

程服务。平台开放化不仅能让企业降低数字化转型的门槛，无需投入大量资金搭建自有平台，只需依托开放平台的资源就能实现智能化升级，还能促进各类创新资源的整合与优化配置，推动产学研用金深度融合，让科研机构的技术成果能快速转化为实际生产力，第三方服务商能依托平台提供专业化服务，上下游企业能实现信息互通与协同联动。这种开放共享的生态圈，将推动工业互联网技术与智能制造的深度融合，提升整个制造业的数字化、智能化水平，实现产业协同发展。

4.2 边缘智能化：下沉算力实现即时响应

边缘智能化将成为工业互联网技术在智能制造领域的重要发展趋势，核心是将算力、算法以及数据处理能力下沉至生产现场的边缘节点，实现生产数据的本地实时处理与即时响应，解决传统云端集中处理模式下的延迟过高、带宽占用过大以及断网瘫痪等痛点。在智能制造持续发展的进程中，生产现场生成的数据量呈现爆发式增长态势。倘若把所有数据都传输到云端去处理，不仅会占据大量网络带宽，还会造成响应延迟，难以满足生产现场的实时控制需求。边缘智能化借助在生产车间布置边缘计算节点，把部分算力下沉到现场，使得边缘节点能够就近采集、分析并处理生产数据，及时下发控制指令，达成毫秒级响应。就拿 PCB 板缺陷检测场景来说，边缘 AI 方案的响应速度在 50ms 以内，远比云端 AI 300ms 以上的响应速度更具优势。与此同时，边缘节点还可以实现数据的本地缓存与筛选，仅仅把关键数据上传到云端，减轻网络带宽压力。而且在网络中断的情况下，边缘节点依旧能够独立运行，保障生产过程不会中断。未来，边缘智能化会与 5G、AI、TSN 等技术进行深度融合，进一步提升边缘节点的处理能力和智能化水平，实现生产现场的自主决策与自主优化，让智能制造系统拥有更强的敏捷性和可靠性。

4.3 安全内生性：筑牢工业可信防护墙

在工业互联网技术和智能制造深度融合的进程中，生产系统的网络化、智能化程度持续提高，数据泄露、网络攻击、设备失控等安全风险也相应增多，所以安全内生性会成为工业互联网技术的关键发展走向，其核心在于把安全能力融入工业互联网的整个生命周期，构建工业可信防护体系。过去的工业安全防护大多运用“被动防御”模式，也就是在安全事件发生之后才采取补救办法，这种模式已经不能满足智能制造的安全需要^[4]。安全内生性着重于“主动防御、全程防护”，将安全设计嵌入工业互联网平台搭建、设备接入、数据传输、应用开发等每一个环节，建立从设备安全、网络

安全、数据安全到应用安全的全方位、多层次安全防护架构。例如借助 OPC UA 协议的内置加密与身份认证机制，来保障数据传输的安全性；通过差分隐私加上区块链技术，实现数据可信共享，保护企业核心数据隐私；依靠边缘节点的本地安全防护，防范设备遭到非法入侵和控制。

4.4 知识模型化：沉淀工业机理复用库

知识模型化是工业互联网技术赋能智能制造的核心发展趋势之一，核心是将工业生产过程中的工艺经验、操作技巧、机理知识等转化为标准化、可复用的数字模型，沉淀形成工业机理复用库，实现工业知识的传承与高效复用，推动智能制造从“数据驱动”向“知识驱动”转型。在传统制造业中，工业知识多依赖于老员工的经验积累，存在传承困难、复用率低、易出错等问题，一旦老员工离职，相关知识就可能流失。工业互联网技术通过大数据分析、机器学习、数字孪生等技术，将分散在各个环节的工业知识进行提炼、建模，形成标准化的工业模型，包括工艺模型、设备模型、质量控制模型等，这些模型会被整合到工业机理复用库中，供企业随时调用^[5]。比如将汽车焊接工艺的参数、经验转化为数字模型，新员工可直接调用模型开展生产，快速掌握核心工艺；企业在优化生产流程、引入新设备时，也可调用复用库中的模型，减少试错成本。

5 结语

工业互联网技术向纵深推进的进程里，制造业价值创造逻辑正经历根本性重构。技术红利借助从单点设备互联到全产业链生态协同的演进路径，深入渗透进研发、生产、服务等各个环节。在全球产业变革浪潮中，只有把技术创新和标准体系建设不断推向深入，才能构建起具备自主可控、持续进化特征的智能制造业全新格局。

参考文献

- [1] 蒋蓓,赵卿,李凯,等. 基于工业互联网的智能制造装备协同控制技术[J].塑料包装,2025,35(03):135-137+309.
- [2] 张咪咪,吴建军.工业互联网与智能制造下自动化技术分析[C]//中国企业财务管理协会.2025年中国企业财务管理发展大会论文集.四川化工职业技术学院;四川省古蔺郎酒厂有限公司,;2025:229-231.
- [3] 袁礼伟,王耀南,谭浩然,等. 面向智能制造的自主可控工业互联网发展研究[J].中国工程科学,2025,27(03):38-53.
- [4] 欧玲,黄岚子. 智能制造与工业互联网的技术架构分析[J].集成电路应用,2025,42(04):402-403.
- [5] 胡蕊.工业互联网对制造企业开放式绿色创新的影响研究[D].哈尔滨理工大学,2025.

Theoretical Study on Multi-Station Anti-Fading for Shortwave Channels

Xue Dong Yimin Liu Bingkun Qin Zhu Jin Xiaoting Gu

China Radio Wave Propagation Research Institute, Qingdao, Shandong, 266100, China

Abstract

Based on a typical shortwave channel model, this study comprehensively considers multipath effects, fading characteristics, and time-varying channel properties during shortwave transmission. Using theoretical analysis as the primary research approach supplemented by computer simulations, we systematically investigate how key channel parameters, link configurations, and interference duration influence multi-station cooperative interference performance across various scenarios. Building upon these findings, we develop a joint interference channel evaluation model tailored for shortwave environments to enable quantitative analysis of cooperative interference performance. The study focuses on characterizing anti-fading capabilities under multi-station coordination, clarifying applicable conditions and operational boundaries for fading resistance. Additionally, we elucidate the fundamental mechanisms of multi-station cooperative interference suppression through theoretical analysis, derive corresponding quantitative analytical formulas, and validate the theoretical derivations, model accuracy, and formula validity via simulation experiments to ensure the reliability and practical applicability of research outcomes.

Keywords

shortwave channel; multi-station coordinated interference; signal power distribution characteristics; fading resistance performance introduction

短波信道多站抗衰落理论研究

董雪 刘毅敏 秦炳坤 金珠 顾晓婷

中国电波传播研究所, 中国·山东 青岛 266100

摘要

本文基于典型短波信道模型, 充分考虑短波传输过程中的多径效应、衰落特性以及信道时变特性, 以理论分析为主要研究手段, 结合计算机仿真进行补充验证, 系统探究不同链路组合场景下, 信道关键参数、链路数量、干扰时长等变量对多站协同干扰效果的影响规律。在此基础上, 构建适用于短波场景的联合干扰信道评估模型, 实现对多站协同干扰性能的量化分析, 重点刻画多站协同下的抗衰落能力, 明确多站抗衰落的适用条件与工作边界。同时, 从理论层面揭示多站协同抑制信道衰落的内在机理, 推导并给出相应的量化解析公式, 最终通过仿真实验对理论推导、模型精度及解析公式的有效性进行全面验证, 确保研究结果的可靠性与实用性。

关键词

短波信道; 多站协同干扰; 信号功率分布特性; 抗衰落性能

1 引言

短波信道的快衰落特性, 决定了到达干扰点的干扰信号功率在平均功率附近波动, 波动均方差由干扰信号统计时长、多普勒展宽、多径等参数共同决定。多站联合干扰时, 到达干扰点的干扰信号功率波动会减小。

本文基于短波信道模型, 对各类链路组合下信道参数、链路数量、干扰时长等参数对多站协同干扰效果的影响展开研究与探讨, 证明多站协同抗衰落的原因及使用条件。

2 联合短波干扰信道模型

信号台站进行联合干扰时, 干扰目标地点的接收功率可写为:

$$\overline{r(t)} = \sum_{i=1}^M \overline{s_i(t)} \otimes h_i(t, \tau) \quad (1)$$

其中 $\overline{s_i(t)}$ 为台站 i 发出的干扰信号, $h_i(t, \tau)$ 为台站 i 到干扰目标的信道冲击响应函数 (后面称为信道 i), τ 表示传播路径间的延迟。

对于短波窄带信道, 使用 watterson 信道模型^[1]:

$$h_i(t, \tau) = \sum_n \overline{g_{i,n}(t)} \otimes \delta(\tau - \tau_{i,n}) \quad (2)$$

其中 $\overline{g_{i,n}(t)}$ 代表信道 i 中的传播模式 n 的时间选择性衰落特性, $\delta(\tau - \tau_{i,n})$ 代表信道 i 中的传播模式 n 的路径延时。

【作者简介】董雪 (1991-), 女, 中国山东滨州人, 硕士, 工程师, 从事电波传播理论及应用研究。

当多个台站干扰源随机时，多个干扰信号在干扰点合成的信号相当于一个随机干扰源通过式 (3) 所示的信道模型后得到的信号。

$$p_{\mu}(f) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M (p_{g_i}(f - \Delta f \tau_i) + p_{g_i}(f + \Delta f \tau_i)) \quad (3)$$

$p_{\mu}(f)$ 对应于时域上的随机增益函数， f 表示干扰频率。

3 多站协同干扰效果分析

由于短波电离层反射信道的时变色散特性，会导致到达干扰目标的干扰信号功率发生严重的衰落，前一秒与后一秒干扰信号功率相差多达 10~20dB。

在短波干扰中，由于短波通信是以突发波形形式进行通信，突发波形时间长度（一帧数据包）大多为 0.6~4.8 秒（短波调制解调器协议），所以短波干扰关注的是一个较短时间段内的到达目标点的干扰信号功率特性。因为在理论分析中，需要从没有进行对数运算的功率出发进行研究，因此将研究的问题抽象为一个以持续时间长度为 T 的干扰信号功率 $P(T)_t$ ， $P(T)_t$ 随时间发生变化，可以看作一个随机过程。

$$P(T)_t = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} r(t) r^*(t) dt \quad (4)$$

$$= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} (s(t) \otimes h(t, \tau)) (s(t) \otimes h(t, \tau))^* dt$$

其中 $s(t)$ 是发送的干扰信号， $h(t, \tau)$ 代表短波信道， $r(t)$ 为接收到的干扰信号。

3.1 干扰信号功率随机过程

发射的干扰信号 $\overline{s(t)}$ 为恒功率信号，经过短波信道到达干扰目标地点的干扰信号可写为：

$$\overline{r(t)} = \overline{s(t)} \otimes h(t, \tau) \quad (5)$$

多台站协同干扰时，到达干扰目标地点的干扰信号可以写为：

$$\overline{r(t)} = \overline{s_1(t)} \otimes h_1(t, \tau) + \overline{s_2(t)} \otimes h_2(t, \tau) + \dots + \overline{s_M(t)} \otimes h_M(t, \tau) \quad (6)$$

$$p_{r, \text{single}}(T)_t = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} r(t) r^*(t) dt$$

$$= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \overline{r(t)} \overline{r(t)}^* dt$$

$$= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \left[\overline{s(t)} \otimes h(t, \tau) \right] \left[\overline{s(t)} \otimes h(t, \tau) \right]^* dt$$

$$= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[\overline{s(t - \tau_i)} \overline{s(t - \tau_j)}^* G_i(t) G_j(t)^* \right] dt$$

$$\approx \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \sum_{i=1}^N \left[\overline{s(t - \tau_i)} \overline{s(t - \tau_i)}^* G_i(t) G_i(t)^* \right] dt \quad (7)$$

$P_{r, \text{single}}(T)_t$ 可以看作单台站干扰信号随机过程。当发送的干扰信号是随机信号，多径延时满足 $\tau_i - \tau_j > \frac{1}{B}$ ，即对于窄带干扰系统， $B = 3\text{KHz}$ ， $\tau_i - \tau_j > 0.3$ 毫秒时， $\overline{s(t - \tau_i)}$ 与 $\overline{s(t - \tau_j)}$

可以认为是不相关的随机信号。多台站协同干扰时，到达干扰目标点的干扰信号功率：

$$p_{r, \text{union}}(T)_t = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \sum_{i=1}^{N_m} \sum_{j=1}^{N_n} \left(\overline{s_m(t - \tau_{m,i})} \overline{s_n(t - \tau_{n,j})}^* G_{m,i}(t) G_{n,j}(t)^* \right) dt \quad (8)$$

$p_{r, \text{union}}(T)_t$ 可以看作单台站干扰信号随机过程。其中 $s_m(t - \tau_{m,i})$ 代表第 m 个台站发射的干扰信号，经过链路 m 到达目标点的短波信道，在传播模式 i 对应的延时 $\tau_{m,i}$ ， $G_{m,i}(t)$ 为此传播模式对应的路径增益。

当各台站发射的干扰信号是随机信号时，不同链路到达干扰点的信号是互不相关的，并且和各链路间不同传播模式的路径增益也是互不相关的。因此公式 (8) 可简化为：

$$p_{r, \text{union}}(T)_t = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \sum_{i=1}^{N_m} \sum_{j=1}^{N_n} \left(\overline{s_m(t - \tau_{m,i})} \overline{s_n(t - \tau_{n,j})}^* G_{m,i}(t) G_{n,j}(t)^* \right) dt$$

$$\approx \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^{N_m} \left(\overline{s_m(t - \tau_{m,i})} \overline{s_m(t - \tau_{m,i})}^* G_{m,i}(t) G_{m,i}(t)^* \right) dt \quad (9)$$

由公式 (7) ~ (9) 可以得出：多站抗衰落效果和多径的抗衰落效果相似。因此以单条路径的功率特性作为研究基础。

$$p(T)_t = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \overline{s(t) s(t)^*} G(t) G(t)^* dt \quad (10)$$

由于 $\overline{s(t)}$ 为恒功率信号，并且不同信号经过单条路径的短波信道后，功率分布特性近似（通过如下仿真证明）。

分别用计算机仿真平均功率为 1 的 8PSK 信号^[2]，1KHz 的单音信号，恒为 1 的信号经过多普勒展宽为 1Hz 的归一化单路径短波信道后的功率分布特性。

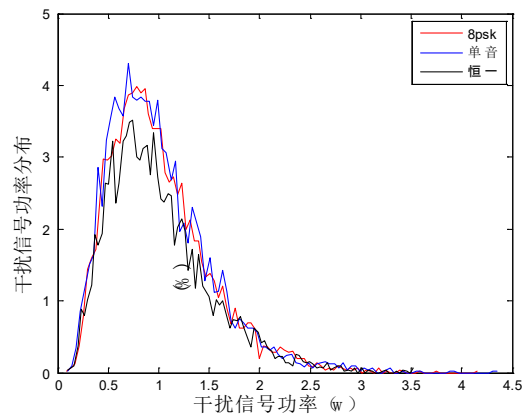


图 1 8PSK、单音、恒一信号功率分布对比

因此把单条路径功率特性近似为：

$$p(T)_t = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} G(t) G(t)^* dt \quad (11)$$

$p(T)_t$ 可以看出一个随机过程。假设它的平均值 $\overline{P(T)_t}$ ，均方差为 δT_{∞} 。

多台站干扰到达信号功率 $p_{r, \text{union}}(T)_t$ 可以看作一个随

机过程，因为 $\frac{1}{T} \int_t^{t+T} G_{m,i}(t)G_{m,i}(t)^* dt, i=1,2,\dots,N$ 是互相独立的。因此均值 $\overline{p_{r,union}(T)_t} = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^{N_m} \overline{p_{r,union,i,j}(T)_t}$ ，均方差：

$$\text{var}(p_{r,union}(T)_t) = \sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^{N_m} \delta^2_{T,m,i}} \quad (12)$$

3.2 经单路径归一化短波信道的干扰信号功率分布特性

将公式 (11) 经过归一化后为：

$$p_{Nor}(T)_t = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} g(t)g(t)^* dt \quad (13)$$

$p_{Nor}(T)_t$ 的均值为 1，均方差为 δ_σ ，随信道的多普勒展宽 σ 变化而变化。 $p_{Nor}(T)_t$ 的分布和均方差为 δ_σ 的值由计算机仿真得到。

表 1 不同展宽值、不同计算时长下干扰信号功率均方差

| 多普勒展宽值 | 0.5s 时长的均方差 | 1s 时长的均方差 | 5s 时长的均方差 | 10s 时长的均方差 |
|--------|-------------|-----------|-----------|------------|
| 0.05Hz | 0.9644 | 0.9793 | 0.8436 | 0.6950 |
| 0.1Hz | 0.9956 | 0.9422 | 0.6751 | 0.5102 |
| 0.5Hz | 0.8614 | 0.6857 | 0.3326 | 0.2394 |
| 1Hz | 0.6935 | 0.5005 | 0.2332 | 0.1662 |

4 多站协同干扰抗衰落证明与量化

4.1 多站协同干扰抗衰落证明

分别分析单站单路径信号的功率波动特性和多站多路径功率波动特性。比较其差别，得出多站抗衰落原因。

短波信道的每条路径的增益函数 $G_i(t)$ 是互相独立的^[3]，因此：

单站单路径干扰信号功率特性：功率平均值为 $\overline{p(T)_t} = P_T$ ，均方差为 $\text{var}(p(T)_t) = \delta_{T,i}$ ；

单站多路径干扰信号功率特性为均值 $\overline{p_{r,single}(T)_t} = \sum_{i=1}^N P_{T,i}$ ，均方差 $\text{var}(p_{r,single}(T)_t) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \delta^2_{T,i}}$ ；

M 个站协同干扰，每个台站与干扰目标点之间的短波信道存在 N 条路径，到达干扰目标点的干扰信号功率特性为

$$\begin{aligned} \overline{p_{r,union}(T)_t} &= \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^{N_m} P_{T,m,i}, \\ \text{var}(p_{\text{多}}(T)_t) &= \sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^{N_m} \delta^2_{T,m,i}} \end{aligned} \quad (14)$$

不失一般性，假设每条路径的平均功率相等，每条路径的多普勒展宽相等，每条链路均由 N 条传播路径，因此每条路径的功率波动均方差相等。即：

$$\begin{cases} \&P_{T,i} = P_T, (i=1,2,3,\dots) \\ \&\delta_{T,i} = \delta_T, (i=1,2,3,\dots) \\ \&P_{T,m,i} = P_T, (i=1,2,3,\dots, m=1,2,3,\dots) \\ \&\delta_{T,m,i} = \delta_T, (i=1,2,3,\dots, m=1,2,3,\dots) \end{cases} \quad (15)$$

单站多路径干扰信号功率特性为均值 $\overline{p_{r,single}(T)_t} = \sum_{i=1}^N P_{T,i} = N \cdot P_T$ ，均方差 $\text{var}(p_{r,single}(T)_t) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \delta^2_{T,i}} = \sqrt{N} \delta_T$ ；
M 个站协同干扰，每个台站与干扰目标点之间的短波信道存在 N 条路径，到达干扰目标点的干扰信号功率特性为 $\overline{p_{r,union}(T)_t} = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^{N_m} P_{T,m,i} = M \cdot N \cdot P_T$ ，
 $(p_{\text{多}}(T)_t) = \sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^{N_m} \delta^2_{T,m,i}} = \sqrt{N \times M} \delta_T$ 。

当把随机过程 $p(T)_t$ 的功率进行归一化处理， $p_{Nor}(T)_t = \frac{p(T)_t}{\overline{p(T)_t}}$ ，那么随机过程 $p_{Nor}(T)_t$ 平均值为 $\overline{p_{Nor}(T)_t} = 1$ ，均方差为 $\text{var}(p(T)_t) = \frac{\delta_T}{\overline{p(T)_t}}$ ，使用上述归一化随机过程 $p_{Nor}(T)_t$ 表示单台站干扰信号经过单路径短波信道后的功率特性。那么上述随机过程特性为：

单站单路径归一化干扰信号功率特性：平均值为 $\overline{p_{Nor}(T)_t} = 1$ ，均方差为 $\text{var}(p_{Nor}(T)_t) = \frac{\delta_T}{\overline{p(T)_t}}$ ；

单站多路径干扰信号功率特性为均值 $\overline{p_{r,single}(T)_t} = N$ ，均方差 $\text{var}(p_{r,single}(T)_t) = \sqrt{N} \frac{\delta_T}{\overline{p(T)_t}}$ ；

M 个站协同干扰，每个台站与干扰目标点之间的短波信道存在 N 条路径，到达干扰目标点的干扰信号功率特性为 $\overline{p_{r,union}(T)_t} = M \times N$ ， $\text{var}(p_{r,union}(T)_t) = \sqrt{N \times M} \frac{\delta_T}{\overline{p(T)_t}}$ 。

由上述公式可以得出结论：
单台站干扰信号功率为 P_s ，假设路径损耗为 0dB，经过单路径归一化短波信道后，干扰信号功率特性：平均值为 $\overline{p_{r,single}(T)_t} = P_s$ ，均方差为 $\text{var}(p_{r,single}(T)_t) = \text{var}(p_{Nor}(T)_t) \cdot P_s = \frac{\delta_T \cdot P_s}{\overline{p(T)_t}}$ ；

M 个台站协同干扰，每个干扰台站发射的干扰信号功率为 P_s ，经过单路径归一化短波信道后，合成干扰信号功率特性：平均值为 $\overline{p_{r,union}(T)_t} = M \cdot P_s$ ，均方差为 $\text{var}(p_{r,union}(T)_t) = \sqrt{M} \frac{\delta_T \times P_s}{\overline{p(T)_t}}$ ；

M 个台站协同干扰，每个干扰台站发射的干扰信号功率为 $\frac{P_s}{M}$ ，经过单路径归一化短波信道后，合成干扰信号功率特性：平均值为 $\overline{p_{r,union}(T)_t} = P_s$ ，均方差为 $\text{var}(p_{r,union}(T)_t) = \frac{1}{\sqrt{M}} \frac{\delta_T \times P_s}{\overline{p(T)_t}}$ 。

则可以得出结论：当 M 个台站协同干扰时，如果 M 个台站发射功率之和等于单个台站发射功率时，到达干扰点的合成干扰信号功率波动均方差是单个台站功率波动均方差的 $\frac{1}{\sqrt{M}}$ 。

4.2 多站协同干扰抗衰落结论仿真验证

采用仿真验证上述结论，仿真过程如表 1：可以看出，计算结果与仿真结果变化一致。