

doi: 10.7690/bgzd.2022.11.003

指控系统电磁干扰及应对措施分析

张律力¹, 刘建成^{1,2}, 王超¹

(1. 中国人民解放军 31634 部队, 昆明 611731; 2. 中国电科网络通信研究院, 石家庄 050081)

摘要: 针对指控系统遭到敌方实施的恶意干扰和系统内部产生互扰等问题, 以炮兵指控系统为例, 深入研究分析指控系统中不同电磁干扰的特征和产生机理, 进而针对不同类型干扰分析其有效的应对措施。结果表明, 该分析能为解决指控系统效能的电磁干扰提供一定的参考。

关键词: 指控系统; 炮兵指控; 电磁干扰; 恶意干扰; 系统互扰

中图分类号: TJ301 **文献标志码:** A

Analysis of Electromagnetic Interference of Command and Control System and Its Countermeasures

Zhang Luli¹, Liu Jiancheng^{1,2}, Wang Chao¹

(1. No. 31634 Unit of PLA, Kunming 611731, China;

2. Network Communication Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Aiming at the problems that the command and control system is subjected to the hostile interference and the interference inside the system, this paper takes the artillery command and control system as an example to deeply study and analyze the characteristics and generation mechanism of different electromagnetic interference in the system, and then analyzes the effective countermeasures for different types of interference. The results show that the analysis provides a certain reference for solving the electromagnetic interference of the command and control system effectiveness.

Keywords: command and control system; artillery command and control; electromagnetic interference; hostile interference; mutual interference in system

0 引言

对于任何时代的战争而言, 高效可靠的战场指挥都是作战胜利的基础, 而指挥控制系统正是实现战场上各要素、各单元互联互通, 保证战场指挥畅通的信息系统, 尤其在信息化战争时代, 指控系统在整个作战过程中的地位更加突出。

指控系统扮演了战场上“千里眼”“顺风耳”和烽火传信的角色, 其功能主要体现在战场信息采集、传输和处理等, 战场信息包含敌我态势、战场环境和战场指令信息等^[1]。为满足战场大量信息可靠、有效、实时且多向传输的需求, 一个典型指控系统的无线通信传输网络往往具有多套无线收发设备, 比如美军的一个陆军战术作战指挥中心, 通常配有 50 多部 UHF 通信设备, 40 多部 VHF 和短波 (high frequency, HF) 电台^[2]; 一般的舰载通信系统配有上百部各频段的无线通信设备^[3]; 英军研制的猎秘 (NIMROD) 系统装备有 HF 和 VHF 电台 11 部^[4]; 我军的炮兵指控系统也具有多辆通信指挥车, 而每辆车上配有多部工作在 HF 和 VHF 的电台, 以及车载

的卫星通信收发设备。

由于战场上是敌我双方的较量, 己方指控系统不可避免地面临敌方的攻击破坏, 而指控系统中最脆弱、最易受到敌方攻击破坏的就是无线通信传输网络, 敌方进行攻击破坏的方式以释放电磁干扰为主, 而不是进行物理摧毁^[5]。此外, 指控系统的无线通信传输网络还容易存在系统内的相互干扰问题^[6-7], 即系统内众多无线收发设备同车共址部署, 频率保护间隔有限, 发送设备对接收设备产生非恶意干扰。

对于无线通信系统的电磁干扰问题, 众多学者展开了不同层面的研究^[8-12]。文献[8]分析了防空兵通信系统的复杂电磁环境, 包括电磁干扰产生原因和现状等。丁可等^[9]从空域角度出发, 研究了天线阵列的抗电磁干扰技术, 采用特征值分解实现对天线阵元的优化控制。文献[10-12]从不同角度对导航和无线通信系统抗干扰措施和部分技术细节进行了描述, 给出了相应的抗干扰参考意见。

综上, 指控系统在作战应用过程中面临着复杂

收稿日期: 2022-07-23; 修回日期: 2022-08-26

基金项目: 国家自然科学基金(青年)项目资助(62001438)

作者简介: 张律力(1983—), 男, 江西人, 高级工程师, 从事炮兵指挥与控制研究。E-mail: 597718098@qq.com。

的电磁干扰，对于炮兵只有深入分析其指控系统面临的电磁干扰，研究对应的应对措施，才能充分保证炮兵作战效能的充分发挥；因此，笔者以炮兵指控系统为例，深入分析指控系统中不同电磁干扰的特征和产生机理，进而针对不同类型干扰分析其有效的应对措施等。

1 系统组成

如图 1 所示，炮兵指控系统组成包括打击目标和战场态势信息获取单元、侦察情报信息处理单元、作战方案制定与决策单元、打击毁伤效果评估单元和系统信息传输网络等^[13]。

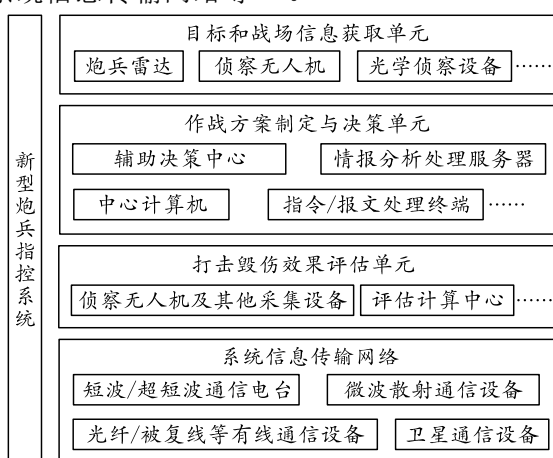


图 1 炮兵指控系统基本组成

系统中目标和战场信息获取单元主要是通过探测雷达、侦察无人机、光学设备、气象观测设备以及阵地侦察分队，获取需要打击目标的地理位置、兵力及装备情况以及整个战场的态势信息，为后续作战方案制定和打击行动决策提供可靠准确的信息支援。

作战方案制定与决策单元包括信息情报分析处理、指令/报文处理、辅助决策和整个系统的计算服务等，是整个指控系统的大脑，单元内组成了各个服务器、计算机和处理终端互联的局部有线网络，通过对侦察情报信息的融合处理以及预定作战计划的响应，最终制定可行性强的作战行动方案，对各打击单元下发行动方案和指令。

打击毁伤效果评估单元包括侦察采集设备和评估计算中心等，主要是对打击行动后敌方目标的毁伤情况进行侦察和评估，为作战方案制定与决策单元提供后续行动方案制定的情报信息支援。

系统信息传输网络由短波/超短波通信电台、微波散射通信设备、卫星通信设备以及光纤/被复线等有线通信设备构成，部署于不同指挥车、通信节点

车以及各打击单元阵地，是整个指控系统的神经网络，保证了系统各单元之间的互联互通。其中，有线通信设备主要用于同车内或近距离之间的信息传输，但现在炮兵相对于以往传统炮兵具有阵地覆盖范围广的特点，侦察设备、打击单元与指挥所之间通常情况下必须采用无线通信传输手段，所以无线通信网络的生存能力对整个指控系统效能发挥至关重要。

2 系统面临电磁干扰分析

炮兵指控系统的信息传输网络包括有线和无线 2 大类，有线传输网络部署于指挥所内或近距离阵地之间，不易受到敌方攻击破坏，但无线通信传输网络具有开放的传输信道，最易受到外界电磁干扰的影响，进而导致信息无法可靠有效传输，严重影响指控系统的作战效能发挥。对炮兵指控系统无线传输网络产生影响的电磁干扰主要分为系统内部的非恶意相互干扰和敌方实施的恶意干扰 2 大类，如图 2 所示。

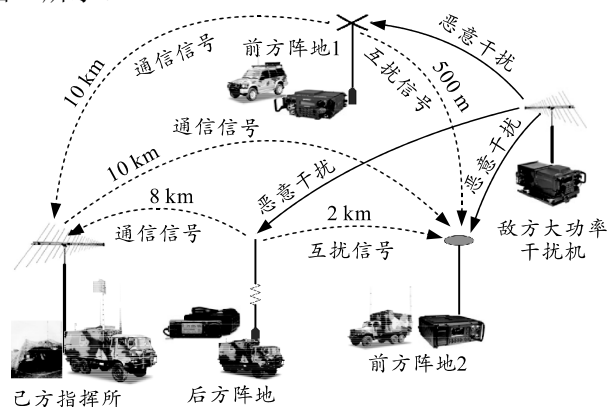


图 2 指控系统面临电磁干扰

2.1 系统内相互干扰

指控系统内相互干扰主要是因为同车或相距较近无线通信设备，在同时进行收发且频率间隔有限时，发射设备的大功率发送信号将影响旁边接收设备的正常工作。

20 世纪 80 年代美军装备部队的移动用户设备 (mobile subscriber equipment, MSE) 系统，虽然在海湾战争期间展现出良好的性能，但暴露出系统内电台相互干扰，不能够很好兼容工作的问题，因此美军研制了新一代联合战术无线电系统 (joint tactical radio system, JTRS)^[14]。同样，我军指控系统的无线传输同样面临着电台互扰问题^[6,15]，工作在同一部或相邻车上的多部电台邻道干扰严重，无法在相近频率处同时工作，极大地降低了战场频谱

利用效率，严重影响整个系统的效能发挥。

指控系统内无线通信设备间的互扰属于电磁互扰和电磁兼容问题，主要体现在以下方面：

1) 发射设备与接收设备工作频率碰撞或相邻。

由于频率配置的缺陷，系统内电台在跳频工作时跳频序列非严格正交，发生频率碰撞，或者相互之间无足够宽的保护间隔，发射设备对接收设备产生干扰，阻塞其正常通信。

2) 发射设备射频前端非线性易产生邻道干扰。

因无线通信设备射频前端混频、滤波和功放等器件的非理想特性，使得发送信号产生非线性失真，信号频谱拓宽，带外失真信号对相邻通道的接收设备产生干扰。当收发设备距离近、工作频率间隔较窄时，发射信号的带外分量强度与接收设备期望信号量级相当甚至更大，由于频率与期望信号相同，所以并不能被接收机带通滤波去除，从而影响接收机的正常工作，阻碍信息的准确恢复。

3) 频率保护间隔降低频谱资源利用效率。

当可用频段宽度一定，通过增加收发信道频率间隔减小带外干扰影响的方法，将降低频谱利用效率，限制集群内同时工作的设备数量，无法满足指控系统的高速率数据传输要求。

2.2 敌方恶意电磁干扰

除系统内无线通信设备间的互扰外，炮兵指控系统面临的敌方恶意电磁干扰，通常会対系统无线信息传输网络造成致命毁伤，导致指控系统无法正常运行工作。敌方实施的恶意电磁干扰类型复杂多变，是直接通过开放的无线传输信道对炮兵指控系统的无线通信接收设备实施干扰，严重影响接收端定时、解调和译码等信息接收处理，导致无法正确有效接收战场的侦察和指令等信息。敌方恶意电磁干扰属于信号层面的干扰，具有实施简单的特点，主要可分为压制式干扰和欺骗干扰 2 大类^[16]，如图 3 所示。

压制式干扰是敌方进行恶意电磁干扰最为常见的一种实现方式，具有实现简单且能够适用于指控系统中各种无线通信手段的优势。敌方的压制式干扰即通过发射大功率的电磁信号，使得我方指控系统无线通信接收设备天线耦合到强的干扰，其常见的信号类型主要有全频带噪声干扰、脉冲干扰、单/多音干扰、部分频带干扰和调频/调相干扰等。在干扰机功率不受限情况下，敌方会首选全频带噪声干扰，这种信号形式的干扰难以进行抵御和消除，将会对指控系统的无线通信产生严重影响。单音/多音等信号形式的干扰具有窄带频域范围内能量集中的特点，适用于敌方干扰功率有限的情况，在准确已知我方指控系统无线通信工作频率时，能够以较小的代价达到显著的干扰效果。对于敌方压制式干扰，主要应从功率和频域 2 个维度进行分析，通过研究不同信号形式干扰的影响，为后续干扰抑制和消除提供依据。

欺骗式干扰属于敌方实施的一种灵巧电磁干扰，能够以较小的干扰功率达到显著的干扰效果。目前针对指控系统无线通信的欺骗式电磁干扰主要考虑以下方面：1) 针对指控系统无线通信过程步骤中的各个特征实施干扰，相比于常规的不同信号形式的干扰，该干扰根据指控系统无线通信信号的调制、传输和解调等各个环节的特点，设计具有针对性干扰；2) 通过简单的转发处理，人为地在接收端引入大功率的多径信号，进而严重恶化指控系统无线通信设备接收性能，该种欺骗式干扰无需获取调制和编码方式等侦察信息，具有处理简单的优势，对于相对快速跳频系统具有较好的干扰效果。

3 干扰应对措施分析

针对炮兵指挥系统面临的复杂电磁干扰，分析其有效的应对措施是提升系统抗干扰能力，保证作战效能发挥的基础，对于指挥系统面临的互扰和敌方恶意干扰 2 大类电磁干扰，需要分别采取有效的应对措施。

3.1 系统互扰应对措施

目前对指控系统无线通信设备的互扰采取的有效应对措施，主要包括以下几类：1) 提高无线通信收发设备硬件性能，减小系统内互扰对接收设备的影响；2) 优化频谱资源规划调度，从而规避指控系统内无线通信收发设备间的互扰；3) 利用智能天线等技术抑制系统互扰；4) 采用自话应干扰对消等技

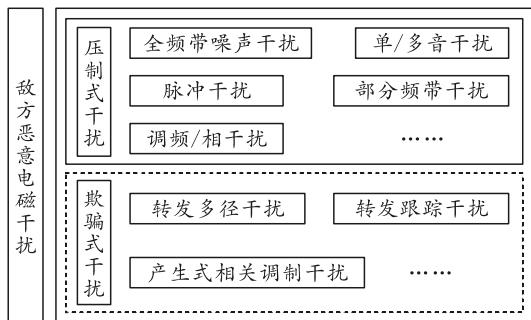


图 3 指控系统面临敌方恶意电磁干扰分类

术消除互扰。

通过提升无线通信收发设备硬件性能减小系统互扰的方法，主要是利用线性度强的功率放大器和截止频率过渡带宽窄的射频前端滤波器，增加接收设备对相邻频率发送信号的隔离度。该方法具有应用范围广、应用场景不受限的特点，能够适用于不同传输体制的无线通信设备。

优化频谱资源规划调度减小系统互扰的方法，是通过指控系统频谱资源的合理优化，保证近距离无线通信收发设备工作频率之间具有充足的保护间隔，进而避免大功率发射信号的带外失真对接收设备产生干扰。该方法需要综合考虑系统能够利用的频谱资源和系统内无线通信设备的数量，统一进行工作频段划分。

利用智能天线等技术实现指控系统互扰抑制，则是从空域的角度出发，采用方向性强的相控阵等智能天线，增加无线通信收发设备之间的隔离度减小相邻接收设备耦合发送设备的互扰信号强度，进而达到抑制系统互扰的目的。

自适应干扰对消方法，充分利用指控系统互扰是己方其他设备发送，且可有效获取发送信号详细先验知识的特点，在接收设备重构恢复系统的互扰信号，再通过反相对消实现互扰的有效消除。在 20 世纪，美军罗马航空中心 RADC 已经开始研制了应用于窄带通信的系统互扰自适应对消装置，国内也有不少科研院所展开了自适应干扰对消技术的研究。

3.2 敌方恶意干扰应对措施

炮兵指控系统无线通信传输对于敌方实施的恶意电磁干扰，同样可从空域、频域和信号处理域 3 个维度采取对应的抗干扰措施：空域应对敌方恶意电磁干扰的方法与系统互扰类似，主要是新型的智能天线技术；频域抗干扰方法主要包括扩频抑制和频点跳变规避 2 种实现方式；信号处理域消除恶意干扰是充分利用先进的信号处理技术，实现指控系统无线通信接收混合信号中恶意电磁干扰的有效抑制，以保证接收设备对信息的准确恢复。

频域抗干扰方法的扩频抑制和频点跳变规避 2 种方式，主要对应直接序列扩频 (direct sequence spread spectrum, DSSS) 和跳变频率 (frequency hopping, FH) 2 种传输体制^[12]。指控系统的无线通信采用扩频传输方式，是将发送信号频谱展宽，获得极低的功率谱密度，甚至是隐藏于噪声之下，当

恶意干扰与信号在频域重叠时，接收端通过解扩处理能够抑制干扰强度同时恢复出通信信号。该方式充分利用了恶意电磁干扰与通信信号不相关的特性，在具有隐蔽性的同时具有较好的抗干扰能力。

在采用 DSSS 扩频应对干扰时，利用扩频码解相关以扩展非同步信号的能量，同时将同步信号的能量压缩至原始带宽内，以达到压制电磁干扰提升信号强度的目的。该种扩频方式的抗干扰处理增益 G_p 转换为 dB 可表示为：

$$G_{p, \text{dB}} = 10 \log_{10} \frac{R_c}{R_b} \quad (1)$$

式中， R_b 和 R_c 分别为扩频前后的码片速率， R_c/R_b 即是扩频倍数。可见，指控系统采用 DSSS 扩频方式的抗干扰能力与连续干扰的样式无关，无论是宽带噪声、窄带噪声还是部分频带噪声和多音，最终的干扰效果均抬高了系统中无线通信接收机解扩之后的底噪。

进一步以 BPSK/QPSK 调制的 DSSS 系统为例，建立信噪比 SNR、干信比 JSR、处理增益 G_p 与误码率 P_e 之间关系 (注意 G_p 并非以 dB 表示)，可表示为：

$$P_{e, \text{BPSK}} = Q \left(\sqrt{\frac{2G_p}{10^{-\text{SNR}/10} + 10^{\text{JSR}/10}}} \right) \quad (2)$$

可见，假设 DSSS 系统干扰为宽带噪声干扰，则可通过改变扩频倍数，使得无线通信误比特率满足系统需求，即采取了有效的抗干扰措施。

跳变频率的抗干扰实现方式即常用的跳频传输，发送端将信号工作频率在很宽的频带范围内根据收发双方规定好的跳频图案不断改变，使得敌方无法获知系统无线通信的准确工作频率，进而无法实施与我指控系统通信信号重叠的干扰，达到抗干扰的目的。对于超短波电台常用的 MSK 调制，在跳频模式下抗干扰处理增益 $G_{p, \text{dB}}$ 可表示为：

$$G_{p, \text{dB}} = 10 \log_{10} \frac{W_{ss} \log_2 M}{MR_b} \quad (3)$$

式中： M 为信号调制阶数； R_b 为传输的比特速率； W_{ss} 为频率集覆盖的带宽。由该处理增益公式可知，跳频方式能够有效抵抗窄带噪声、单音、多音和部分频带等干扰。

另外，对于扩频和跳频 2 种实现方式的技术发展分别是增加传输扩频比和提升频率跳变的速度。

信号处理维度对恶意电磁干扰进行抑制是技术要求最高、最具有发展前景的抗干扰应对措施。目

前, 信号处理进行干扰抑制的技术手段包括基于傅里叶变换的频域陷波、SMART 自动增益控制、子空间映射盲分离和自适应编码调制 (adaptive coded modulation, ACM) 技术等。这些技术通过对接收信号进行限幅、频域变换、信号特征空间变换和高性能编码调制等处理, 能够在系统通信信号与干扰信号频域重叠情况下, 对干扰信号进行抑制或分离, 达到不同程度上改善无线通信传输性能的目的。

伴随着人工智能技术的发展, 指控系统抗干扰也必将朝着智能化方向发展, 在实现对电磁干扰环境的学习感知基础上, 获取电磁干扰的准确参数状态, 进而采取有效的智能扩、跳频传输方式和基于深度学习的信号处理抗干扰技术, 实现炮兵指控系统抗干扰能力的显著提升。

4 结束语

笔者着眼炮兵指控系统在复杂电磁环境下的作战效能发挥, 分析系统面临的复杂电磁干扰, 包括系统内互扰和敌方实施的恶意干扰, 进而在研究不同电磁干扰产生机理和特点基础上, 给出了相应有效的技术应对措施, 对提升炮兵指控系统抗干扰能力, 保障现代战场中新型炮兵打击力量的作战效能发挥, 具有重要意义。

参考文献:

- [1] 周海瑞, 李皓昱, 介冲. 美军联合作战指挥体制及其指挥控制系统[J]. 指挥信息系统与技术, 2016, 7(5): 10-18.
- [2] 黄剑明. 多信道互干扰的分析和处理方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- [3] LAW P E. Shipboard electromagnetics[M]. America: Artech House, 1987: 102-125.
- [4] 张新征. 美国陆军战术信息网络建设最新进展与编配运用[J]. 轻兵器, 2016, 1(7): 10-16.
- [5] 王汝群. 战场电磁环境[M]. 北京: 解放军出版社, 2006: 15-56.
- [6] 李奇蒲. 车载通信系统共址干扰分析及研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [7] ALLSEBROOK K, RIBBLE C. VHF cosite interference challenges and solutions for the United States Marine Corps' expeditionary fighting vehicle program[C]//In 2004 IEEE Military Communications Conference (MILCOM 2004). IEEE, 2004.
- [8] 王旭豪, 王文发, 黄星, 等. 复杂电磁环境下防空兵通信系统问题[J]. 兵工自动化, 2009, 28(5): 61-62.
- [9] 丁可, 康博, 张新帅, 等. 基于特征值分解的多阵元空频抗干扰技术研究[J]. 舰船电子对抗, 2021, 44(5): 72-74, 89.
- [10] 梅林, 鲍尧. GNSS 干扰分析及抗干扰技术综述[J]. 中国无线电, 2021(7): 58-60.
- [11] 薛灏勳. 关于无线通信干扰和抗干扰技术分析[J]. 数字通信世界, 2021(9): 137-138, 150.
- [12] 姚富强. 通信抗干扰工程与实践[M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [13] 李小全, 詹海洋, 程懿. 面向任务的炮兵行动指挥控制建模仿真[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(8): 34-37.
- [14] 尹亚兰. 战术数据链技术及在联合作战中的运用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 6-15.
- [15] 袁一鹏. 同车多电台电磁兼容设计[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2009.
- [16] 熊群力, 陈润生, 杨小牛, 等. 综合电子战: 信息化战争的杀手锏[M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2008: 78-128.