 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v7i4.10044

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。多台站联合干扰时，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。

【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。

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：

$$\overrightarrow{r(t)}=\sum_{i=1}^{M}\overrightarrow{s_i(t)}\otimes \mathrm{h}_i(t,\tau) \quad (1)$$

其中$\overrightarrow{s_i(t)}$为台站 i 发出的干扰信号，$\mathrm{h}_i(t,\tau)$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]:

$$\mathrm{h}_i(t,\tau)=\sum_n \overrightarrow{g_{i,n}(t)}\otimes \delta(\tau-\tau_{i.n}) \quad (2)$$

其中$\overrightarrow{g_{i,n}(t)}$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。

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。

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

$p_{\mu}(f)$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。

$$\begin{aligned}P(T)_t&=\frac{1}{T}\int_{t}^{T+t} r(t)\,r^{*}(t)dt\\&=\frac{1}{T}\int_{t}^{T+t}\left(s(t)\otimes \mathrm{h}(t,\tau)\right)\left(s(t)\otimes \mathrm{h}(t,\tau)\right)^{*}dt\end{aligned} \quad (4)$$

其中$s(t)$是发送的干扰信号，$\mathrm{h}(t,\tau)$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$\overrightarrow{s(t)}$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：

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

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：

$$\overrightarrow{r(t)}=\overrightarrow{s_1(t)}\otimes \mathrm{h}_1(t,\tau)+\overrightarrow{s_2(t)}\otimes \mathrm{h}_2(t,\tau)+\cdots\cdots+\overrightarrow{s_M(t)}\otimes \mathrm{h}_M(t,\tau) \quad (6)$$

$$\begin{aligned}p_{r,single}(T)_t&=\frac{1}{T}\int_{t}^{t+T} r(t)r^{*}(t)dt\\&=\frac{1}{T}\int_{t}^{t+T} r(t)r^{*}(t)dt\\&=\frac{1}{T}\int_{t}^{t+T}\left[\overrightarrow{s(t)}\otimes h(t,\tau)\right]\left[\overrightarrow{s(t)}\otimes h(t,\tau)\right]^{*}dt\\&=\frac{1}{T}\int_{t}^{t+T}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\left[\overrightarrow{s(t-\tau_i)}\overrightarrow{s(t-\tau_j)}^{*}G_i(t)G_j(t)^{*}\right]dt\\&\approx\frac{1}{T}\int_{t}^{t+T}\sum_{i=1}^{N}\left[\overrightarrow{s(t-\tau_i)}\overrightarrow{s(t-\tau_i)}^{*}G_i(t)G_i(t)^{*}\right]dt\end{aligned} \quad (7)$$

$P_{r,single}(T)_t$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，$B=3KHz$，$\tau_i-\tau_j>0.3$毫秒时，$\overrightarrow{s(t-\tau_i)}$与$\overrightarrow{s(t-\tau_j)}$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：

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

$p_{r,union}(T)_t$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：

$$\begin{aligned}p_{r,union}(T)_t&=\frac{1}{T}\int_{t}^{t+T}\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{M}\sum_{i=1}^{N_m}\sum_{j=1}^{N_n}\left(\overrightarrow{s_m(t-\tau_{m.i})}\overrightarrow{s_n(t-\tau_{n,j})}^{*}G_{m,i}(t)G_{n,j}(t)^{*}\right)dt\\&\approx\frac{1}{T}\int_{t}^{t+T}\sum_{m=1}^{M}\sum_{i=1}^{N_m}\left(\overrightarrow{s_m(t-\tau_{m.i})}\overrightarrow{s_m(t-\tau_{m,i})}^{*}G_{m,i}(t)G_{m,i}(t)^{*}\right)dt\end{aligned} \quad (9)$$

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。

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

由于$\overrightarrow{s(t)}$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 1H z 的归一化单路径短波信道后的功率分布特性。

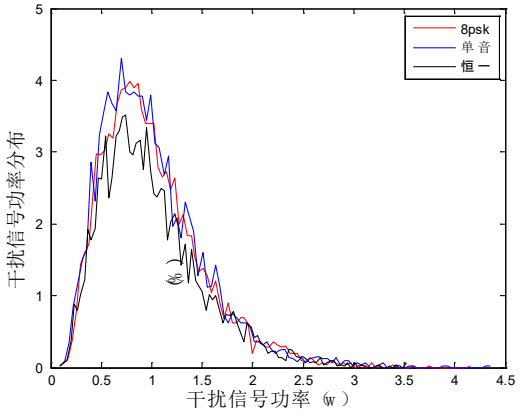


图 1 8PSK、单音、恒一信号功率分布对比

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δ_T。

多台站干扰到达信号功率$p_{r,union}(T)_t$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...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：

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

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：

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

$p_{Nor}(T)_i$的均值为 1，均方差为δ_σ，随信道的多普勒展宽值 σ 变化而变化。$p_{Nor}(T)_i$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 $var(p(T)_t)=\delta_{T,i}$；

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$var\left(p_{r,single}(T)_t\right)=\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\delta^2{}_{T,i}}$；

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

$$\overline{p_{r,union}(T)_t}=\sum_{m=1}^{M}\sum_{i=1}^{N_m}P_{T,m,i},$$

$$var\left(p_{多}(T)_t\right)=\sqrt{\sum_{m=1}^{M}\sum_{i=1}^{N_m}\delta^2{}_{T,m,i}} \qquad (14)$$

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：

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

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$var\left(p_{r,single}(T)_t\right)=\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\delta^2{}_{T,i}}=\sqrt{N}\delta_T$；

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$\overline{p_{r,union}(T)_t}=\sum_{m=1}^{M}\sum_{i=1}^{N_m}P_{T,m,i}=M\cdot N\cdot P_T$，$\left(p_{多}(T)_t\right)=\sqrt{\sum_{m=1}^{M}\sum_{i=1}^{N_m}\delta^2{}_{T,m,i}}=\sqrt{N\times M}\delta_T$。

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$var(p(T)_t)=\frac{\delta_T}{\overline{p(T)_t}}$，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$var(p_{Nor}(T)_t)=\frac{\delta_T}{\overline{p(T)_t}}$；

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$var\left(p_{r,single}(T)_t\right)=\sqrt{N}\frac{\delta_T}{\overline{p(T)_t}}$；

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$\overline{p_{r,union}(T)_t}=M\times N$，$var\left(p_{r,union}(T)_t\right)=\sqrt{N\times M}\frac{\delta_T}{\overline{p(T)_t}}$。

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$var\left(p_{r,single}(T)_t\right)=var(p_{Nor}(T)_t)\cdot p_s=\frac{\delta_T\cdot p_s}{\overline{p(T)_t}}$；

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$var\left(p_{r,union}(T)_t\right)=\sqrt{M}\frac{\delta_T\times p_s}{\overline{p(T)_t}}$；

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$var\left(p_{\mathrm{r,union}}(T)_t\right)=\frac{1}{\sqrt{M}}\frac{\delta_T\times p_s}{\overline{p(T)_t}}$。

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。

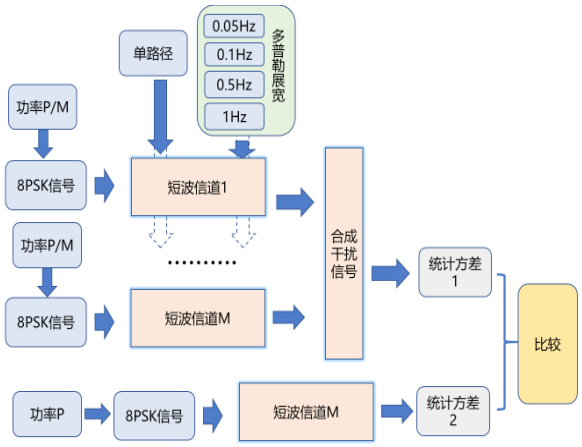


图 2 通过仿真验证 M 个台站协同干扰时合成干扰信号功率波动均方差与单个台站功率波动均方差的关系

表 2 不同展宽值、不同计算时长下干扰信号功率均方差

台站数	多普勒展宽 0.05Hz（理论值）	多普勒展宽 0.05Hz（仿真值）	多普勒展宽 0.1Hz（理论值）	多普勒展宽 0.1Hz（仿真值）	多普勒展宽 0.5Hz（理论值）	多普勒展宽 0.5Hz（仿真值）	多普勒展宽 1Hz（理论值）	多普勒展宽 1Hz（仿真值）
1	0.9793	0.9793	0.9422	0.9422	0.6857	0.6857	0.5005	0.5005
2	0.6925	0.7034	0.6662	0.671	0.4849	0.479	0.3539	0.3622
3	0.5654	0.5733	0.544	0.5457	0.3959	0.3919	0.289	0.2958
4	0.4897	0.503	0.4711	0.4836	0.3429	0.3384	0.2503	0.2573
5	0.438	0.4461	0.4214	0.4354	0.3067	0.3049	0.2238	0.2212
6	0.3998	0.4064	0.3847	0.3962	0.2799	0.2758	0.2043	0.2061

5 结论

（1）单站干扰信号到达平均功率为 Mp、波动方差为 δ 时，N 个条件相同、干扰源不相关的台站到达合成干扰信号功率均值为 $Mp \times N$，波动方差为 $\sqrt{N}\delta$；

（2）相对于平均功率的抖动，单站为 $\frac{\delta}{Mp}$，多站为 $\frac{\delta}{Mp \times \sqrt{N}}$，多站“抹平了功率抖动”，由此证明了多站抗衰路理论，并给出了量化结果。

（3）多站干扰合成信道的台站数越多，各路径功率占比越近，则到达干扰信号的功率波动越小，需要预留的发射功率余量越小。

参考文献

[1] 一种短波信道模型建模方法[P]. 金珠;李颖;张跃宝;管英祥;任源博;蒋宏奎;王程林.中国电子科技集团公司第二十二研究所,2013;

[2] 一种新型的8psk短波通信技术方案. 蒋宏奎;刘敏;金珠.电子技术,2016(08);

[3] 一种基于误差传递的短波信道均衡方法. 吴永宏;徐伯禹;董雪;金珠;曹倩.电波科学学报,2022(05).