

宽带 MFSK/DFH 系统抗部分频带噪声干扰性能分析

董彬虹 程乙钊 王 达

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室, 成都 611731)

摘 要: 本文提出一种宽带 MFSK/DFH 系统模型, 与常规差分跳频系统相比, 在跳频点数一定条件下, 通过增加多进制编码器复杂度, 提高编码增益的方法提高系统抗干扰性能。对基于 FFT 的宽带 MFSK/DFH 系统接收机抗干扰性能进行了理论分析和计算机仿真验证。结果表明: 在相同条件下, 提出方法通过增加多进制编码器约束长度提高了系统抗干扰能力, 实现方法简单有效, 具有一定的实际应用价值。

关键词: G 函数; 多进制编码器; 约束长度; 状态网格图; 抗干扰

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2012)03-0361-06

Performance analysis of wideband MFSK/DFH system with partial-band noise jamming

DONG Bin-hong CHENG Yi-zhao WANG Da

(National Key Laboratory of Science and Technology on Communications, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

Abstract: Originally developed for HF communications in military applications, DFH systems possess high spectral efficiency features. As a combination of frequency hopping, modulation and coding techniques with G function, DFH technology can not only effectively enhance the transmission rate of the HF communication system but also effectively combat multipath fading and interference which restricts HF communication development. To improve the DFH systems flexibility and capacity, in this paper, we propose a wideband MFSK/DFH system model. Unlike in traditional DFH system where the anti-jamming performance is determined by the number of available frequency choices, in MFSK/DFH, a G function constructing method based on state trellis diagram was presented which coding gain and system capacity can be improved by increasing the coding complexity. The theoretical analysis and simulation results of symbol error rate for the FFT based receiver in AWGN with partial-band noise jamming are also given. The results of a more detailed analysis show that the proposed method improves anti-jamming performance by increasing the coding complexity. The implementation is simple and has some practical value.

Key words: G function; M-ary encoder; constraint length; trellis and graph for status; anti-jamming

1 引言

Herrick D L 等在 1996 年 MILCOM 国际会议上提出差分跳频 (Differential Frequency Hopping, DFH) 技术^[1]。差分跳频技术通过频率跳变相关性携带数据信息, 突破了传统跳频技术中频率跳变只是为了躲避干扰的思想, 提高了短波抗干扰通信的数据传输率, 在军

事通信领域具有广阔的应用前景, 引起了国内外学者的极大关注。

近十年来, DFH 技术一直是短波通信领域研究的热点, 文献[2]对 DFH 系统和快速跳频系统的误码率性能进行了对比; 文献[3][4]在加性高斯白噪声和瑞利衰落信道条件下对常规差分跳频通信系统抗多音干扰性能进行了理论分析; 文献[5]提出了一种简单易

行的 DFH 跳频图案的加扰方法,提高了 DFH 系统的安全性;文献[6][7]对 DFH 的多址技术进行了研究。与文献[3][4]相比,本文从多进制卷积编码器与宽带 MFSK 调制相结合的角度出发,提出了一种宽带 MFSK/DFH 系统模型,可以通过增加编码复杂度提高系统抗干扰性能,实现更加灵活、简单;在 AWGN 信道中存在部分频带噪声干扰 (partial band noise jamming, PBNJ) 条件下,对基于 FFT 的接收机性能进行了理论分析和仿真验证,并对改进后系统性能的有效性进行了详细的分析。

2 系统模型

图 1 为常规 DFH 系统模型框图,其中 G 函数采用固定前后跳频的跳变关系携带信息比特,可以用频率网格编码图表示^[2],接收机采用频率网格序列维特比搜索译码,性能取决最小自由距 $d_{free} = \lfloor \log_2 M/b \rfloor$ ^[3] ($\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整),其中 M 为系统可用跳频点数, b 为每跳频率携带的信息传输比特数。图 2 为本文提出的宽带 MFSK/DFH 系统模型,与图 1 不同的是,发射机采用多进制卷积编码结合高阶 MFSK 实现了 G 函数编码,如果 $M=64$,就采用 64 进制的 FSK 高阶调制,其信号的表现形式为宽带跳频,但频率跳变是由于信息数据调制驱动的,与常规 G 函数直接进行频率编码不同的是,图 2 提出的算法是先将传输的数据信息比特进行编码,再与跳频点一一映射,这种方法不能保证跳频图案的均匀性,但通过频率案的加扰可以解决这个问题^[5]。可以采用状态网格图表示其跳频信号的产生,分支度量值用频率的平方包络值表示,接收机采用状态网格序列维特比搜索译码来完成数据的译码和解调,性能取决于状态网格图的最小自由距 $d_{free} = \lfloor \log_2 2^{b(K-1)}/b \rfloor + 1$ ^[8],其中 K 为卷积码的约束长度,因此在 M 与 b 一定时,本文提出算法可以通过增加 K 提高状态网格图的最小自由距,从而提高系统性能,当然也会相应提高译码复杂度。

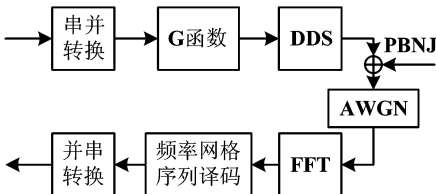


图 1 常规 DFH 系统模型

Fig. 1 Conventional DFH system model

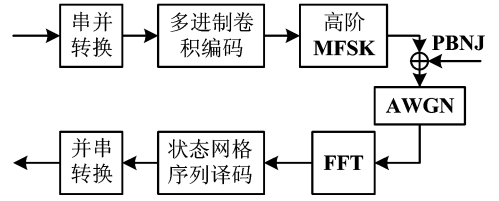


图 2 宽带 MFSK/DFH 系统模型

Fig. 2 A system model of wideband MFSK/DFH

2.1 干扰模型

本文主要针对 PBNJ,分析最坏干扰条件下宽带 MFSK/DFH 系统的抗干扰性能,并与常规 DFH 系统进行比较。将 PBNJ 模拟为加性高斯白噪声均匀分布在 J ($J \leq M$) 个跳频子带内,等效到总带宽的 PBNJ 功率谱密度为 N_J ,高斯白噪声的单边带功率谱密度为 N_0 ,任一跳频子带存在干扰的概率是 $\beta = J/M$,不存在干扰的概率是 $1-\beta$,则任一跳频子带的噪声单边带功率谱密度 N_{J-all} 可表示为:

$$N_{J-all} = \begin{cases} N_J/\beta + N_0, & \text{存在干扰} \\ N_0, & \text{不存在干扰} \end{cases} \quad (1)$$

2.2 发射机模型

设跳频频率驻留时间为 T_h ,符号能量为 E_s ,第 l 跳发送信号 $x(t)$ 的发送频率为 f_m , N ($N \geq 2M$) 点采样后可以表示为

$$x_l[n] = \sqrt{2} a_s \cos(2\pi f_m \frac{T_h}{N} n + \theta_l), \quad (2)$$

$$m=0, 1, \dots, M-1, \quad n=0, 1, \dots, N-1$$

其中, $\sqrt{2} a_s = \sqrt{2E_s/T_h}$ 是信号的幅度, θ_l 是随机相位,服从 $[-\pi, \pi]$ 上的均匀分布。

2.3 接收机模型

如图 3 所示,第 l 跳接收信号经 ADC 后,进行 N 点 FFT 变换,得到在所有 M 个载频的平方包络值为 $R_{m,l}$, $0 \leq m \leq M-1$ 作为状态网格图的分支度量值,进行状态网格序列检测,对 d 跳合法的状态序列合并值 U_j , $0 \leq j \leq F-1$,进行择大判决后译码输出数据序列。

在状态网格图中的任一跳分支路径的频率度量值可以根据是否受到干扰分为以下 4 种条件:

- (1) 条件 A: 被干扰的正确路径分支频率度量值
- (2) 条件 \bar{A} : 未被干扰的正确路径分支频率度量值
- (3) 条件 B: 被干扰的错误路径上的分支频率度量值
- (4) 条件 \bar{B} : 未被干扰的错误路径上的分支频率度量值

满足以上 4 种条件的第 l 跳接收采样信号 $r_l[n]$ 可以表示为:

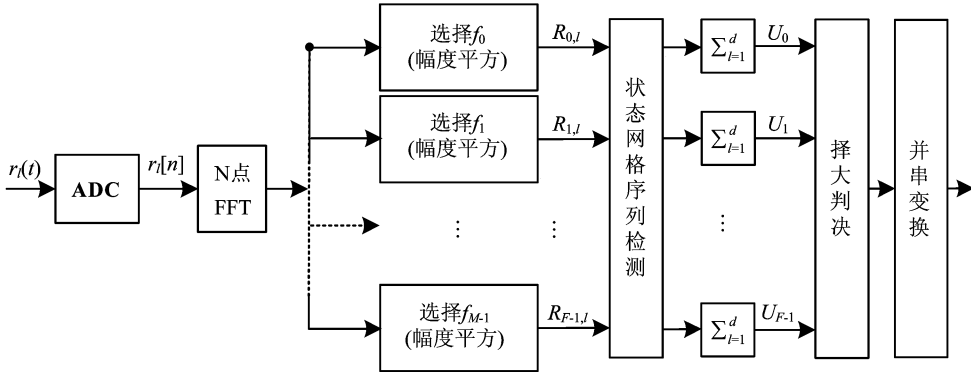


图 3 状态网格序列译码原理

Fig. 3 Trellis and graph based sequence decoding theory

$$\begin{cases} r_{m_A,l}[n] = x_l[n] + w[n] + n_j[n], \\ m = 0, 1, \dots, M-1, n = 0, 1, \dots, N-1 \\ r_{m_A,l}[n] = x_l[n] + w[n], \\ m = 0, 1, \dots, M-1, n = 0, 1, \dots, N-1 \\ r_{m_B,l}[n] = w[n] + n_j[n], \\ m = 0, 1, \dots, M-1, n = 0, 1, \dots, N-1 \\ r_{m_B,l}[n] = w[n], \\ m = 0, 1, \dots, M-1, n = 0, 1, \dots, N-1 \end{cases} \quad (3)$$

其中, $x_l[n]$ 经 N 点 FFT, 所有 M 个载频的平方包络值为:

$$S = N^2 a_s^2 / 2 \quad (4)$$

$w[n]$ 和 $n_j[n]$ 经过 N 点 FFT 变换, 方差分别为:

$$\sigma_{q_w}^2 = (\gamma_F + \gamma_G) \sigma_w^2 \quad (5)$$

$$\sigma_{q_j}^2 = (\gamma_F + \gamma_G) \sigma_j^2 \quad (6)$$

其中, 参数 γ_F 和 γ_G 分别为^[9]:

$$\gamma_F = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} \left[\frac{\sin 2\pi(n-m)/N}{\pi(n-m)/N} \cos \left(\frac{3\pi(n-m)}{N} \right) \cos \left(\frac{2\pi n}{N} \right) \cos \left(\frac{2\pi m}{N} \right) \right] \quad (7)$$

$$\gamma_G = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} \left[\frac{\sin 2\pi(n-m)/N}{\pi(n-m)/N} \cos \left(\frac{3\pi(n-m)}{N} \right) \sin \left(\frac{2\pi n}{N} \right) \sin \left(\frac{2\pi m}{N} \right) \right] \quad (8)$$

因此, 满足式(3)中的 4 种条件的接收信号在状态网格图的分支频率度量值随机变量的特征函数可表示为:

$$\begin{cases} \Phi_{R_{m_A}}(j\nu) = \frac{1}{1-j\nu 2\sigma_r^2} \exp \left(\frac{j\nu S^2}{1-j\nu 2\sigma_r^2} \right), m = 0, 1, \dots, M-1 \\ \Phi_{R_{m_B}}(j\nu) = \frac{1}{1-j\nu 2\sigma_w^2} \exp \left(\frac{j\nu S^2}{1-j\nu 2\sigma_w^2} \right), m = 0, 1, \dots, M-1 \\ \Phi_{R_{m_A}}(j\nu) = \frac{1}{1-j\nu 2\sigma_r^2}, m = 0, 1, \dots, M-1 \\ \Phi_{R_{m_B}}(j\nu) = \frac{1}{1-j\nu 2\sigma_w^2}, m = 0, 1, \dots, M-1 \end{cases} \quad (9)$$

其中, $\sigma_r^2 = \sigma_w^2 + \sigma_j^2$.

3 误码率分析

宽带 MFSK/DFH 系统接收机的符号误码率(Symbol Error Rate, SER)上界可以表示为^[8]:

$$P_s \leq \sum_{d=d_{free}}^{\infty} \beta_d P_2(d) \quad (10)$$

其中, β_d 表示 d 跳成对比较路径的符号差错个数, 由多进制卷积编码器的传递函数决定, $P_2(d)$ 表示 d 跳成对比较路径差错概率

$$P_2(d) = \sum_{j=0}^d \sum_{k=0}^{d-j} \sum_{p=0}^{d-j-k} C(d; j, k, p, q) P\{A, B\}^j P\{\bar{A}, B\}^k \cdot P\{A, \bar{B}\}^p P\{\bar{A}, \bar{B}\}^q P_2(d | j, k, p, q) \quad (11)$$

其中, $q = d - j - k - p$; 多项式系数 $C(N; N_1, N_2, \dots, N_L) = N! / (N_1! N_2! \dots N_L!)$, 且有 $N = \sum_{l=1}^L N_l$; A, \bar{A}, B 和 \bar{B} 的 4 种条件的联合概率为

$$P\{A, B\} = \frac{J(J-1)}{M(M-1)} \quad (12)$$

$$P\{\bar{A}, B\} = \frac{J(M-J)}{M(M-1)} \quad (13)$$

$$P\{A, \bar{B}\} = \frac{J(M-J)}{M(M-1)} \quad (14)$$

$$P\{\bar{A}, \bar{B}\} = \frac{(M-J)(M-J-1)}{M(M-1)} \quad (15)$$

式(11)中的 $P_2(d|j, k, p, q)$ 表示成对比较路径条件错误概率, 假设 d 跳成对比较路径中有 j 跳条件 A, B 同时发生, k 跳条件 \bar{A}, \bar{B} 同时发生, p 跳条件 A, \bar{B} 同时发生, q 跳条件 \bar{A}, \bar{B} 同时发生。下面对 $P_2(d|j, k, p, q)$ 的表达式进行推导。

令 $\{R_l^0\}$ 和 $\{R_l^1\}$ ($1 \leq l \leq d$) 分别表示正确和错误路径上的分支频率度量值序列, 定义随机变量:

$$Z = \sum_{l=1}^d (R_l^0 - R_l^1) \quad (16)$$

根据择大判决思想, $P_2(d|j, k, p, q)$ 可表示为:

$$P_2(d|j, k, p, q) = P\{Z < 0 | j, k, p, q\} \quad (17)$$

首先计算随机变量 Z 的条件特征函数 $\Phi_Z(j\nu | j, k, p, q)$, 由于每跳信号和干扰相互独立, $\Phi_Z(j\nu | j, k, p, q)$ 可以表示为:

$$\begin{aligned} \Phi_Z(j\nu | j, k, p, q) &= E(\exp(j\nu Z) | j, k, p, q) \\ &= \prod_{l=1}^d E(\exp(j\nu R_l^0) | j, k, p, q) \cdot E(\exp(-j\nu R_l^1) | j, k, p, q) \\ &= \prod_{l=1}^d \Phi_{R_l^0}(j\nu | j, k, p, q) \cdot \Phi_{R_l^1}(-j\nu | j, k, p, q) \quad (18) \end{aligned}$$

其中, $E(\cdot | p, q, j, k)$ 表示条件数学期望。根据4种可能存在的分支频率度量值, $\Phi_Z(j\nu | j, k, p, q)$ 可以表示为:

$$\begin{aligned} \Phi_Z(j\nu | j, k, p, q) &= \left\{ \Phi_{R_{m_1}^0}(j\nu) \Phi_{R_{m_1}^1}(-j\nu) \right\}^j \\ &\left\{ \Phi_{R_{m_2}^0}(j\nu) \Phi_{R_{m_2}^1}(-j\nu) \right\}^k \cdot \left\{ \Phi_{R_{m_3}^0}(j\nu) \Phi_{R_{m_3}^1}(-j\nu) \right\}^p \\ &\left\{ \Phi_{R_{m_4}^0}(j\nu) \Phi_{R_{m_4}^1}(-j\nu) \right\}^q \quad (19) \end{aligned}$$

由式(9)可以得到:

$$\begin{aligned} \Phi_Z(j\nu | j, k, p, q) &= (1+2j\nu\sigma_{q_r}^2)^{-(j+p)} (1+2j\nu\sigma_{q_w}^2)^{-(k+q)} \cdot \\ &(1-2j\nu\sigma_{q_r}^2)^{-(j+k)} (1-2j\nu\sigma_{q_w}^2)^{-(p+q)} \cdot \\ &\exp(j\nu(j+k)S^2 / (1-2j\nu\sigma_{q_r}^2)) \cdot \\ &\exp(j\nu(p+q)S^2 / (1-2j\nu\sigma_{q_w}^2)) \quad (20) \end{aligned}$$

对上式的两个指数项用无穷级数展开^[10]:

$$\begin{aligned} \Phi_Z(j\nu | j, k, p, q) &= \exp(-(j+k)\beta_{q_r}) \exp(-(p+q)\beta_{q_w}) \cdot \\ &\sum_{s=0}^{\infty} \sum_{t=0}^{\infty} \frac{((j+k)\beta_{q_r})^s}{s!} \frac{((p+q)\beta_{q_w})^t}{t!} \phi(j\nu) \quad (21) \end{aligned}$$

其中

$$\beta_{q_r} = \frac{S^2}{\sigma_{q_r}^2} = \frac{N^2 E_s}{2M(\gamma_F + \gamma_C)N_0 + 2M(\gamma_F + \gamma_C)N_J / \beta} \quad (22)$$

$$\beta_{q_w} = S^2 / \sigma_{q_w}^2 = N^2 E_s / (2M(\gamma_F + \gamma_C)N_0) \quad (23)$$

$\phi(j\nu)$ 可表示为:

$$\begin{aligned} \phi(j\nu) &= \sum_{r=0}^{p+q+t} \frac{A_{1r}}{(1-2j\nu\sigma_{q_w}^2)^r} + \sum_{r=0}^{k+q} \frac{A_{2r}}{(1+2j\nu\sigma_{q_r}^2)^r} + \\ &\sum_{r=0}^{j+k+s} \frac{A_{3r}}{(1-2j\nu\sigma_{q_r}^2)^r} + \sum_{r=0}^{j+p} \frac{A_{4r}}{(1+2j\nu\sigma_{q_r}^2)^r} \quad (24) \end{aligned}$$

其中, A_{ir} ($1 \leq i \leq 4$) 是部分分式展开系数。

随机变量 Z 的条件概率密度函数可以通过对 $\Phi_Z(j\nu | j, k, p, q)$ 求反傅里叶变换, 然后在区间 $[-\infty, 0]$ 对条件概率密度函数积分

$$\begin{aligned} P_2(d|j, k, p, q) &= \exp(-(j+k)\beta_{q_r}) \exp(-(p+q)\beta_{q_w}) \cdot \\ &\sum_{s=0}^{\infty} \sum_{t=0}^{\infty} \frac{((j+k)\beta_{q_r})^s}{s!} \frac{((p+q)\beta_{q_w})^t}{t!} \left(\sum_{r=0}^{k+q} A_{2r} + \sum_{r=0}^{j+p} A_{4r} \right) \quad (25) \end{aligned}$$

其中, $A_{20} = 0; A_{40} = 0;$

$$A_{2r} = 2^{-(2k+2q+r-r)} (1+\delta)^{-(j+p+s)} (1-\delta)^{-(j+p)} \cdot$$

$$\begin{aligned} &\sum_{u=0}^{n+q-r} \frac{(k+q+t)_{p+q-r-u}}{(k+q-r-u)!} \left(\frac{2\delta}{1+\delta} \right)^u \\ &\sum_{\nu=0}^u \frac{(j+p+s)_{u-\nu} (j+p)_{\nu}}{(u-\nu)! \nu!} \left(\frac{\delta+1}{\delta-1} \right)^{\nu} \quad (26) \end{aligned}$$

$$A_{4r} = 2^{-(j+p+s)} (1+\delta)^{-(j+p-r)} (\delta/(1+\delta))^{k+q+t} (\delta/(\delta-1))^{k+q} \cdot$$

$$\begin{aligned} &\sum_{u=0}^{j+p-r} \frac{(k+q+t)_{j+p-r-u}}{(j+p-r-u)!} \left(\frac{1+\delta}{1-\delta} \right)^u \\ &\sum_{\nu=0}^u \frac{(k+q)_{u-\nu} (j+p+s)_{\nu}}{(u-\nu)! \nu!} \left(\frac{1-\delta}{2} \right)^{\nu} \quad (27) \end{aligned}$$

其中, $(j)_k = \Gamma(j+k)/\Gamma(j)$, $(j)_0 = 1; \delta = 1 + N_J / (\beta N_0) = 1 + (E_s / N_0) / (\beta E_s / N_J)$ 。

4 数值和仿真分析结果

设系统的跳频频率驻留时间 $T_h = 200 \mu\text{s}$, 跳频间隔 $\Delta f = 5 \text{ KHz}$, $M = 128$, $b = 2$, 通过大量的计算机搜索, 得到宽带 MFSK/DFH 系统的多进制卷积码结构, 用八进制表示。当 $K = 4$ 时, 为 $([44], [10\ 0\ 4\ 0\ 2\ 0\ 1; 10\ 4\ 0\ 2\ 0\ 1\ 10])$, 当 $K = 5$ 时为 $([55], [10\ 20\ 4\ 20\ 2\ 20\ 1; 10\ 14\ 0\ 22\ 0\ 11\ 10])$ 。常规 DFH 系统采用 G 函数与文献[3][4]相同。

1) 最坏 PBNJ 条件

本文 PBNJ 假设为加性高斯白噪声功率均匀分布在 $(J \leq M)$ 个跳频子频带内, 则任一子频带中特定频率上存在干扰的概率是 $\beta = J/M$, 不存在干扰的概率则是

$1-\beta$ 。采用上述 $K=4$ 的卷积编码器,取 $E_s/N_0 = 8.0\text{dB}$ (在无干扰、无衰落条件下,宽带MFSK/DFH系统的SER为 1×10^{-5} 所需要的符号信噪比)。图4是宽带MFSK/DFH系统抗PBNJ理论性能分析结果。可以看到,当信干比很高时,SER性能主要由信噪比决定,当 $E_s/N_j > 33\text{dB}$ 时,不同 β 下的系统抗干扰性能趋于稳定。

从图4还可以看到,当信干比很小时,也就是干扰很强时,系统抗干扰主要受到PBNJ影响,随着 E_s/N_j 的减小,系统SER性能迅速下降,这是由于差分跳频图案具有相关性,信号检测错误所引起的差错传递造成的,并且当 $\beta=1/128$ 时为最坏PBNJ条件。

2) 在AWGN信道中,宽带MFSK/DFH和常规DFH抗最坏PBNJ数值和仿真分析

取在 $E_s/N_0 = 9.4\text{dB}$ (在无干扰、无衰落条件下,常规DFH系统SER为 1×10^{-5} 所需要的符号信噪比)。图5为干扰模型为最坏PBNJ,在相同的符号信干比条件下,文献[3][4]设计的常规DFH系统和宽带MFSK/DFH系统的SER数值分析和仿真结果对比。可以看到,理论与仿真结果基本一致,由于理论推导是基于SER的上界进行分析,因此存在一定的误差。

从图5可以看到,当信干比很小时,也就是干扰很强时,系统SER性能主要受PBNJ影响,当 $E_s/N_j < 18\text{dB}$ 时,信号检测错误所引起的差错传递造成二者的SER性能基本相同,宽带MFSK/DFH系统并没有明显的抗干扰增益。当 $18\text{dB} < E_s/N_j < 33\text{dB}$ 时,随着 E_s/N_j 增大,状态网格序列译码的抗干扰增益逐渐增加,当宽带MFSK/DFH系统的SER为 1×10^{-3} 时,与文献[3][4]的常规DFH系统相比,在 $K=4$ 和 5 时的理论和仿真线都提高了 0.7dB 和 1.7dB 以上的增益。因此,采用提出方法,在系统跳频点数一定的条件下,通过增加卷积编码的约束长度,适当增加译码复杂度,提高DFH系统的抗干扰性能。

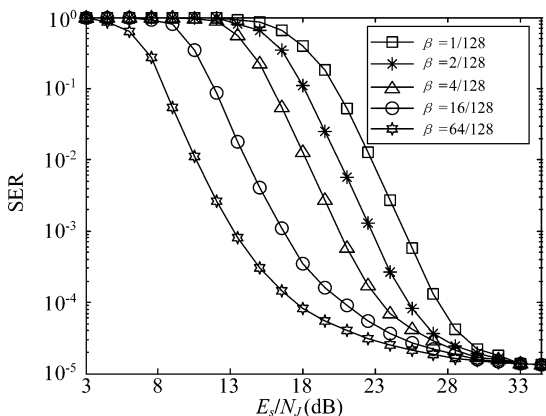


图4 AWGN中不同 β 下宽带MFSK系统SER对比

Fig. 4 The SER for several values of β for AWGN channels

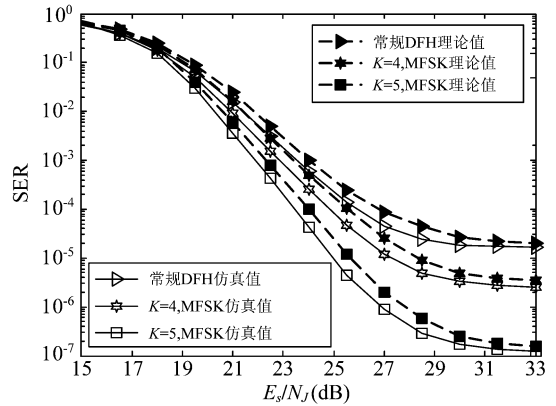


图5 AWGN中不同差分跳频系统SER对比

Fig. 5 Comparison of SER of different DFH system for AWGN channel

5 结论

DFH技术是一种将跳频、编码和调制相结合的短波跳频技术,本文从多进制卷积编码结合高阶MFSK调制出发,构造了一种宽带MFSK/DFH系统,对其基于FFT的接收机在AWGN信道中存在PBNJ条件下的SER性能进行了理论分析和仿真验证,与常规DFH系统进行了比较。得到了宽带MFSK/DFH系统的最坏PBNJ条件,证明了在可用跳频点数一定条件下,宽带MFSK/DFH系统可以通过增加卷积编码约束长度,适当增加译码复杂度,提高编码增益的方法来提高系统的抗干扰能力。

参考文献

- [1] HERICK D L, LEE P K. CHES: A NEW RELIABLE HIGH SPEED HF RADIO [C] // IEEE MILCOM '96, 1996:684-690.
- [2] Mills D G, Egnor D E, Edelson G S. A performance comparison of differential frequency hopping and fast frequency hopping [C] // IEEE MILCOM 2004, Monterey, CA, 2004:445-450.
- [3] 陈智, 李少谦, 董彬虹. 差分跳频通信系统抗多音干扰的性能分析[J]. 信号处理, 2007, 23(2):184-187. Chen Zhi, Li Shaoqian, Dong Binhong. Performance of Differential Frequency Hopping System in Multitone Jamming [J]. Signal Processing, 2007, 23(2): 184-187. (in Chinese)
- [4] 陈智, 李少谦, 董彬虹. 瑞利衰落信道下差分跳频通信系统抗多音干扰的性能分析[J]. 信号处理, 2007, 23(3):325-329. Chen Zhi, Li Shaoqian, Dong Binhong. Performance Analysis of Differential Frequency Hopping System with

- multitone jamming Over Rayleigh Fading Channels [J]. Signal Processing, 2007, 23(3):325-329. (in Chinese)
- [5] 董彬虹; 李少谦; 史锋旗. 一种差分跳频码发生器的构造方法 [J]. 电子与信息学报, 2010, 32(04): 816-820.
- Dong Bin-hong, Li Shao-qian, Shi Feng-qi. A Differential Frequency Hopping Code Generator Construction Method. [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(04):816-820. (in Chinese)
- [6] 朱毅超, 甘良才, 郭见兵等. 同步短波差分跳频多址系统单用户及多用户检测的性能 [J]. 电子与信息学报, 2010, 32(01):151-155.
- Zhu Yi-chao, Gan Liang-cai, Guo Jian-bing, et al. Single-User and Multi-User Detection Performance of Synchronous Shortwave Differential Frequency Hopping Multiple-Access Systems [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(01):151-155. (in Chinese)
- [7] Cheng Zhuo, Wang Shu, Qu Xiao-xu, et al. Cognitive Radio Based Multiple Access Algorithm for Differential Frequency Hopping Network [C] // Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2009. WiCom '09. 5th International Conference on, 2009:1-4.
- [8] PROAKIS J G. Digital Communication [M] // New York: McGraw-hill, 2003:340-342, 559-560.
- [9] Teh K C, Kot A C, Li K H. Error probabilities of an FFT-based FFH/BFSK linear-combining receiver with partial-band noise jamming and AWGN [C] // Vehicular

Technology Conference Proceedings, VTC 2000-Spring Tokyo. IEEE, 2000:1410-1414.

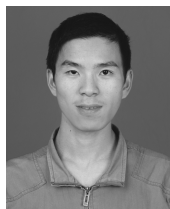
- [10] Lee J S, French R H, Miller L E. Probability of error analyses of a BFSK frequency hopping system with diversity under partialband jamming interference-Part I: Performance of square-law linear combining soft decision receiver [J]. IEEE Trans. on Communication, 1984, 32(6): 645-653.

作者简介



董彬虹(1972-),女,电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室副研究员,博士。主要研究方向为无线通信系统中的信号处理技术。

E-mail:bhdong@uestc.edu.cn



程乙钊(1986-),男,电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室硕士研究生。主要研究方向为无线通信系统中的信号处理技术。

E-mail:ymsmcyz@163.com



王 达(1986-),男,电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室硕士研究生。主要研究方向为无线通信系统中的信号处理技术。

E-mail:icewonder@163.com