 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v7i8.11570

Performance Research of FSK Scatter Communication System Based on Frequency-Hopping Implicit Diversity

Hao Meng Jingyuan Zhao Xiaozhe Zhang

The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang, Hebei, 050081, China

Abstract

This paper presents an FSK-based communication system integrated with duo-binary Turbo coding and frequency-hopping implicit diversity for ultralongrange scatter channels. The principles of FSK modulation/demodulation, Turbo encoding/decoding, and diversity techniques are described, and a MATLAB simulation platform is built to evaluate BER performance under various code rates and modulation orders. Simulation results indicate that, over Gaussian channels, lower code rates do not consistently outperform higher rates and performance depends strongly on modulation order. For 2FSK, 1/2 code rate gives the best performance. as modulation order increases, higher code rates yield better performance. Over Rayleigh fading channels with 8hop implicit diversity, lower code rates achieve significantly higher diversity gain, far exceeding their Gaussianchannel performance advantage.The study confirms the feasibility of the proposed scheme and provides a theoretical reference for parameter optimization in ultralongrange scatter communication systems, contributing to enhanced equipment performance in such scenarios.

Keywords

ultralongrange scatter communication; FSK; Turbo code; frequency hopping

基于跳频隐分集的 FSK 散射通信系统性能研究

孟颢 赵靖远 张晓哲

中国电子科技集团公司第五十四研究所，中国 · 河北 石家庄 050081

摘 要

本文针对超远距离散射通信信道特点，提出了频移键控（FSK）、双二进制Turbo编码与跳频隐分集技术相结合的通信系统设计方案，介绍了FSK调制解调、Turbo编译码算法、跳频隐分集技术的基本原理，搭建了Matlab仿真平台，对比分析了不同编码码率、不同调制阶数的误码率性能。仿真结果表明：在高斯信道下，FSK结合双二进制Turbo码并没有表现出码率越低、性能越好的趋势，并且性能与调制阶数有较强的关联特性，对于最低调制阶数的2FSK，1/2码率性能最优，随着调制阶数的逐渐升高，高码率的性能变好的趋势更明显，对于高阶FSK，高码率性能优于低码率；在瑞利衰落信道下，采用8重跳频隐分集技术，编码码率越低，性能越好，说明低码率相比高码率可以获得更高的分集增益，且分集增益差距远大于其高斯信道下性能差距。本研究验证了基于跳频隐分集的FSK散射通信系统的可行性，为超远距离散射通信系统的调制、编码参数优化提供了理论依据，对散射通信装备在超远距离散射通信场景的能力提升有重要参考价值。

关键词

超远距离散射通信；FSK；Turbo码；跳频

1 引言

散射通信是一种利用大气介质对电磁波的散射效应实现超视距传输的无线通信方式，与传统视距通信相比，散射通信具有单跳距离远、抗毁性强、不受地形限制等独特优势，在军事通信、应急通信和偏远地区覆盖等场景具有不可替代的作用。

散射通信信道具有传播损耗大、多径衰落显著的特征，这对调制解调技术的抗噪声、抗衰落能力以及能量效率提出了严苛要求，目前散射通信系统多采用相干解调波形体制，其与非相干解调相比有更优的解调性能，可以很好的适应近距离以及中距离（200km 以内）的散射通信链路，但对于远距离，特别是 400km 以上的超远距离散射链路，由于信道衰落速率增大、多普勒弥散严重，相干解调无法有效跟踪载波频率与相位变化，因此，需要研究基于非相干解调的波形体制，而多进制 FSK 通过合理的设计载波间隔，可以有效的抵抗超远距离散射信道中的多普勒弥散，解调端采用基于 FFT 的非相干解调算法，不需要进行复杂的载波与相位同步，算法实现复杂度低，并且 FSK 是一种恒包络波形，功放利用率很高，非常适合超远距离散射通信。此外，Turbo 码作为一种接近香农限的纠错编码方案，在极低信噪比条件下能

【作者简介】孟颢（1993–），男，中国河北石家庄人，硕士，工程师，从事无线通信技术研究。

提供显著的编码增益，本文采用的双二进制 Turbo 码相比较于单比特 Turbo 码，以双比特符号为单元进行编码，错误扩散更均匀，突发抵抗力更强，误码平层更低，再结合跳频与信道交织技术可有效对抗散射信道的频率选择性和时间选择性衰落。

鉴于目前基于跳频隐分集的 FSK 波形体制还未应用于散射通信型号装备，且该波形体制在超远距离散射通信中的具有重要的研究价值，本文对多进制 FSK 与双二进制 Turbo 码进行仿真与分析，首先，对比了高斯信道下不同码率下、不同调制阶数的误码性能，分析了 FSK 与信道编码码率的适配性；其次，仿真了瑞利衰落信道下，采用跳频隐分集的 FSK 误码性能，验证了该体制的抗衰落能力以及其在散射通信系统中的可行性。

2 调制与编码技术

2.1 FSK 调制技术

频移键控（FSK）是一种利用载波频率变化传递数字信息的调制方式，MFSK 称为 M 进制频移键控调制技术，其使用 M 个不同载波频率 $(f_1, f_2, f_3, ..., f_M)$ 来传输信息。当 M 进制符号间隔 T_s 与相邻载频间隔 Δf 关系满足 $\Delta f = 1/(2T_s)$ 时，称此 MFSK 为正交 MFSK。随着 M 值的增大，正交 MFSK 信号的带宽相应增加，导致其频带利用率下降，在相同比特能量与噪声功率谱密度比值（Eb/N0）的条件下，随着 M 值的增大，系统的误码率呈现下降趋势。因此，在信道带宽资源相对充裕而功率受限的应用场景下，MFSK 调制是一种值得考虑的方案，尤其适用于超低速率通信传输系统。MFSK 信号表示为 [2]

$$\begin{aligned} s_i(t) &= \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}}\cos(2\pi f_c t + 2\pi i \Delta f t) \\ &= \mathrm{Re}[v_i(t)e^{j2\pi f_c t}] \qquad i = 1,2,...,M, \quad 0 \le t \le T \end{aligned} \tag{1}$$

其中 f_c 为载波中心频率，Δf 表示 MFSK 相邻频率间隔，复包络 $v_i(t)$ 为

$$v_i(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}}e^{j2\pi i \Delta f_c t}, \quad i = 1,2,...,M, \quad 0 \le t \le T \tag{2}$$

FSK 的常用解调方法有非相干解调和相干解调，相干解调相比非相干解调有着约 0.5dB 的性能增益，但要获得相干解调的 0.5dB 性能增益并不容易，需要在接收端精准地估计载波频率与相位，这在衰落速率较快的超远距离散射通信中实现较困难、复杂度高，因此，本文将非相干解调作为研究的重点，其处理过程如图 1 所示。



图 1 FSK 非相干解调处理流程

非相干解调通过对接收信号进行离散傅里叶变换，将时域信号映射至频域，得到频域离散谱，进一步提取各目标频率的幅度值，该幅度值直接表征接收信号中对应载波频率的能量强度，软判决将各频点能量强度转化为量化的软信息用于后续的信道译码 [4]，其软信息推导过程如下 [5]：

MFSK 调制每个符号包含 N 比特信息，N=log2（M），根据比特信息不同，映射为 M 个不同的载波频率，频率集合可以表示为 $F = \{f_0, f_1, \cdots, f_{M-1}\}$，则发送符号集合可以表示为 $S = \{s_{f_0}, s_{f_1}, \cdots, s_{f_{M-1}}\}$，假设接收到的 FSK 信号为 r，发送的符号为 s，MFSK 信道转移概率为

$$p(r \mid s = s_{fm}) = K \cdot I_0\left(\frac{2\sqrt{E_s}}{N_0}|FFT(r)|\right), \quad m = 0,1,...M-1 \tag{3}$$

其中，$I_0(\cdot)$ 为第一类零阶修正贝塞尔（Bessel）函数。则对应的第 i 比特 b_i 的对数似然比为

$$LLR(b_i) = \log\left(\sum_{f_m \in F_i^{(0)}} p(r \mid s = s_{f_m})\right) - \log\left(\sum_{f_m \in F_i^{(1)}} p(r \mid s = s_{f_m})\right) \tag{4}$$

其中，$F_i^{(0)}$ 和 $F_i^{(1)}$ 分别表示 $b_i = 0$ 和 $b_i = 1$ 时映射的频率集合

$$\begin{aligned} F_i^{(0)} &= \{f \in F \mid b_i(f) = 0\} \\ F_i^{(1)} &= \{f \in F \mid b_i(f) = 1\} \end{aligned} \tag{5}$$

对贝塞尔函数进行泰勒展开并考虑 dual-max 方法，可得

$$LLR(b_i) \approx \max_{f_m \in F_i^{(0)}}\left\{\log\left(|FFT(r)|^2\right)\right\} - \max_{f_m \in F_i^{(1)}}\left\{\log\left(|FFT(r)|^2\right)\right\} \tag{6}$$

为了降低计算复杂度，考虑对调 max 运算与 log 运算，并加入修正因子得到

$$LLR(b_i) \approx \alpha \cdot \log\left\{\max_{f_m \in F_i^{(0)}}\left(|FFT(r)|^2\right)\right\} - \alpha \cdot \log\left\{\max_{f_m \in F_i^{(1)}}\left(|FFT(r)|^2\right)\right\} \tag{7}$$

2.2 Turbo 码

Turbo 编码由于其近香农限的优异性能被广泛应用于各种通信系统中 [12]，Turbo 码在低码率条件下具有很好的性能，但由于 Turbo 码本身自由距离较小，低码重的码字数目多，Turbo 码在高信噪比条件下存在误码平层，为了降低误码平层，提高在高信噪比下的性能，本研究使用了双二进制 Turbo 码，双二进制 Turbo 码在传统 Turbo 码的基础上对编码器结构进行了修改，一次性进入编码器两个比特，这样的目的是拥有更大的最小自由距离，在高信噪比下抗短周期错误扩散能力更强，并且相同码率下，双二进制 Turbo 码可以比传统 Turbo 码有更多的校验位，因此同一码率下双二进制 Turbo 码有更好的性能，删余对它的影响更小，双二进制 Turbo 码编码器结构如图 2 所示 [13]。

其中，A、B 为并行输入的 2bit 数据，Y、W、V 分别对应顺序编码的校验比特，Y’、W’、V’分别对应交织后编码输出的校验比特。

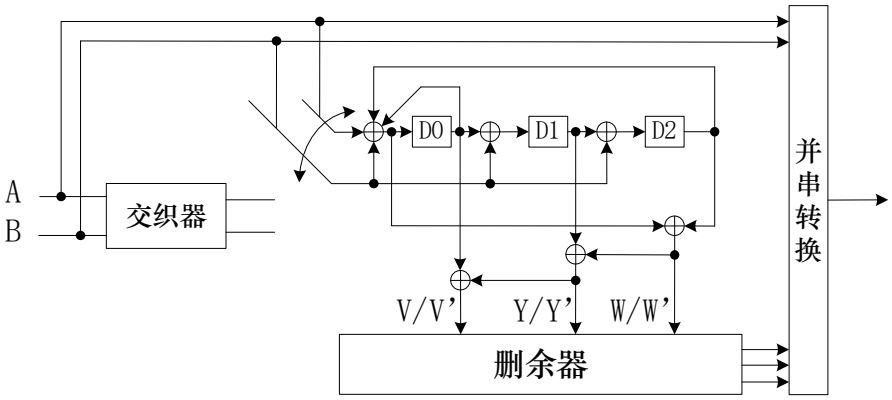


图 2 双二进制 Turbo 编码器结构

双二进制 Turbo 码内部交织器使用二次置换多项式（QPP）交织器 [13]，其映射函数为

$$f(i) = f_1 i + f_2 i^2 \bmod K \tag{8}$$

其中 K 是交织长度，f_1 和 f_2 是交织参数由交织长度决定，i 表示交织前的符号位置，$f(i)$ 表示交织后的符号位置。QPP 交织器支持任意长度，能够保证并行译码时无冲突内存访问，硬件实现友好，无需存储交织图案。

Turbo 码的译码算法主要有两大类，一种是基于维特比（Viterbi）译码的 SOVA（软输出维特比译码）算法，另一种是基于最大后验概率（MAP）的算法。二者都是基于迭代的算法，不同的是分量码的译码算法。MAP 算法由 Bahl、Cocke、Jelinek 和 Raviv 等提出，也称作 BCJR 算法，Log-MAP 算法和 Max-Log-MAP 算法是 MAP 算法的改进算法，几种译码算法中，SOVA 算法的计算复杂度最小、硬件实现较容易，但是性能最差；而 MAP 算法性能最优，但实现复杂度高，其他近似 MAP 算法性能虽然不如 MAP 算法，但是计算复杂度得以降低、译码速率显著提高，目前 Max-Log-MAP 算法已成为散射通信系统当中的主流译码算法 [14]。

2.3 跳频隐分集技术

跳频隐分集技术作为典型的隐分集技术 [15]，并非像显分集那样通过明显的空间、频率或者时间等维度来获取多个衰落独立的信号副本，而是借助于信号传输过程中本身所蕴含的一些能够抵抗衰落的特性来实现分集效果，在跳频隐分集通信系统中，主要依靠 3 项关键技术的融合最终获得了分集增益，分别是跳频通信、信道编码与信道交织，以 8 重跳频隐分集散射通信系统为例，其发端信号处理流程如图 3 所示。

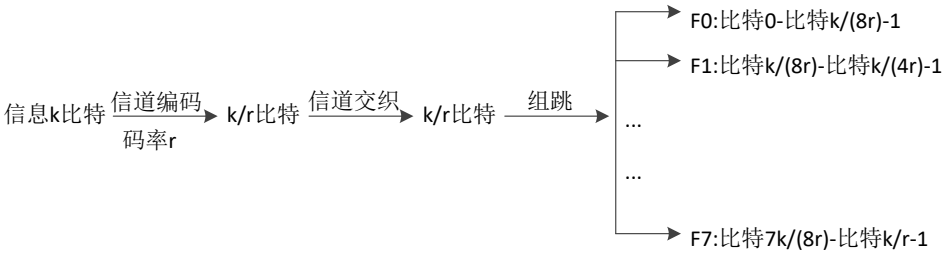


图 3 8 重跳频隐分集发端处理流程

在跳频隐分集通信系统中，发送端通过信道编码增加冗余，使发送码字具备纠错能力，再通过信道交织与跳频将传输码字“打散”并分布在多个非相干的频率上传输。在接收端，接收不同频率的信号经历了不同的衰落，通过解交织将某些频率深衰落造成的错误“打散”，此时同一原始信息比特所对应的能量和信息分散在了多个不同的码字符号中，并经历了相互独立的衰落，译码器自然而然的将不同频率、不同时间上的软信息进行合并。这种解码过程中的“信息合并”，在统计上完全等效于通过多个独立的衰落支路接收信号后进行合并再解码所获得的效果，因此，系统获得了分集增益。跳频隐分集与显分集在瑞利衰落信道下的误码性能（1/4 码率）曲线如图 4 所示，可见，跳频隐分集可以达到与显分集相近的性能。

3 仿真设计与结果分析

本文基于 Matlab 平台搭建多进制 FSK 通信仿真系统，仿真系统框图如图 5 所示。

首先仿真了高斯信道下，无信道编码时多进制 FSK 的误码性能，并与 BPSK 性能进行了对比，误码率曲线如图 6 所示。

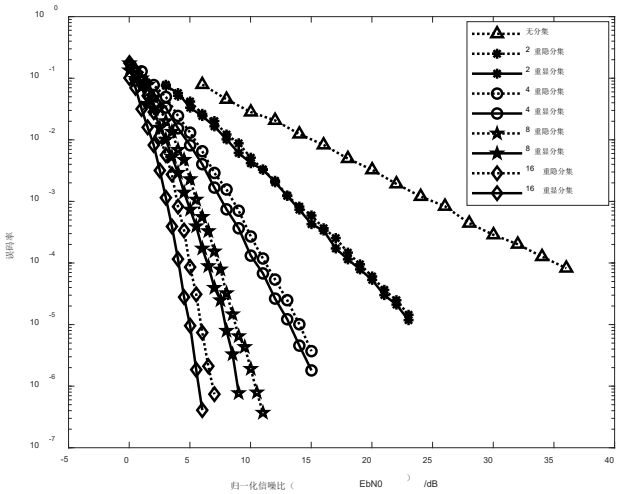


图 4 显 / 隐分集性能对比

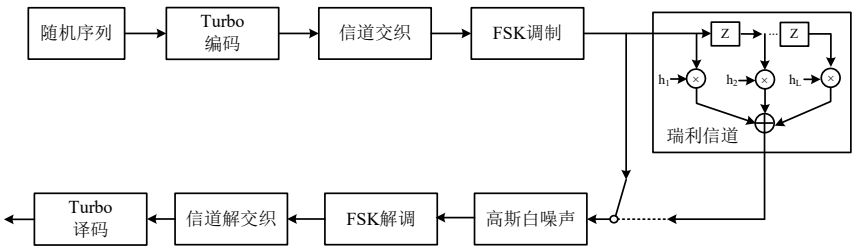


图 5 多进制 FSK 通信仿真系统框图

仿真参数如表 1 所示。

表 1 多进制 FSK 仿真参数设置

调制方式	2FSK~256FSK
信道类型	高斯信道 / 瑞利信道
编码方式	双二进制 Turbo 码
信息比特长度	256、288
码率	1/4、1/3、1/2、2/3、3/4、4/5

通过仿真结果可以看出，对于FSK调制，调制阶数越高，其误码性能越好，8FSK 的性能已经与 BPSK 信号的相干解调性能接近，64FSK~256FSK 性能明显好于 BPSK，这是由于在相同的频率间隔下，FSK 的阶数越高，相同符号携带的比特信息越多，但同时其占用信号带宽越宽，这正是以牺牲频率资源换取解调门限的体现。

进一步的，仿真了不同调制阶数 FSK 与不同码率双二进制 Turbo 编码结合时的高斯信道误码性能，误码率曲线如图 7 所示。

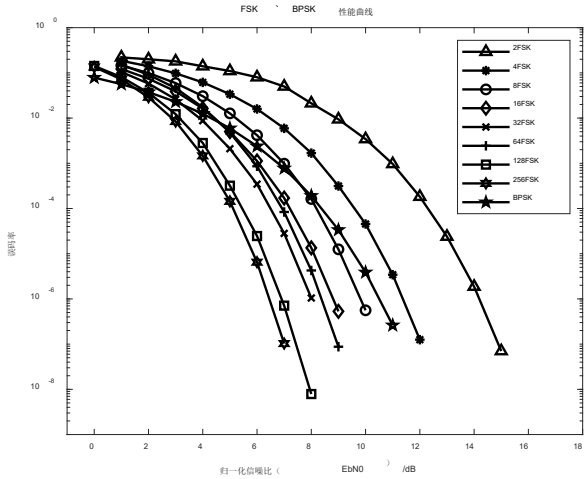
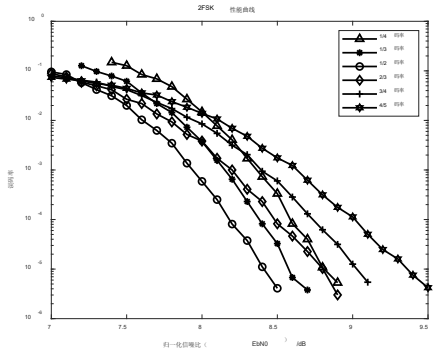
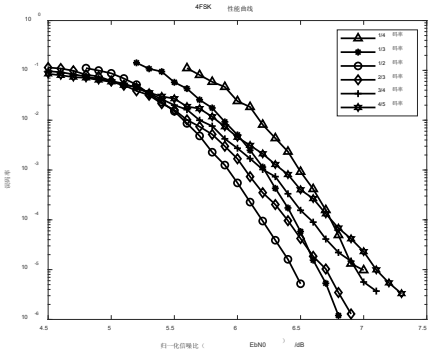


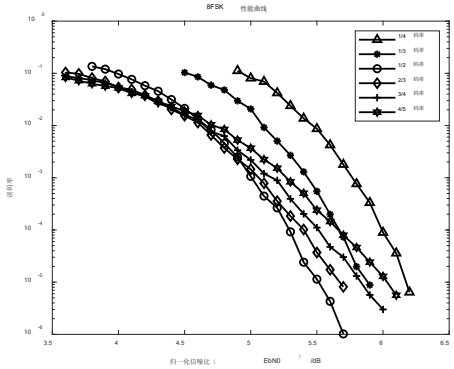
图 6 高斯信道下无编码 FSK 性能曲线



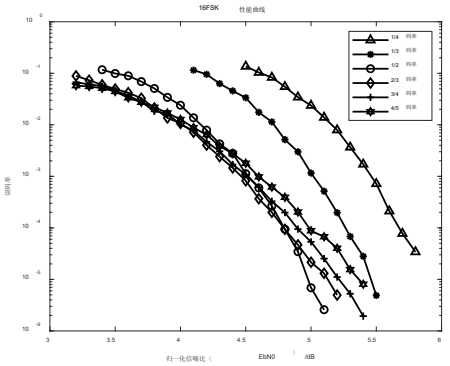
（a）2FSK 性能曲线



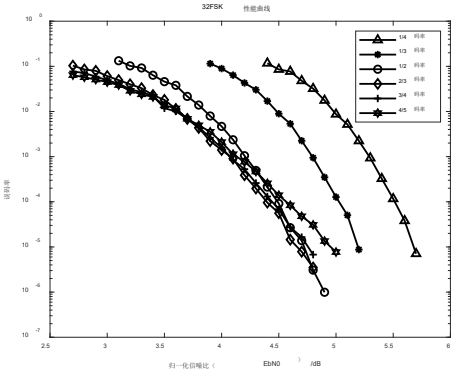
（b）4FSK 性能曲线



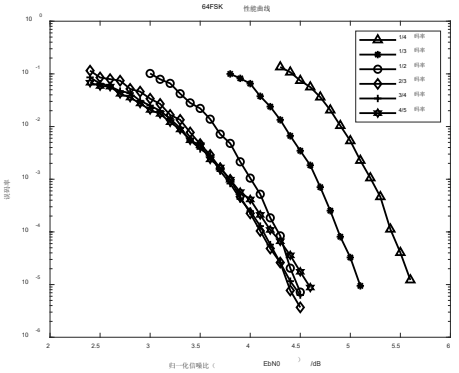
（c）8FSK 性能曲线



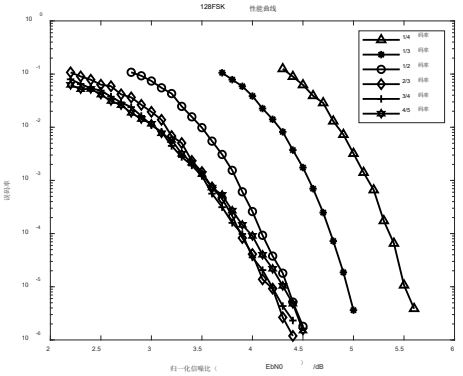
（d）16FSK 性能曲线



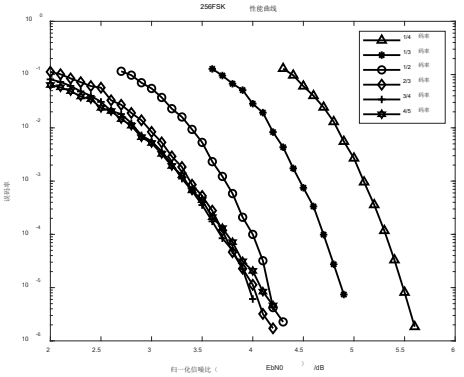
（e）32FSK 性能曲线



（f）64FSK 性能曲线



（g）128FSK 性能曲线



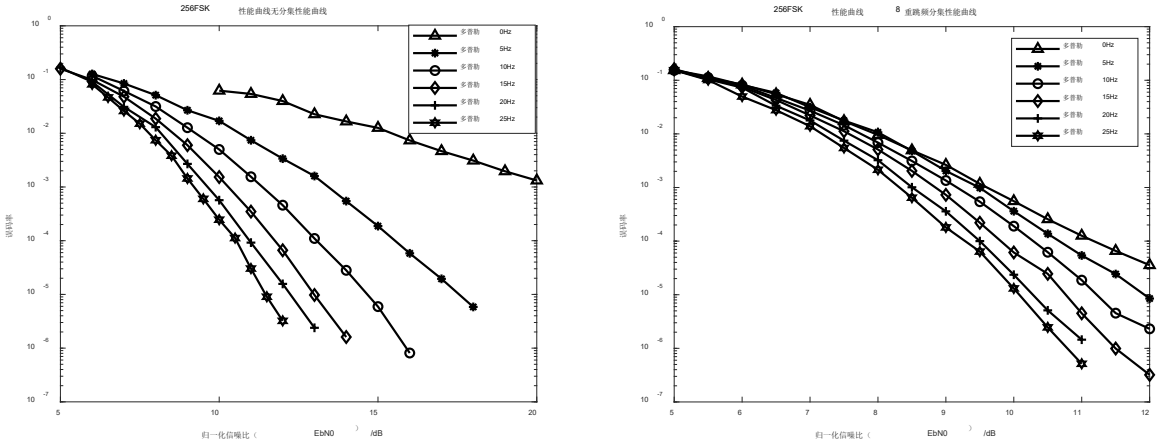
（h）256FSK 性能曲线

图 7 高斯信道下 Turbo 编码 –FSK 性能曲线

通过仿真发现，在高斯信道下，采用多进制 FSK 调制时，不同码率 Turbo 码的性能并没有表现出码率越低、性能越好的规律，不同码率的性能差异与 FSK 的调制阶数有较强的关联。对于调制阶数最低的 2FSK，1/2 码率时的性能最好，且码率低于 1/2 时，随着码率降低，性能逐渐变差，码率高于 1/2 时，随着码率升高，性能逐渐变差；当随着调制阶数的逐渐升高，各种码率的性能均逐渐变好，但不同码率的性能变化趋势有明显差异，码率越高，性能变好的趋势越明显，以调制阶数最低的 2FSK 与最高的 256FSK 做对比，1/4、1/3、1/2、2/3、3/4、4/5 码率分别获得了约 3.2dB、3.8dB、4.2dB、4.7dB、5.1dB、5.3dB 的性能提升，在 256FSK 时，2/3、3/4 与 4/5 码率的性能曲线几乎重合，略优于 1/2 码率，远优于 1/3 码率与 1/4 码率。

进一步的，本文仿真了瑞利信道下，不同码率下的 FSK 误码性能。信道采用典型的散射信道 7 径模型 [16]，各条径的功率衰减为 [-10,-3,0,-2,-5,-8,-10]，多径时延拓展按照中国电科 54 所经验公式计算 [17]，选用通信距离 800km、工作频段 5GHz、天线口径 4.2m，可得最大多径时延拓展约为 4.2us，最大多普勒按照链路实测值设置为 0~25Hz。

首先，以 256FSK、1/4 码率 Turbo 码为例，仿真了无分集与 8 重跳频隐分集时，瑞利信道下不同多普勒对性能的影响，误码率曲线如图 8 所示。



（a）无分集　　（b）8 重跳频隐分集

图 8 瑞利信道下 1/4Turbo–256FSK 性能曲线

仿真发现，在瑞利信道下不采用分集时，随着多普勒变大时，误码性能反而会变好，分析原因为瑞利信道存在时间选择性衰落，信道的相干时间与多普勒成反比，多普勒变大时，信道相干时间减小，当码块周期大于相干时间时，同一码块周期内不同时间传输的信息经历的信道衰落相互独立，而信道交织与信道编码可以充分利用这种不相关特性，达到时间分集的效果，从而获得分集增益。对于本仿真而言，符号速率约为 800sps，码长为 1024，每个符号对应 8 比特信息，因此每个码块 128 个符号，码块周期为 160ms，而多普勒为 25Hz 时，对应的相干时间为 40ms，远小于码块周期，可以获得较好的时间分集效果。

若采用 8 重跳频隐分集，在多普勒较小时，信道相干时间较小，时间分集效果不明显，增加跳频分集后性能有明显改善，例如在多普勒 5Hz 时，8 重跳频隐分集相比无分集的性能可改善约 6dB；当随着多普勒逐渐增大，时间分集效果明显，跳频隐分集带来的性能改善效果逐渐较小，例如在多普勒 25Hz 时，8 重跳频隐分集相比无分集的性能仅能改善约 1.5dB。

在实际的超远距离散射通信中，信道衰落情况非常复杂，多普勒变化范围较大，信道自身特性带来的时间分集并不可靠，因此需要采取跳频分集等手段来对抗衰落。

最后，以 256FSK、1/4 码率 Turbo 码为例，仿真了采用 8 重跳频隐分集技术时，25Hz 多普勒的瑞利信道下不同码率的性能差异，如图 9 所示。

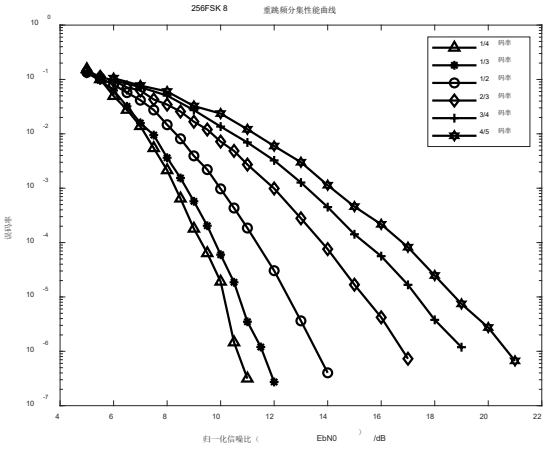


图 9 瑞利信道下不同码率 Turbo–256FSK 性能曲线

由仿真结果可以看出，码率越低，性能越好，该规律与高斯信道下有所差异，分析原因为，瑞利信道下存在衰落，需要靠分集抵抗衰落，而跳频隐分集的分集增益获取依赖于跳频、信道编码与信道交织三项关键技术的融合，低码率意

味着每个码块有更多的冗余信息，编码前单位能量的信息在编码后被分散到了更多的码字，经过信道交织与跳频，这些码字又被分散到了不同的频率，经历不同的信道衰落后到达接收端，因此低码率相较高码率而言，可以获得更高的分集增益，即表现为误码性能更优，因此，可以认为在衰落信道下，分集增益对性能的影响更大，高低码率的分集增益差距（最大 10dB 以上）远大于其高斯信道下性能差距（最大约 1.5dB）。

4 结语

本文针对超远距离散射通信场景，研究了 FSK 结合双二进制 Turbo 码在高斯信道与瑞利衰落信道下的性能，为有效对抗信道衰落，在仿真设计中加入了 8 重跳频隐分集技术，并针对 1/4、1/3、1/2、2/3、3/4、4/5 的不同码率进行了全面仿真分析。研究结果表明，在高斯信道下，FSK 结合双二进制 Turbo 码并没有表现出码率越低、性能越好的趋势，并且性能与调制阶数有较强的关联特性，对于最低调制阶数的 2FSK，1/2 码率性能最优，随着调制阶数的逐渐升高，高码率的性能变好的趋势更明显，对于高阶 FSK，高码率性能优于低码率；在瑞利衰落信道下，采用 8 重跳频隐分集，表现出码率越低，性能越好的规律，说明低码率相比高码率可以获得更高的分集增益，且分集增益差距远大于其高斯信道下性能差距。因此，进行 FSK 系统设计时，需要根据实际需求进行码率选择，若应用场景为微波视距通信，可参考高斯信道下的仿真性能曲线，应避免选择性能较差的 1/2 以下码率的编码方案，而若应用场景为超视距散射信道，特别是超远距离散射通信场景，则应参考瑞利信道下的仿真性能曲线，选用低码率编码方案以获得更优的分集增益。

参考文献

[1] 白杨,面向物联网的编码MFSK传输技术研究[D],西安电子科技大学,2024.

[2] 胡泽文.基于FPGA的FSK数字调制系统设计[D].电子科技大学,2011.

[3] 3GPP. 5G NR; Multiplexing and channel coding (Release 15) [R]. 3GPP TS 38.212 v15.0.0, 2017.

[4] 王杨, 李利军, 陈敬乔, 等. 一种基于FFT的FSK信号软解调方法:CN112003807B[P].2022-04-08.

[5] 白杨,罗进,白宝明,等.LDPC编码的M-FSK迭代检测方法与性能研究[J].无线电通信技术,2026,52(2):380-387.

[6] DURAND C, BOUTROS J, BEJJANI E. Forward Error Correction of FSK Alphabets for Wireless Noncoherent Transmissions over AWGN Channel[J]. IEEE Communications Letters,2000,4(10):318-320.

[7] XIANG Y,MILSTEIN L B. On the Use of FFH-MFSK for Ultra-low Power Communications in a Jamming Environment [J]. IEEE Access,2023,11:13469-13481.

[8] 王晓亚.一种短波衰落信道下FSK信号FFT解调方法[J].无线电通信技术,2015,41(6):27-31.

[9] Proakis J G.数字通信[M].4版.张力军,张宗橙,译. 北京:电子工业出版社,2003.

[10] 孙柏昶,陈超群.MFSK调制方式在极低速通信中的性能分析[J].无线电通信技术,2019,45(2):182-185.

[11] 梁立林.一种MFSK信号的软解调Turbo译码算法[J].通信技术,2024,57(3):251-254.

[12] 白宝明,孙成,陈佩瑶,等.信道编码技术新进展[J].无线电通信技术,2016,42(6):1-8.

[13] 徐敏伟.双二进制Turbo码编译码研究与FPGA实现[D].南京理工大学,2018.

[14] 林毅,董妮娅.基于FPGA的双二进制Turbo译码器的硬件实现[J].微电子学,2019,49(5):664-669.

[15] 张之栋,安宁,马宇. 基于跳频的散射通信新方法与仿真研究［J］. 机械设计与制造工程，2022，51 (3) :99—102.

[16] 王栋良,谢峥,赵世铎.基于三导频帧结构的散射信道载波频偏估计算法[J].计算机测量与控制,2025,33(03):176-182.

[17] 李志勇,秦建存,梁进波. 对流层散射通信工程[M]. 北京:电子工业出版社,2017.

[18] 张涛,刘莹,孙柏昶,等. 对流层散射通信及其应用［M］. 北京:电子工业出版社,2020.