低检测(Low Probability of Deception, LPD)有所不同,其中 LPI 技术主要是确保信息安全,即使敌方知道我方在通信,但抓不住我方通信内容,

如图 3 所示,主要实现手段包括定速/变速跳频、跳时、直序扩频、混合扩频、调制变换等技术;LPD 技术主要是防止频谱暴露,让敌方不知道我方在什么时间通信,主要包括功率自适应、定向天线、散射通信等技术^[2]。

能力	WNW 波形	SRW 波形
最大数据传输率	5 Mbps	2 Mbps
工作模式	1) OFDM - 宽带波形 (传输效率高) 2) LPD/LPD - 低速率扩频波形 (Low data rate spread) 3) AJ - 宽带抗干扰波形 (传输效率低) 4) BEAM - 窄带应用	1) Combat Comms - 宽带波形 (传输效率高) 2) LPI/LPD - 无扩频特征波形 (Spread featureless) 3) Electronic Warfare - 宽带抗干扰波形
低功耗支持	SWAP 没有显著增强	基于最小能量的路由机制,功率自适应控制
信道接入方式	USAP/TDMA MAC and Routing	Hybrid CSMA/TDMA MAC and Routing
网络大小	最大可达 1630 个节点	最大可达 800 个节点

图 2 美军 WNW 波形与 SRW 波形的功能特点对比

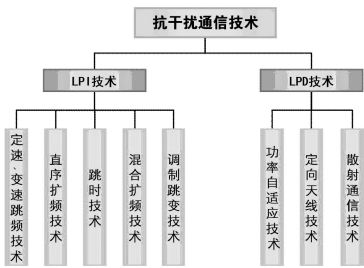


图 3 典型的 LPI/LPD 技术

3 LPI/LPD 抗干扰设计

海军战场环境是变化的,任何一种通信干扰措施的有效性都不是绝对的,必须根据实际情况,采取不同的策略。就装备使用而言,研究抗干扰措施,应从多方面考虑,一种抗干扰措施对某种干扰有效,而对另一种干扰则无效,而另一种干扰措施可能相反,如能将两种抗干扰措施结合,则抗干扰能力便会提高。例如 DS-SS (扩频)抗单频干扰和远近干扰能力较差,FH-SS(跳频)抗宽带干扰和中继转发式干扰较差;而 DS-FH 混合扩频调制却在抗单频干扰、宽带干扰和远近干扰、中继转发式干扰方面能力都很强^[3]。

针对上述各种干扰方式的特点,LPI/LPD 抗干扰通信波形的设计从技术体制角度而言,可从以下几个技术方面进行研究。

3.1 扩维通信技术

为了解决传统扩跳频通信面临的频带利用率低、抗干扰能力差的矛盾,扩维通信由同类技术的扩频通信延伸拓展而来。扩维是在扩频的基础上,让扩频图案携带信息,由单一的频域扩展拓展到任一正交基上的扩展,其具有天然的高频谱利用率;同时扩维通信利用小的瞬时维度和大的统计维度,达到了强的抗干扰能力,尤其是对抗灵巧干扰的能力^[4-5]。

扩维通信与广义的扩频通信信号在频域上都表现为占据很宽的频谱,但二者传送信息的机理有显著不同。以跳频和频域扩维为例,图 4 显示了两者的不同工

作原理。跳频通信中跳频图案由通信双方事先约定不携带任何信息,信息的传输在图中表示为不同的方格类型,跳频是通过在频点上调制不同的相位、幅度携带信息。频域扩维中不同的频点代表了信号不同的基(维),扩维一方面在频点上调制不同的相位、幅度,另一方面频点自身也是携带信息的,图中显示为不同的序号,这样在同样的带宽下就可以大大增加携带信息的能力。

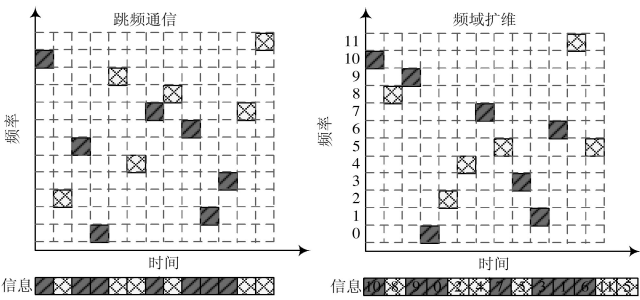


图 4 频域扩维与跳频工作原理比较示意图

对于空间信息传输,整个信号暴露在开放的电磁环境,跳扩频图案容易被电子侦察等手段获得,当通信双方的图案(基)暴露后,信号空间可以进行变换投影,其示意如图 5 所示。对于跳频通信信号投影到预定的图案上时,信号空间被压缩到一维。而对于频域扩维信号,由于占据了多个基,无论怎样变换投影,其信号维度保持不变。信号空间的差异将显著影响频谱资源的利用效益和抗干扰的能力。

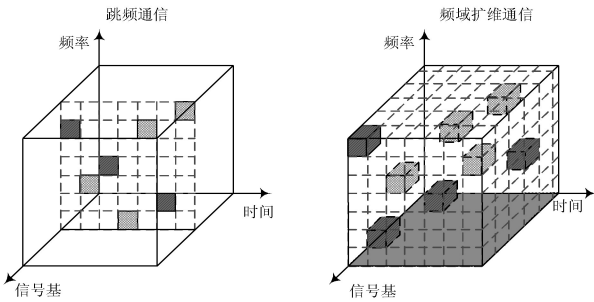


图 5 信号变换投影示意图

3.2 抗灵巧干扰通信技术

军用通信系统不仅要抗跟踪、阻塞干扰等,还要防止系统受到电子欺骗,即通过在消息中加入假消息,复制信息和错误信息实现欺骗的目的。当波形缺乏足够的捷变性和随机性时,将增大被截获和定位的可能性。敌方通过对发射信号和特征参数间(同步信号、脉冲类型、频谱、通信密度等)进行观测,充分利用暴露的同步信号等特性参数,实现“灵巧干扰”^[6]。

对抗灵巧干扰最有效的方法就是增强信号发送的不确定性,使其具有伪随机特性,包括发送时间的随机性,发射频率的随机性,发射信号特性的不确定。其中

发射频率的随机性可由随机跳频图案实现;发射信号特性的随机性可通过对信号的变换实现,例如对信号进行分数阶傅里叶变换,而且变换参数也是伪随机变化的;发射时间的随机性可通过初始抖动或跳时实现。初始抖动是对消息初始时间的随机化,即在一个时隙传输的开始阶段是一段随机可变的时延。这样可防止干扰方通过加大信号传输间隔,用峰值功率攻击信息的同步信息,减少了混入接收信号的干扰信号能量。

另一种发射时间随机化方法是跳时。跳时与跳频类似,所不同的是发射信号在时间轴上跳变。将时间轴划分为许多时间片,在一帧内哪个时间片发射信号由伪随机序列进行控制。由于采用较窄的时间片发射信号,相对而言,信号的频谱也就展宽了。

为了更好地抵抗灵巧干扰,需要综合适用多种随机化技术,TDMA 系统下的综合利用跳频+跳时的示意图。如图 6 所示,每一个时隙的发射频点不同(跳频),实现了频率的随机化;同时每一个时隙划分为多个更小的时间片,用户在时隙内伪随机选择某一个时间片发射信号(跳时),并且发射初始时间延迟是随机可变的(抖动),实现了时间的随机化。

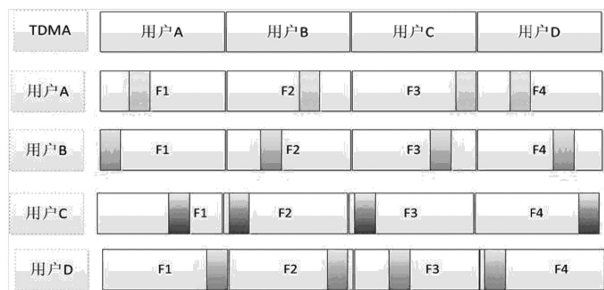


图6 跳频+跳时抗干扰设计示意图

将跳频图案相同的用户分为一组,组内不同用户每个时隙占用的时间片,初始时延抖动都各不相同,实现正交跳时。通过正交跳频和正交跳时,各用户互不影响的同时传输,也实现了时间、频率上的随机化,更好地抵抗灵巧干扰的影响。

3.3 信号调制特征跳变技术

该技术通过实时调整发射参数,如带宽、调制编码方式等,让敌方难以采用正确的解调解码方法获得信息,自适应调制编码技术在一定程度上可以达到上述效果;通过特殊的处理手段,改变信号的频谱和时域特征,使敌方无法正确判断信号类型,从而也就无法正确解析。目前提出了一种去扩频特征信号变换的抗截获技术,该技术通过同时改变原始信号的频域和时域特征,达到对原始波形调制信息的加密处理。该方法具有以下特点:对调制信号进行加密且不改变信号的3 dB带

宽;由多个参数确定,参数取值范围为整个实数区间,很难通过遍历搜索得到;变换的参数可以随时间变化动态调整进一步增大侦收的难度。如图 7 所示,可伪装其他的调制方式(可将 QPSK 信号通过去扩频特征信号变换变换成加噪声的 16QAM 信号);伪装成高斯白噪声(可将 QPSK 信号通过去扩频特征信号变换变换成为随机噪声);伪装成多径信号(可将 QPSK 信号通过去扩频特征信号变换变换成为多径信号)。

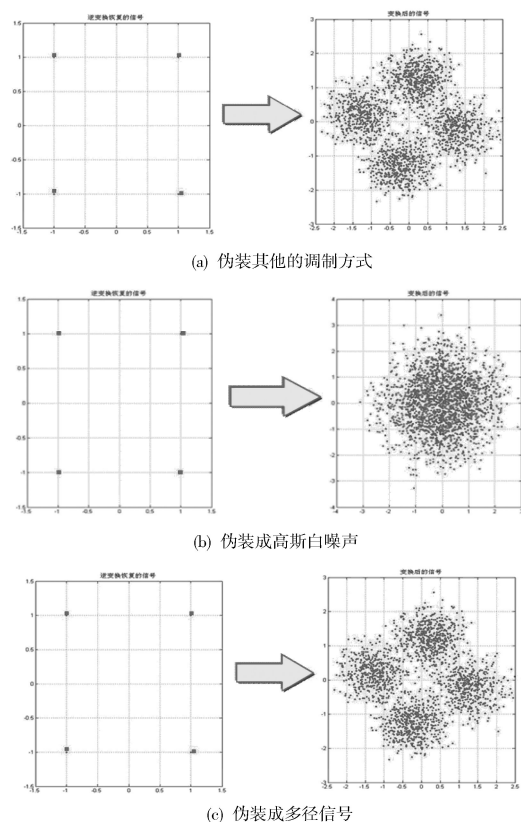


图7 信号调制特征跳变技术应用示例

3.4 功率自适应通信技术

LPD 技术主要防止频谱暴露,对小型化、低功耗电台而言,功率自适应控制是关键。功率自适应控制可在链路层、网络层或二层同时进行。

网络层功率控制:主要研究如何通过改变发射功率改变网络连通性和选择路径,侧重于提高网络吞吐率;网络层通常很长一段时间才进行一次调整,调整频率较低。

链路层功率控制:主要是发送节点根据当前信道条件和发送分组的目的地址调整无线发射功率,在确保数据传输可靠性的同时,侧重于降低网络能耗;链路层需要可能经常调整发射功率,甚至每发送一次分组就需要调整一次;链路层控制分组用最大功率发送,数据分组和 ACK 用最小必须功率发送。

混合功率控制机制:将网络层功率控制机制与链路

(下转第 27 页)

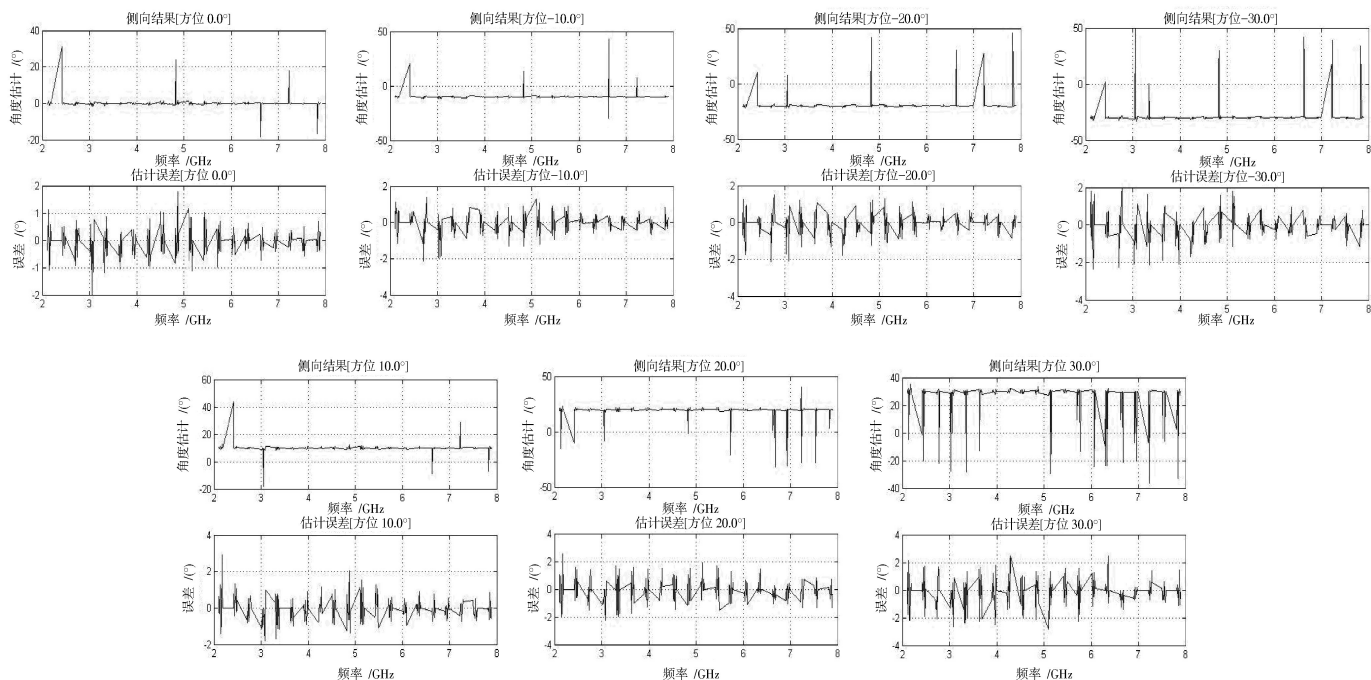


图7 测向试验数据统计图(7个方位全频段)

参 考 文 献

- [1] D C 施莱赫.信息时代的电子战[M].北京:电子工业出版社, 2000.
- [2] 毛虎,杨建波,刘鹏.干涉仪测向技术现状与发展研究[J].电子信息对抗技术,2010(6):1-6.
- [3] LINPSKY S E. Microwave passive direction finding [M]. USA:

John Wiley & Sons, 1987.

- [4] 龚享钦.基于相位干涉仪阵列多组解模糊的波达角估计算法研究[J].电子与信息学报,2006(1):55-58.
- [5] TSUI J B. digital techniques for wideband receivers [M]. 2 ed. [S.l.]: SciTech Publishing Inc., 2004.
- [6] 杨小牛.软件无线电原理与应用[M].北京:电子工业出版社, 2001.

作者简介:罗冰(1968—),男,高工。目前从事电子对抗系统技术方面的研究工作,发表论文多篇。

(上接第22页)

层功率控制两种机制结合起来,在发送数据分组时,MAC协议根据节点的距离和当前信道条件调整发射功率,每当分组到节点后,节点利用网络层的功率控制机制来调整网络拓扑和选择路由。

4 结 语

通信干扰与通信抗干扰是一对相生相克的矛盾,它们互相制约,但又互相促进发展,既没有攻不破的电子防御,也没有防不了的电子进攻。在电子战攻防中,关键是结合干扰的具体形式,在实战中应灵活运用各种对抗方法,在高技术条件下发挥出作战效能。


作者简介:冯微(1981—),女,河北保定人,工程师。主要研究方向为无线通信。

杨仕平(1974—),男,四川阆中人,高级工程师,博士。

参 考 文 献

- [1] 刘维国,张大禹.电磁兼容环境下舰艇通信频率指配研究[J].舰船电子对抗,2002,25(6):11-13.
- [2] 郑高谦.实现低截获概率雷达的技术途径[J].现代电子,2002(3):17-20.
- [3] 张艳芹,许录平,李剑.一种具有低截获特性的组合调制雷达信号[J].弹道学报,2006,18(3):90-93.
- [4] 葛跃田.自适应调制编码技术及其在移动通信中的应用[J].现代电子技术,2003,26(2):34-36.
- [5] PROAKIS J G.数字通信[M].张力军,译.5版.北京:电子工业出版社,2009.
- [6] 梅林,沙学军,冉启文,等.四项加权分数Fourier变换在通信系统中的应用研究[J].中国科学:信息科学,2010,40(5):732-741.

复杂电磁环境下的LPI/LPD通信技术研究

作者: [冯微](#), [杨仕平](#), [王健](#), [郑晨熹](#), [FENG Wei](#), [YANG Shiping](#), [WANG Jian](#), [ZHENG Chenxi](#)
作者单位: [冯微, FENG Wei \(中国电子系统工程公司研究所, 北京, 100141\)](#), [杨仕平, 王健, 郑晨熹, YANG Shiping, WANG Jian, ZHENG Chenxi \(广州海格通信集团股份有限公司, 广东 广州, 510663\)](#)
刊名: [现代电子技术](#) 
英文刊名: [Modern Electronics Technique](#)
年, 卷(期): 2014(15)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_xddzjs201415006.aspx