

doi: 10.7690/bgzd.2015.01.001

## CHES 电台抗干扰性能仿真分析

王胜涛, 郝二伟, 杜广超

(中国洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471000)

**摘要:** CHES 电台采用差分跳频技术, 实现了短波频段内高跳速和高数据传输速率, 对通信对抗提出了新挑战。分析了差分跳频序列生成原理, 基于 CHES 电台结构, 构建了差分跳频通信系统抗干扰性能仿真模型, 对高斯白噪声信道和瑞利衰落信道下差分跳频信号的抗干扰能力进行了仿真分析。结果表明, 部分频带干扰对差分跳频具有较强的干扰能力。在此基础上, 提出了 CHES 电台的干扰策略, 可为我军的电子对抗提供参考。

**关键词:** 差分跳频; 多音干扰; 部分频带干扰

**中图分类号:** TJ06 **文献标志码:** A

## Performance Simulation Analysis of CHES Radio Against Jamming

Wang Shengtao, Hao Erwei, Du Guangchao

(Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471000, China)

**Abstract:** The CHES radio which make use of differential frequency hopping technology may help us achieve high hopping rate and high velocity of data transfer in short wave, this also puts forward a new challenges to communication countermeasure. In this paper, the basic principle of the DFH sequence form was analyzed. Based on the framework of CHES radio, the simulation model for DFH system is designed. The ability of DFH and general HF against jamming over the AWGN channel as well as Rayleigh fading channel were simulated. The results show that partial-band jamming has strong performance against DFH. At last, some jamming tactics for CHES radio are proposed, which can provide reference for the electronic countermeasure of our army.

**Keywords:** differential frequency hopping; multi-tone jamming; partial-band jamming

### 0 引言

为应对通信对抗中的严重威胁, 通信领域提出了包括跳频、扩频在内的多种抗干扰体制, 然而在短波频段, 由于频率资源有限, 受多径效应影响, 数据传输速率不高, 难以发挥其在军事通信领域的优点。1996年, 美国 Sanders 公司的科研人员 Herrick 等发表了有关关联跳频增强扩谱 (correlated hopping enhanced spread spectrum, CHES) 电台的文章<sup>[1]</sup>, 介绍了采用差分跳频技术的 CHES 电台实现了高达 5 000 跳/s 的跳速和高达 19.2 kbit/s 数据传输速率的测试结果, 引起了国内外学术界的关注。

自差分跳频体制被披露以来, 许多学者对其进行了研究分析。姚富强对 G 函数跳频图案性能进行了分析检验, 提出了改进方向<sup>[2]</sup>, 并对差分跳频信号的检测及抗干扰能力进行了分析总结<sup>[3]</sup>; 陈智、李少谦、董彬虹等对差分跳频系统抗多音干扰性能<sup>[4-5]</sup>和抗部分频带噪声干扰性能<sup>[5-6]</sup>进行了数学分析与仿真。在此基础上, 构建了仿真模型, 验证了差分跳频信号的抗干扰能力, 总结了一些 CHES 电台的对抗策略。

### 1 美军 CHES 电台

#### 1.1 差分跳频序列生成

差分编码的基本原理是: 当前跳的频率  $f_n$  由上一跳的频率  $f_{n-1}$  和当前时刻传输的数据  $X_n$  共同决定, 用一个隐式差分方程<sup>[3]</sup>表示为

$$f_n = G(f_{n-1}, X_n)$$

相邻 2 个跳频频率点通过数据序列建立了一定的相关性, 即相邻两跳频率间的相关性携带了待发送的数据信息, 所以也将这种跳频称之为相关跳频。

#### 1.2 CHES 电台构成

CHES 电台是典型的软件无线电通信系统结构, 如图 1 所示。整个通信系统包括射频单元和数字信号处理单元 2 部分<sup>[3,5]</sup>。在发送端, 待发送的数据比特流按每跳携带的数据比特数 (bits per hop, BPH) 分组, 从收发双方事先约定的起始频率开始, 根据 G 函数算法决定的频率转换矩阵产生跳频序列。DSP 芯片 (CPU) 从频率集中选择出相应的频率, 通过直接数字频率合成器 (DDS) 合成正弦 (或余弦)

收稿日期: 2014-08-06; 修回日期: 2014-09-30

作者简介: 王胜涛(1980—), 男, 山东人, 本科, 工程师, 从事通信技术研究。

信号, 经过 D/A 转换和滤波, 之后通过功率放大器发射出去。当电台为接收机时, 数字接收模块对 A/D 变换后的数字信号进行 FFT 变换并传送给 DSP 进行跳频序列译码。DSP 和用户终端相互交互, 协助控制整个电台的参数设置和数据收发工作。

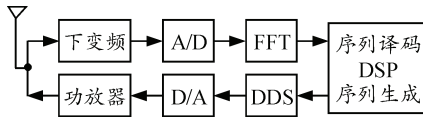


图 1 CHESSE 电台基本结构

### 2 差分跳频系统抗干扰性能仿真模型

基于差分跳频编码原理和 CHESSE 电台结构, 构建了差分跳频通信系统抗干扰性能仿真模型<sup>[7]</sup>如图 2 所示。模型主要由发射模块、干扰模块、信道模块、接收模块和信宿组成。发射模块主要由跳变频率生成模块和射频脉冲成形模块组成, 用于生成差分跳频信号; 干扰模块用于生成干扰信号, 主要包括多音干扰和连续波干扰; 信道模块包括加性高斯白噪声信道 (AWGN) 和瑞利衰落信道 (Rayleigh) 2 种, 通过多拨开关进行选择; 接收模块主要由下变频模块、FFT 同步模块、帧同步模块和信号解跳模块构成, 用于差分跳频信号的检测解跳。

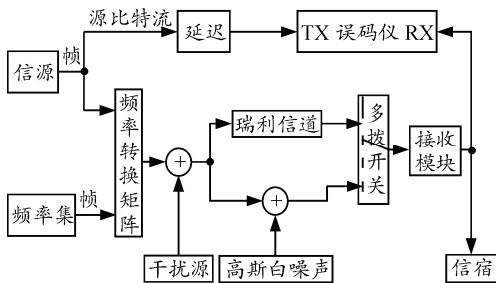


图 2 差分跳频系统抗干扰性能仿真模型

### 3 差分跳频信号抗干扰性能仿真分析

仿真模型中的通信信号主要在加性高斯白噪声信道和瑞利衰落信道中传输。在同等符号信干比条件下, 分析比较采用序列检测线性合并接收方法的 DFH 系统和常规跳频通信系统 (FH) 的误符号率 (SER)。仿真条件为: 2 种通信系统均采用多进制 FSK 解调, 可用频率数  $N=256$ , 比特深度  $BPH=2$ , 跳速为  $5\ 000\ \text{hop/s}$ , DFH 和 FH 数据传输速率相同<sup>[7]</sup>。多音干扰是由多个单音干扰组成, 这些单音信号分布在跳频频段上, 其相位在  $[-\pi, \pi]$  上均匀分布, 每个单音干扰分别对准不同的跳频频点; 部分频带干扰功率谱密度在干扰频段内是平坦的, 在干扰频带外迅速衰减为 0。

### 3.1 加性高斯白噪声信道

仿真得到加性高斯白噪声信道下 DFH 和常规 FH 2 种信号的抗多音干扰性能曲线和抗部分频带干扰性能曲线分别如图 3、图 4。

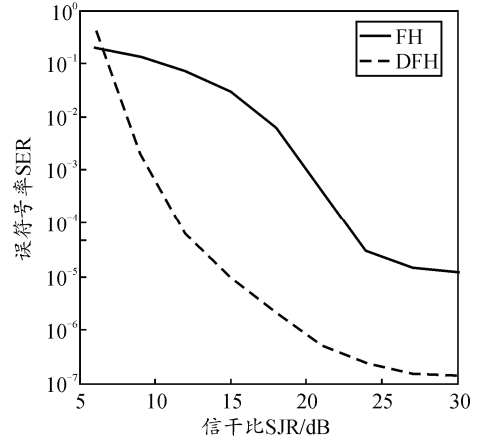


图 3 AWGN 信道下抗多音干扰性能比较

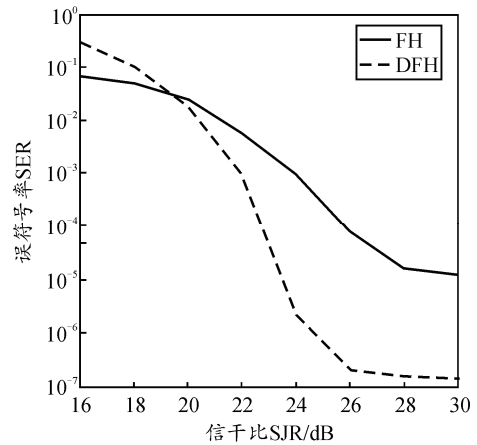


图 4 AWGN 信道下抗部分频带干扰性能比较

### 3.2 抗部分频带干扰

仿真得到瑞利衰落信道条件下 DFH 和常规 FH 2 种信号抗多音干扰性能曲线和抗部分频带干扰性能曲线分别如图 5、图 6 所示。

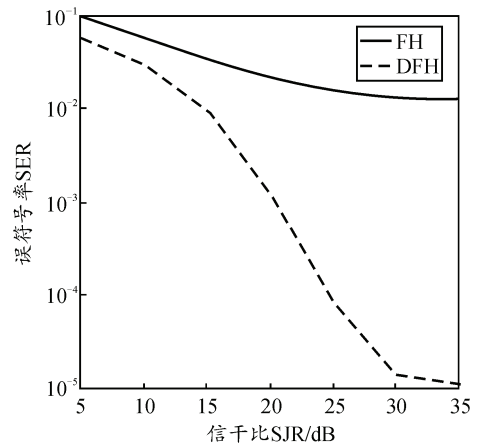


图 5 Rayleigh 信道下抗多音干扰性能比较

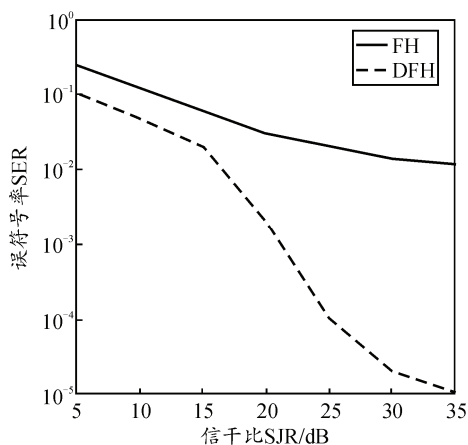


图 6 Rayleigh 信道下抗部分频带干扰性能比较

由图 3~6 可以看出: 在 AWGN 和 Rayleigh 2 种信道条件下, 当信干比较小时, DFH 与 FH 的误符号率比较接近, 尤其在 AWGN 信道下, DFH 的误符号率比 FH 差, 这主要是因为差分跳频通信体制无固定跳频图案, 在信干比较低时许多干扰信号频点易被识别为通信信号, 使频率误判纠正复杂化, 导致通信效果并不理想; 当信干比逐渐增大时, DFH 的误符号率快速递减, 这是因为差分跳频将跳频地址编码和信息调制结合起来, 通过增加调制域的冗余度, 使调频序列具有特定的相关性, 而且序列检测线性合并的译码技术, 可以纠正一定比例的频率误判, 因此误符号性能优于常规跳频通信系统<sup>[4,6]</sup>; 当信干比增大到一定程度时, 干扰信号对通信效果的影响降到很低, 此时信道对误符号性能的影响占主导地位, 表现为“误符号率-信干比”曲线逐渐趋于水平。

对比图 3 与图 4 可知: 在 AWGN 信道下, 达到相同的误符号率, 部分频带干扰所需的信干比远大于多音干扰所需的信干比, 即要达到同样的误符号率, 所需多音干扰信号功率要远高于部分频带干扰信号功率, 这表明对 DFH 系统进行干扰, 部分频带干扰优于多音干扰。同样, 对比图 5 与图 6 可知, 在 Rayleigh 信道下, 部分频带干扰对 DFH 系统的干扰能力也优于多音干扰。

#### 4 CHES 电台干扰策略

从干扰的角度来看, 引导跟踪式干扰对差分跳频通信并不适用, 要获得较好的干扰效果, 就需要在保证一定干扰信号强度的前提下, 尽可能增大对差分跳频那些可能但尚未使用频点的干扰概率。显然, 大功率宽带连续波干扰效果最好, 但是实际应

用中, 干扰机的功率受到限制, 也没有必要对整个频带实施完全压制, 只要干扰足够多频点, 造成差分跳频解跳算法性能恶化, 误码率升高到一定程度即可, 所以部分频带干扰和多音干扰较宽带连续波干扰更为实用。鉴于干扰距离与干扰功率之间的矛盾, 考虑到短波信道对干扰信号影响, 结合前文分析, 总结出不同环境下 CHES 电台的干扰策略。

1) 当被干扰 CHES 电台与干扰机的距离较近时, 干扰信号到达被干扰 CHES 电台处的信号强度可以大致估算, 可以采用如下策略:

① 当被干扰 CHES 电台带宽很宽时, 用宽带连续波干扰(如宽带噪声干扰)是相对较好的选择, 并且干扰信号功率只需达到一定强度即可, 干扰频点数的加倍可以引起差分跳频误码率成数量级地增加。如果条件允许, 可以使用地波或直射波对 CHES 电台的接收产生干扰; 如果干扰机的功率较小, 为了使干扰功率更为集中, 可以采用部分频带干扰, 以提高干扰效果。

② 当被干扰 CHES 电台只使用某个较窄的短波频段时, 部分频带干扰是相对较好的选择。由于带宽较窄, 因此在保证干扰信号达到一定强度的前提下可以使用较小的干扰功率。

③ 还可以释放极大功率的单频干扰, 使其接收机的射频前端因阻塞而出现通信中断, 或导致其希望接收的信号因“远-近”效应而无法接收。

2) 当被干扰 CHES 电台与干扰机的距离较远时, 干扰信号到达被干扰 CHES 电台处的信号强度较弱且无法估算, 因此需要提高干扰信号强度才能保证干扰效果, 可采用如下策略:

① 如果对被干扰 CHES 电台所使用的频段有一定的了解, 使用能保证干扰信号达到一定强度的多音并行干扰相对较好, 多音干扰信号功率足够大且频率高速捷变(最好是远高于被干扰差分跳频信号的跳速), 则可以相对较好地解决干扰信号强度和干扰概率之间的矛盾。

② 在最坏的情况下, 如果只了解被干扰方使用的大致频段, 则可以在该频段内释放 1~2 个极大功率的单频干扰信号。这样做虽然不能造成被干扰 CHES 电台的接收前端出现阻塞, 但却可以导致被干扰 CHES 电台希望接收的幅度较小的有用信号因“远-近”效应而无法接收。