

doi: 10.7690/bgzd.2015.01.014

多进制频率调制信号抗干扰性能建模与分析

刘旭光, 周长征, 王满喜, 李浩

(电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 河南 洛阳 471003)

摘要: 针对模拟调制已不能满足当今军事通信的需要的问题, 建立一种通信系统模型和宽带高斯噪声、窄带噪声、调频和音调等干扰样式模型。分析了 MFSK 信号调制和解调的特点, 并在基于非相干解调情况下, 以 $M=8$ 为例, 分析了 5 种干扰样式情况下的理论误码率, 并通过仿真得出了各种干扰样式对 MFSK 信号的干扰效果。仿真结果表明: 在相同数据速率的情况下, 多音干扰和噪声调频 2 种干扰信号的干扰效果最好, 单音和窄带干扰次之, 宽带高斯噪声最差, 为进一步研究干扰技术和干扰效果提供了参考。

关键词: 多进制频率调制; 干扰样式; 干信比; 误码率

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A

Anti-Jamming Performance of MFSK Signal Modeling and Analysis

Liu Xuguang, Zhou Changzheng, Wang Manxi, Li Hao

(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics & Information System, Luoyang 471003, China)

Abstract: Aiming at the problem that analogue modulation method can't meet the needs of military communication nowadays, this paper establishes a model of MFSK communication system and five jamming samples models (wide-band gauss noises, narrow-band noises, FM, tone). After discussing the characteristics of MFSK demodulation signal, this paper takes $M=8$ for example and analyzes the theoretical error rates under various jamming samples based on incoherent demodulation, then gives jamming effects of five jamming samples to MFSK signal by mathematic simulation. The simulation results show that among the interference effects in the same data rate, the multi-tone and FM occupy the first place, single-tone and narrow-band noises come secondly, and wide-band gauss is the worst, which provides valuable reference for the further study of jamming technology and effects in external field.

Keywords: MFSK; jamming sample; jamming-to-signal ratio; error rates

0 引言

伴随科技的持续发展, 信号调制技术的革新促使通信对抗水平有了质的飞跃。模拟调制因其固有的性能缺陷已不能满足当今军事通信的需要, 而数字调制不仅可以利用编码纠错技术提高通信的可靠性, 还能弥补信道畸变。频移键控(FSK)是用不同频率的载波来传送数字信号, 并用数字基带信号符号的变化控制载波信号的频率, 具有抗噪声性能好、传输距离远、误码率低等优点^[1]。根据所处理的基带信号的进制不同分为二进制和多进制调制。目前, 外军战术互联网中地域通信网中的干线微波通信 MSE(移动用户设备系统), 短波频段 2G-ALE(2代自适应链路)组网以及航母战斗群数据链, AEHF 卫星通信系统(LDR 传输采用 2FSK, MDR 传输采用 8FSK)等大量外军系统中采用 FSK 调制方式的波形传输。因此, 通过多进制 FSK ($M=2, 4, 8$) 性能以及干扰效果的仿真研究, 对通信对抗中关键节点的干扰

具有重要意义。

1 MFSK 基本原理

M 进制数字频率调制(MFSK)简称多进制, 基本上是二进制数字频率键控方式的直接推广, 是用载波频率的变化来传送数字 0 或 1。由于 MFSK 的码元采用 M 个频率为 $f_1, f_2, f_3, \dots, f_M$ 的正弦波表示 M 进制信息的 $0, 1, 2, 3, \dots, M-1$ 形成信道信号, 然后在接收部分采用特定的带通滤波器将信道信号还原为频率为 $f_1, f_2, f_3, \dots, f_M$ 的正弦波, 最后通过鉴频器或其他检波方式还原为多进制信息, 从而实现通信的目的^[2]。

1.1 调制信号的实现

根据 MFSK 的基本原理, 用数字频率调制的方式表示 M 进制的数字信息 $0, 1, 2, 3, \dots, M-1$ 时, 必须设法实现 M 进制的数字码元与不同频率的正弦载

收稿日期: 2014-07-16; 修回日期: 2014-09-02

基金项目: 电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室主任基金项目资助(CEMEE2014Z0207A)

作者简介: 刘旭光(1982—), 男, 硕士, 工程师, 从事通信系统仿真、卫星通信技术研究。

波一一对应，从而达到用正弦载波实现数字信息远程传输的目的。可使用一系列门电路分别对一系列频率为 $f_1, f_2, f_3, \dots, f_M$ 的选通功能来实现。

1.2 解调信号的实现

对接收端来讲，从信道传来的信号是代表数字信息的不同频率的正弦波序列，在任一码元时间内只能接收到 $f_1, f_2, f_3, \dots, f_M$ 中某一个频率的正弦波。首先用特定的带通滤波器将不同载频的正弦波信号分离出来，带通滤波器的中心频率就是多个载频的频率。然后再采用同步解调或包络解调的方式对正弦波信号中的信息进行恢复。最后通过抽样判决电路和数字信息形成逻辑电路，得出 M 进制数字信息。

由于多进制相干解调时设备比非相干解调复杂，且误码性能改善不多，因此应用较少，在绝大多数场合都采用非相干解调作为其解调方式。非相关解调采用包络检波器，输出由判决电路判决。MFSK 通信系统非相干解调原理框图如图 1 所示。

M 进制频移键控中，分别采用 M 个不同的频率分别表示 M 进制的码元，要求每个载频之间的距离足够大，使不同频率的码元频谱能够用滤波器分离开，或者说使不同频率的码元互相正交，因此它的频带利用率不高。MFSK 信号的带宽近似等于

$f_M - f_1 + \Delta f$ ，其中， f_1 为最低选用载频， f_M 为最高选用载频， Δf 为单个码元的带宽^[3]。

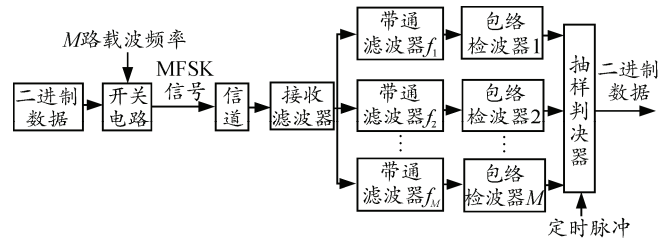


图 1 MFSK 非相干解调原理框图

2 MFSK 通信系统仿真模型设计

2.1 通信系统仿真设计

MFSK 通信系统由发端数字信息源产生原始数字信号，仿真中直接使用 M 路二进制的伪随机数据作为载频，当某路输入电平为 1 时，就输出对应的载波频率，当输入电平为 0 时，不输出信号。信号通过信道传输，并加入各种干扰样式，信号与干扰一起到达接收端，在接收端通过一系列带通滤波器将携有基带数字信号的不同频率载波分开，然后再对每一路载波信号依次进行半波整流、低通滤波，而后送给最大值判决器进行接收判决，最后根据接收到的信号与发端的信号进行误码率分析^[4]。MFSK 通信仿真系统(以 8FSK 为例，其他进制也可依此原理构建仿真系统)如图 2 所示。

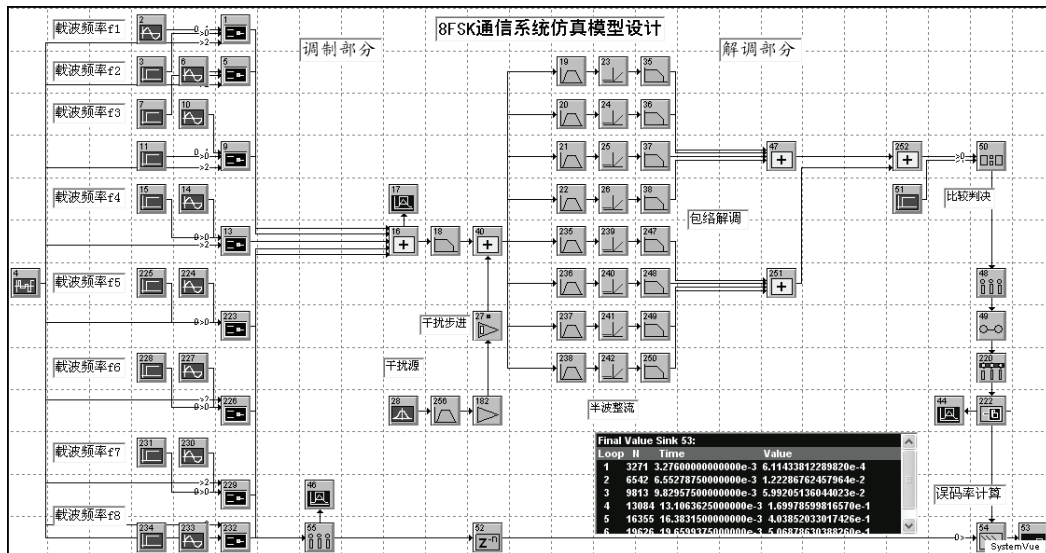


图 2 MFSK 通信系统仿真模型设计

2.2 干扰样式库设计

SystemView 仿真平台提供了 Source Library 库和 Function Library 库，可根据 Gauss Noise 模块、Sinusoid 模块等分别搭建宽带噪声、窄带噪声、调

频和音调等干扰样式，并加入传输系统。干扰信号产生后，通过图符 182 增益器使得干扰信号与产生的调制信号大小相等，并加入到系统中，图符 27 是增益控制模块，将它和全局变量关联，通过设置

系统全局变量来改变干扰步进，即每个仿真周期干扰功率增加 1 个步进值，进而仿真干信比变化情况下该系统的误码率变化曲线^[5-6]。

3 MFSK 系统抗干扰能力仿真分析

仿真是衡量系统性能的工具，通过仿真模型的结果可以推断原系统的性能。本节主要从多进制 M 的取值、不同干扰样式和系统速率的角度对 MFSK 信号的性能进行仿真分析。

3.1 不同 M 值条件下的误码率分析

为了比较不同进制系统的误码率，在保证信号干扰相同条件下，笔者通过仿真给出了 $M=2, 4, 8$ 时的信噪比-误码率曲线。如图 3 所示。

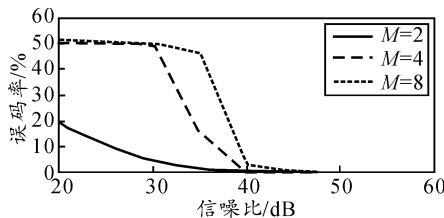


图 3 多频制时的误码率变化曲线

由图可知：对 MFSK 信号而言，当 M 一定的情况下，信噪比越大，误码率越小；在相同的信噪比情况下，随着 M 越大，占据的频带越宽，频谱利用率越高，但能量损失越大，误码率就随之升高，信号解调电路的复杂程度也急剧增加。因此，在实际应用中， M 不可能无限增大，一般来说 $M \leq 16$ 。

3.2 不同干扰样式下的误码率分析

对于不同的目标类型，每种干扰波形都有其各自的优缺点。干扰可以对同一个通信系统采用各种波形来进行干扰。对于不同的抗干扰系统，每种干扰波形的干扰效果也不尽相同。因此，目标信号模型决定了干扰波形的选取^[7]。笔者选取几种典型的干扰样式：宽带高斯噪声干扰，扫频式干扰，音调干扰以及噪声调频干扰，针对以上干扰， M 取值 8，基带信号码元速率 1 kbit/s，采样频率 80 kHz，采样点数为 524 288，循环周期为 8，仿真得出理想信道中不同干扰条件下 8FSK 通信系统的误码率曲线。

1) 宽带高斯噪声干扰。

宽带噪声干扰是将噪声能量加到目标信号所使用的整个频谱带宽上，也称为全频段阻塞干扰，这种干扰对各种通信系统影响都比较明显。选取高斯噪声 (1 V) 作为干扰源，通过设置图符 182 控制增益使得初始干信比值为零，系统全局变量设置为

$4 \times cl-16$ 。宽带高斯噪声干扰下 8FSK 系统的误码率曲线如图 4 所示。

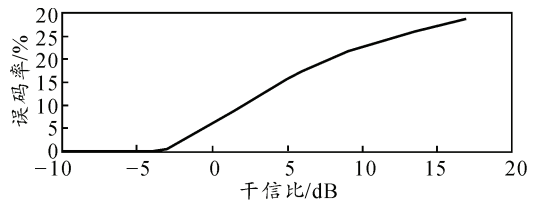


图 4 宽带噪声干扰条件下干信比-误码率曲线

2) 窄带噪声干扰。

8FSK 信号带宽为 24 kHz，选取干扰带宽占信号带宽的 10%。信号源为高斯噪声，幅度 1 V，通过图符 182 控制增益使得初始信干比值为零，系统全局变量设置为 $4 \times cl-14$ ，窄带噪声干扰下 8FSK 系统误码率曲线如图 5 所示。

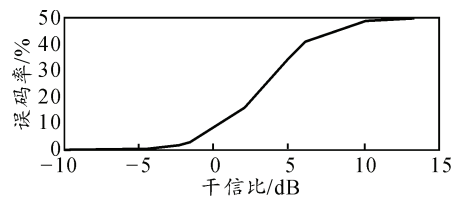


图 5 窄带噪声干扰条件下干信比-误码率曲线

3) 噪声调频干扰。

选取平均噪声作为干扰信号，噪声调频干扰频率率设置为其中一个载波 22.5 kHz，调制增益为 10 kHz/V。通过控制增益使得初始干信比值为零，系统全局变量设置为 $4 \times cl-14$ 。噪声调频干扰下 8FSK 系统误码率曲线如图 6 所示。

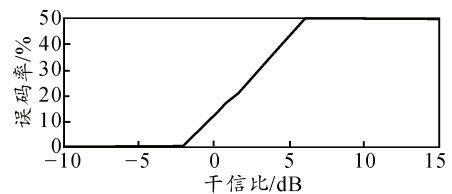


图 6 噪声调频干扰条件下干信比-误码率曲线

4) 音调干扰。

音调干扰属于功率型干扰，分为单音干扰和多音干扰^[7]。单音干扰是将一个单一频率的干扰置于频谱上相应的地方；多音干扰具体实现可看作是单音干扰的扩展，干扰源发射多个单音干扰信号，它可以是随机分布，也可以位于特定的频率上，从而获得最大的干扰功率谱密度。8FSK 信号有 8 个载频，笔者采用 8 个音调的多音干扰，干扰频率分别为该信号的 8 个载频，单音对准 8 个载频中的某一个，即干扰功率集中在信号功率的峰值，干扰效果最好。选取正弦波作为干扰源，通过设置控制增益

使得初始干信比值为零，单音干扰和多音干扰系统全局变量分别设置为 $2 \times c1-5$ 和 $2 \times c1-10$ 。音调干扰条件下 8FSK 系统误码率曲线如图 7 所示。

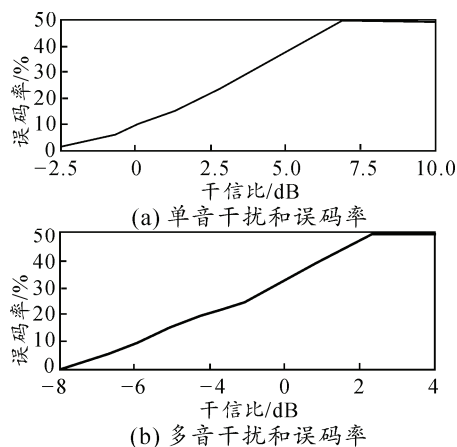


图 7 音调干扰条件下的误码率曲线

为比较不同干扰样式的干扰效果，干扰信号使通信系统的误码率增大到 25% 时的干扰被认为是有效的干扰，即达到干扰门限值。表 1 是 5 种干扰样式的对 8FSK 系统的干扰门限值。

表 1 不同干扰样式下的干扰门限值

干扰样式	误码率/%	干信比/dB
宽带高斯噪声干扰	24.9	12.2
窄带噪声干扰	25.2	3.5
噪声调频干扰	25.2	2.3
多音干扰	25.3	-2
单音	25.0	3.0

可以看出：单纯就 8FSK 调制样式而言，当误码率达到 25% 时，多音干扰的干扰门限值最小，噪声调频干扰和单音干扰次之，宽带高斯干扰的干扰门限值最大。由此可得出结论：多音干扰效果最优，而宽带高斯干扰效果最差，噪声调频干扰效果略好于单音干扰和窄带噪声干扰，但误码率曲线相似，门限值差别不大，考虑到实际对抗中使用平台存在多普勒频移和收发频率偏差，有可能影响单音干扰方式的效果，相比之下多采用噪声调频干扰样式。

3.3 不同速率条件下的误码率分析

为比较系统不同信号速率下的抗干扰能力，以干扰效果最好的多音干扰为例，分别对数据速率分别为 100 bit/s、1 kbit/s 和 1 Mbit/s 的通信系统施加干扰，仿真得到不同干信比条件下的误码率曲线，如图 8。

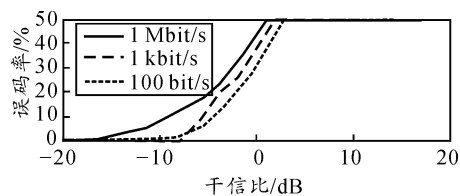


图 8 不同信号速率的 MFSK ($M=8$) 系统误码率曲线

多音干扰样式在相同的干信比情况下，系统速率越小，干扰误码率越小，抗干扰性能越好，也即随着通信数据速率的增大，压制系数也随之减小，越容易被干扰，抗干扰性能反而变差，但由于干扰门限变化不大，3 种系统速率条件下的抗干扰性能变化不大。

4 结束语

通过用 SystemView 软件对 MFSK 系统和干扰进行建模仿真的结果可以看出：在相同数据速率的情况下，多音干扰和噪声调频 2 种干扰信号的干扰效果最好，单音和窄带干扰次之，宽带高斯噪声最差；而在不同数据速率的系统中，数据速率越大，越易被干扰，但影响不大。

SystemView 是一种基于 Windows 平台的系统信号级仿真工具，仿真粒度精细，可信度高。笔者构建的 MFSK ($M=8$) 数字通信系统模型就是基于链路层的信号级仿真，仿真结果既可为功能级数学仿真模型提供建模的依据，又可为外场对抗试验提供参考依据。

参考文献：

- [1] 王楠, 古瑞江, 于宏毅. 一种新型的 FSK 解调系统设计[J]. 通信技术, 2008, 41(9): 29-31.
- [2] 王霞, 朱世华, 孙德龙. FH/MFSK 多址系统中一种多用户检测算法[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(6): 845-851.
- [3] 樊昌信, 张甫翊, 徐炳祥, 等. 通信原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 1-410.
- [4] 方科. 高动态扩频信号捕获的多普勒补偿[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(7): 122-124.
- [5] 程晓江, 刘洛琨. 基于 SystemView 直扩系统中噪声干扰的仿真及分析[J]. 无线电工程, 2003, 33(4): 10-14.
- [6] 罗卫兵, 孙桦, 张捷. SystemView 动态系统分析及通信系统仿真设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001: 93-200.
- [7] 高君丰, 高鑫伟. 音频干扰对 FSK 调制系统的对抗效果研究[J]. 舰船电子对抗, 2013, 36(4): 84-87.