



米捷. 基于自适应反馈信道调制的多信道跳频通信系统异常跳变识别方法研究[J]. 轻工学报, 2021, 36(4): 112-117.

MI J. Research on abnormal hopping recognition method of multi-channel frequency hopping communication system based on adaptive feedback channel modulation[J]. Journal of Light Industry, 2021, 36(4): 112-117.

DOI:10. 12187/2021. 04. 014

中图分类号: TN919 文献标识码: A 文章编号: 2096-1553(2021)04-0112-06

# 基于自适应反馈信道调制的多信道跳频通信系统异常跳变识别方法研究

Research on abnormal hopping recognition method of multi-channel frequency hopping communication system based on adaptive feedback channel modulation

米捷

MI Jie

河南工程学院 计算机学院, 河南 郑州 451191

School of Computer, He'nan University of Engineering, Zhengzhou 451191, China

## 关键词:

多信道跳频通信; 异常跳变; 特征识别; 信道均衡

## Key words:

multi-channel frequency hopping communication; abnormal hopping; feature recognition; channel equalization

**摘要:**针对多信道跳频通信系统常受信道跳变的干扰而导致通信信道异常的问题, 基于自适应反馈信道调制设计了一种新的多信道跳频通信系统异常跳变识别方法. 该方法首先构建系统信道传输模型, 结合空间信道均衡方法对其展开输出转换控制, 并采用判决反馈调节方法调节其载波调制和波束输出结果, 继而建立信道反馈均衡控制模型; 然后通过自适应参数调节方法进行系统的均衡设计和参数辨识优化, 并利用扩频处理提高信道输出增益, 再根据信道差异特征点提取结果识别异常跳变位置信息. 仿真结果表明, 该方法对多信道跳频通信系统的异常跳变识别准确性较高, 应用该方法后通信信道均衡性较好.

收稿日期: 2020-09-09

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(20A520010)

作者简介: 米捷(1981—), 女, 河南省郑州市人, 河南工程学院讲师, 主要研究方向为数据通信技术.

**Abstract:** Multi-channel frequency hopping (FH) communication systems are often disturbed by channel hopping, which results in channel anomalies. In order to solve this problem, an adaptive feedback channel modulation method was designed to identify the abnormal hopping of a multi-channel FH communication system. Firstly, the channel model of the multi-channel FH communication system was constructed, and the output conversion control was developed by combining the space channel equalization method, and the carrier modulation and beam output were adjusted by the decision feedback regulation method, then the channel feedback equalization control model of the multi-channel FH communication system was established. Based on this, the adaptive parameter adjustment method was used to carry out the equalization design of the multi-channel FH communication system and the optimized parameter identification, the channel output gain was improved through spread spectrum processing, and then the abnormal hopping position information was identified according to the extracted results of channel difference feature points. The simulation results showed that this method was more accurate in identifying the abnormal hopping of multi-channel FH communication system, and the communication channel equalization was better after the application of this method.

0 引言

目前,多信道跳频通信系统被广泛应用于短波通信、远程卫星通信、舰载通信等领域,对多信道跳频通信系统进行优化设计,可实现远程回波探测和信息传输<sup>[1]</sup>.但由于多信道跳频通信系统易受所处环境的干扰,容易出现异常跳变和信道失衡的现象,导致其输出稳定性较差.因此,需要对该系统进行信道均衡控制,并结合异常跳变识别实现对系统输出的均衡调节<sup>[2]</sup>,从而提高系统的稳定性.

对多信道跳频通信系统的跳变识别建立在对通信信号的载波分析和信道调节基础上,结合波束调节和反馈调制,分析多信道跳频通信系统的异常跳变特征,可有效提高系统的信号识别能力<sup>[3]</sup>.目前,对多信道跳频通信系统的异常跳变识别方法主要有载波调制方法、多通道波束形成方法、分数间隔均衡调制方法、高阶谱识别方法等.此外,文献[4]提出了基于小波分析法的信道跳频通信系统异常跳变检测方法,通过小波分析法滤除通信系统噪声,由此完成跳变识别和信号检测.但该方法的时间开销较大,系统稳定性较差.文献[5]提出了基于同步字头法与并行捕获相结合的双通道跳频通信系统异常跳变捕获方法,根据信号的回波参数分

析结果,定位异常跳变节点,提高了对异常跳变的识别和定位的精度.但该方法在进行多信道跳频通信系统异常跳变识别过程中的模糊度较大,识别稳定性较差.

鉴于此,本文拟基于自适应反馈信道调制设计一种新的多信道跳频通信系统异常跳变识别方法,在构建系统信道模型的基础上,建立信道反馈均衡控制模型,再通过扩频处理提高信道的输出增益,继而根据信道的差异特征点提取结果来实现对异常跳变的有效识别,以期提高对异常跳变定位识别的准确性,降低通信系统的输出误码率.

1 多信道跳频通信信道均衡模型构建

为了实现多信道跳频通信系统异常跳变识别,首先需要采用移相键控 (PSK) 调制方法设计通信信道,再结合多阵元节点融合方法对接收的信号进行时延参数估计<sup>[6]</sup>.在此基础上,通过空间信道均衡调度方法检测脉冲回波,根据检测结果分析多信道跳频通信的异常跳变特征,构建信道传输模型,再结合空间信道均衡方法进行系统的输出转换控制,根据直接序列扩频后序列的信道输出增益<sup>[7]</sup>.

## 1.1 信道线性调频滤波与均衡

多信道跳频通信系统接收脉冲的回波参数为

$$J = \sum_{i=1}^n x(n)\rho \times z(k) - R_{MDMMA}(k)$$

其中,  $x(n)$  表示系统的传输信号,  $\rho$  表示窄脉冲展宽,  $R_{MDMMA}(k)$  表示跳变带宽,  $z(k)$  表示系统传输码间的干扰. 通过直接序列扩频完成对多信道跳频通信系统频谱输出稳定性的调节, 再根据时延参数调节得到线性调频滤波结构, 如图 1 所示, 其中, 每个接收阵元均可单独进行自相关匹配处理<sup>[8]</sup>. 在此基础上, 采用直接序列扩频方法实现脉冲压缩, 然后分析多信道跳频通信信道的输出稳态特征量, 通过干扰抑制和调频回波检测完成信道的均衡调制, 以提高输出均衡性.

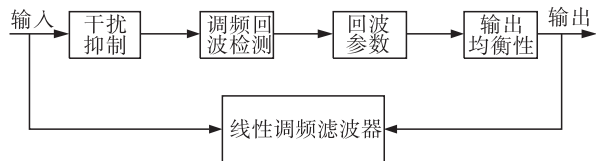


图 1 线性调频滤波结构

Fig. 1 Linear FM filter structure

## 1.2 信道均衡模型

在上述构建的多信道跳频通信系统的信道模型基础上, 通过误码补偿的方法实现对信道的均衡设计, 得到系统异常跳变的传输信号迭代式为

$$E(P) = z(k) \times J - R_{MDMMA}(K) \sum_{i=1}^n D(t)$$

其中,  $D(t)$  表示均衡调制补偿函数. 本文采用多径衰减抑制的方法完成对多信道跳频通信系统的频谱分解<sup>[9-10]</sup>. 在频带分布的带宽范围内, 得到调频信号  $p(t)$  的频谱. 假设码元的解扩宽度为  $T_a$ , 则输出多信道跳频通信信号的能谱信息为

$$T_n = \frac{h_i(t) \times p(t)}{E(P)}$$

其中,  $h_i(t)$  表示跳变特征分布函数. 结合通信信号的能谱信息, 通过信道冲激响应调节的方法检测多信道跳频通信系统的冲击滤波, 得到输出的稳态特征量为  $R_{MDMMA_i}(i = 1, 2, \dots, n)$ . 在稳态特征分布模型中, 假设阵元分布的间隔为  $d$ , 采用连续多径同频抑制得到多信道跳频通信的信号接收模型, 通过通信传输节点的多径增益滤波和分集均衡处理得到偏转信息. 在传感阵列中, 若系统的第  $m$  个传感节点接收到多普勒频移, 则通信信道的脉冲冲激响应函数为

$$K(t) = y \sum_{i=1}^n s_i(t)d + [x_m(t) - \theta_i(t)]R_{MDMMA_i}$$

其中,  $s_i(t)$  表示通信传输节点的多径增益,  $x_m(t)$  表示偏转信息,  $\theta_i(t)$  表示多信道跳频通信的扫频特征量,  $y$  表示分集均衡度. 通过最小方差估计实现分集均衡调度, 即可得到突变的载波频率下多信道跳频通信的信道均衡输出<sup>[11]</sup>. 结合误码抑制和时频尺度分解, 得到多信道跳频通信系统信道均衡模型为

$$C = \sum_{i=1}^n a_n(t)y + \tau_n(t)K(t)$$

其中,  $a_n(t)$  表示第  $n$  条信道的信道增益函数,  $\tau_n(t)$  表示第  $n$  条信道的误码序列. 至此, 即实现了对信道跳频通信信道均衡模型的构建.

## 2 异常跳变识别流程设计

### 2.1 异常跳变特征检测

本文基于自适应反馈信道调制设计了多信道跳频通信系统异常跳变识别方法, 在建立系统信道反馈均衡控制模型的基础上, 通过自适应参数调节方法进行系统的均衡调节, 然后基于二进制相移键控 (BPSK) 盲信道解调方法<sup>[12]</sup> 建立多信道跳频通信系统的二阶统计特征检测模型. 结合扩频函数, 通过直接序列扩频得到扩频输出结果为

$$D(t) = T_c \times C \times \beta$$

其中,  $T_c$  表示调节参数,  $\beta$  表示系统的均衡调节系数. 根据多信道跳频通信信道的时变特性进行异常跳变识别<sup>[13]</sup>, 可得信道中异常跳变识别的误差函数为

$$K(b) = \text{sgn} |\hat{s}_R(k) - \hat{s}_I(k)| + D(t)$$

其中,  $\text{sgn}$  为符号函数,  $\hat{s}_R(k)$  和  $\hat{s}_I(k)$  分别表示调制变量和误差分量. 假设多信道跳频通信系统接收端的随机序列扩频码为  $c(t)$ , 则通信信道的解调输出为

$$J_{\text{MMDMMA}_R} = c(t) + K(b)D(t)$$

对本地产生的伪随机序列码进行信道补偿和异常跳变特征检测, 得到检测统计量为

$$W = D(t) + c_k \times N - K(b) \times P$$

其中,  $c_k$  表示抽头系数,  $N$  表示异常数据的采样长度,  $P$  表示噪声项. 结合随机序列重组, 得到异常跳变检测输出结果为

$$Z = \frac{\hat{e}_R^2(k) (\hat{e}_R^2(k) \times \hat{z}_R^2(k) + \hat{z}_I^2(k))}{W}$$

其中,  $\hat{e}_R^2(k)$  表示通信误差序列,  $\hat{z}_R^2(k)$  表示输出信号能量增益比率,  $\hat{z}_I^2(k)$  表示载频,  $\hat{e}_I^2(k)$  表示通信通频带宽. 由此建立多信道跳频通信的异常跳变特征检测模型, 继而根据特征检测结果实现异常跳变识别定位.

## 2.2 跳变识别定位

多信道跳频通信系统节点发送的跳变特征量的载频分量为

$$M = |h(k) + a(k)| - n(k)$$

其中,  $h(k)$  表示第  $i$  条传输信道的能量带宽,  $a(k)$  表示不同时延的回波信号,  $n(k)$  表示信道的噪声分量. 结合跳变特征量的载频分量, 通过带宽滤波检测和扩频处理提高信道输出增益, 再根据信道的差异特征点提取结果实现多信道跳频通信系统的异常跳变识别<sup>[14-15]</sup>, 得到收敛迭代函数为

$$F = D(t) (J_{\text{MMDMMA}_R} + a_n(t)) + ZM$$

收敛迭代是一种不断用变量的旧值递推新

值的过程, 利用上述函数确定迭代法的收敛性, 从而确定迭代是否终止. 根据特征检测结果, 结合信号检波分析进行系统异常跳变定位, 提高系统的均衡性和稳定性, 过程如下:

$$A = \frac{F \times Z \times |h(k) + a(k)|}{M \times W}$$

## 3 仿真与结果分析

为验证本文设计的多信道跳频通信系统异常跳变识别方法的实际应用性能, 设计如下仿真实验加以验证.

假设通信系统的节点辐射半径为 50 m, 信道的传输带宽为 120 kb/s, 扩频时延为 0.25 ms, 干扰强度为 0~20 dB, 最大迭代次数为 100, 信号采样长度为 1024 bit. 根据上述仿真参数, 得到多信道跳频通信系统的传输信号模型如图 2 所示.

当节点辐射半径为 31~40 m 时, 利用本文方法对图 2 所示的通信信号进行异常跳变识别, 结果如图 3 所示.

分析图 3 可知, 当节点辐射半径为 31~40 m 时, 利用本方法识别出了在 1.32 s 处的跳变, 以及在 1.37~1.42 s 处不同程度的异常跳变, 且本方法能有效实现对多信道跳频通信系

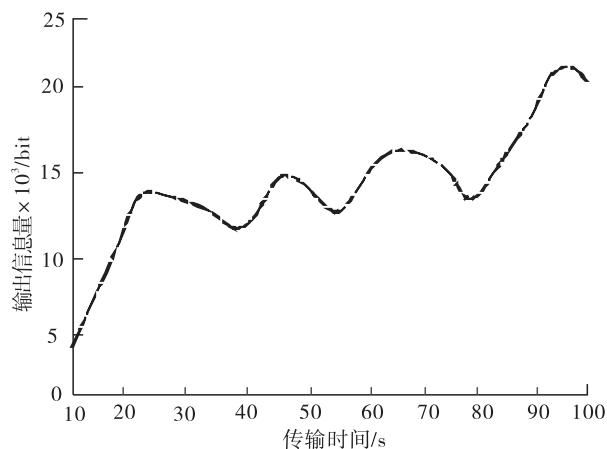


图2 多信道跳频通信系统的传输信号

Fig. 2 Transmission signal of multi-channel frequency hopping communication system

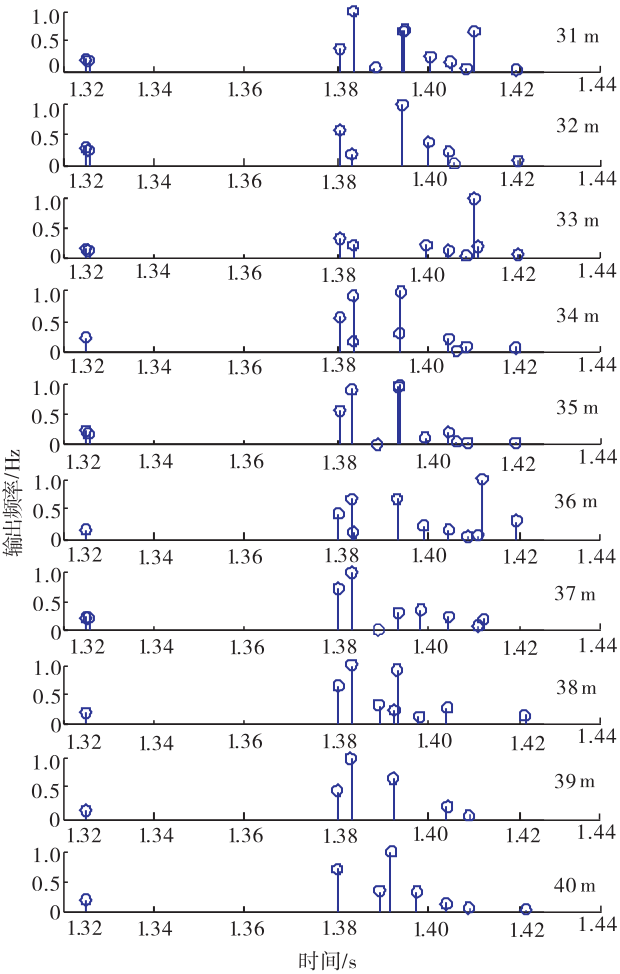


图 3 多信道跳频通信系统的异常跳变识别  
Fig. 3 Abnormal hopping recognition of multi-channel frequency hopping communication system

统异常跳变的定位识别. 该方法的冲激响应增益较大, 可有效提高对异常跳变定位识别的准确性. 其原因在于该方法通过自适应参数的调节实现了对通信系统的优化参数辨识, 再根据信道差异特征点提取结果实现了对异常跳变信息的准确识别.

为进一步验证本文方法的应用性能, 且避免测试结果的单一性, 将本文方法与基于小波分析法的信道跳频通信系统异常跳变检测方法<sup>[4]</sup>和基于同步字头法与并行捕获相结合的双通道跳频通信系统异常跳变捕获方法<sup>[5]</sup>进行性能对比测试, 结果如表 1 所示.

由表 1 可知, 随着实验迭代次数的增加, 不

表 1 多信道跳频通信系统误码率测试

Table 1 Bit error rate test of multi-channel frequency hopping communication system

| 迭代次数/<br>次 | 误码率   |          |          |
|------------|-------|----------|----------|
|            | 本文方法  | 文献[4] 方法 | 文献[5] 方法 |
| 100        | 0.027 | 0.085    | 0.144    |
| 200        | 0.030 | 0.089    | 0.159    |
| 300        | 0.032 | 0.096    | 0.167    |
| 400        | 0.065 | 0.098    | 0.198    |

同方法的传输误码率均随之增加. 但相比之下, 采用本文方法的多信道跳频通信系统传输误码率更小, 最高仅为 0.065. 这表明, 利用本文方法识别多信道跳频通信系统异常跳变后, 有效降低了通信系统的输出误码率, 提高了系统的信息传输质量.

4 结语

本文基于自适应反馈信道调制设计了多信道跳频通信系统异常跳变识别方法. 该方法首先构建通信信道传输模型, 并对其展开输出均衡控制; 然后在均衡调节的基础上, 通过 BPSK 盲信道解调方法建立多信道跳频通信系统的二阶统计特征检测模型, 从而实现对系统异常跳变的识别和差异性特征的检测. 仿真结果表明, 利用本方法进行多信道跳频通信系统异常跳变识别的准确性较好、信息输出误码率较低. 下一步将考虑从提高异常跳变识别时效性的角度对该方法作进一步优化.

参考文献:

[1] 滕文. 多信道跳频网络的协议序列性能研究[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(7): 59.  
[2] 邸珩烨. 基于多径码间干扰滤波的短波通信优化[J]. 物联网技术, 2015, 5(10): 47.  
[3] KUDOH E, FUJISAWA H, SATOH K. Construction of frequency-hopping system using RF communications trainer[J]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018, 16(8): 280.

- [4] 周玮. 水声信道跳频通信系统异常跳变检测模型仿真[J]. 计算机仿真, 2019, 36(9): 483.
- [5] 孙慧贤, 张玉华, 唐友喜, 等. 双通道跳频通信系统同步捕获方法[J]. 探测与控制学报, 2019, 41(6): 23.
- [6] 郭静波, 谭博, 蔡雄. 基于反相双峰指数模型的微弱瞬态极低频信号的估计与检测[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(8): 1682.
- [7] KUVSHYNOV O, SHYSHATSKYI A, ZHUK O, et al. Development of a method of increasing the interference immunity of frequency-hopping spread spectrum radio communication devices [J]. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2018, 29(98): 74.
- [8] 陈友淦, 许肖梅, 张兰, 等. 浅海水声信道模型差异对纠错码性能分析的影响[J]. 兵工学报, 2013, 34(11): 1404.
- [9] 王小文. 基于特征库识别法的移动通信网络异常流量监测系统[J]. 长春师范大学学报, 2019, 38(8): 30.
- [10] SU H T, LIU H W, SHUI P L, et al. Adaptive beamforming for nonstationary HF interference cancellation in skywave over-the-horizon radar [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(1): 312.
- [11] 何信旺, 芮赞, 王宗杰, 等. 滤波器组 UMTS 系统的信道估计研究[J]. 计算机技术与发展, 2015, 25(9): 57.
- [12] VELLAKUDIYAN J, PALLIYEMBIL V, ANSARI I S, et al. Performance analysis of the decode-and-forward relay-based RF-FSO communication system in the presence of pointing errors [J]. IET Signal Processing, 2019, 35(11): 2070.
- [13] LEE S, KIM S, SEO M, et al. Synchronization of frequency hopping by LSTM network for satellite communication system [J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(11): 2054.
- [14] 吴明钦. 基于数字信道化方法的跳频信号接收研究[J]. 通信技术, 2019, 52(5): 1065.
- [15] 乐天, 李国峰. 基于业务优先级划分的虚拟网可靠性映射算法[J]. 计算机工程, 2019, 45(2): 76.