

基于 KNN 信道识别算法的无前后缀 频域均衡技术

刘家玉, 韩军, 陈宝文

(中国电子科技集团公司 第五十四研究所, 石家庄 050081)

摘要: 为了提高单载波频域均衡 (SC-FDE) 系统的频带利用率和通信速率, 提出了一种基于 KNN 信道识别算法的无前后缀频域均衡技术; 该技术通过构建不同信道环境下带有导频的训练数据集, 根据训练数据通过不同信道条件下的特征并使用 KNN 算法进行分类, 进而确定信道类型及信道最大多径时延, 通过信道最大多径时延合理确定无前后缀重叠剪切频域均衡算法的最优重叠剪切长度, 进而消除多径干扰对无前后缀频域均衡数据的影响, 达到最优解调性能; 仿真表明: 基于 KNN 的重叠剪切算法与文献推荐的 50% 重叠剪切法相比, 性能基本一致, 即在误码率为 10^{-3} 的情况下, 信噪比恶化不大于 0.5 dB; 此算法准确确定了最优重叠长度, 减少了大量无效的重叠长度, 保证了多径信道下系统的误码性能, 达到性能和复杂度的平衡。

关键词: 无线通信技术; 频域均衡; 重叠剪切算法; KNN 算法; 信道估计; 最优重叠长度; Turbo 码; 多径衰落

Prefix-free and Suffix-free Frequency Domain Equalization Technology Based on KNN Channel Identification Algorithm

LIU Jiayu, HAN Jun, CHEN Baowen

(China Electronics Technology Group Corporation No. 54 Research Institute, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: In order to improve the frequency band utilization and communication rate of single-carrier frequency domain equalization (SC-FDE) system, a prefix-free and suffix-free frequency domain equalization technology based on K-Nearest-Neighbors (KNN) channel identification algorithm is proposed. This technology constructs training data sets with pilots in different channel environments, and classifies the data sets by using the KNN algorithm and the characteristics of the training data under different channel conditions, and then determines the channel type and the maximum delay of the multipath channel. The optimal overlap-cut length of the frequency-domain equalization algorithm without prefix and suffix overlap-cut is reasonably determined by the maximum delay of the multipath channel, and then the influence of multipath interference on the frequency domain equalization data without prefix and suffix is eliminated, and the optimal demodulation performance is achieved. The simulation shows that compared with the 50% overlap-cut method recommended in the paper, the KNN-based overlap-cut algorithm has basically the same performance, that is, when bit error rate is 10^{-3} , signal-to-noise ratio deterioration is not more than 0.5 dB. This algorithm accurately determines the optimal overlap length, reduces a large number of invalid overlap lengths, ensures the excellent bit error performance of the system in multipath channels, and achieves a balance between performance and complexity.

Keywords: wireless communication technology; frequency domain equalization (FDE); overlap-cut (OC) method; KNN algorithm; channel estimation; optimal overlap length; turbo codes; multipath fading

0 引言

单载波频域均衡技术 (SC-FDE) 是在衰落信道下实现高速可靠传输的重要技术之一, 它具有良好的抗多径性能并且可以改善系统性能, 在现代得到了越来越广泛的应用^[1]。SC-FDE 综合应用了传统正交频分复用技术 (OFDM) 与单载波技术之间独特的优势, 能够迅速高效可靠地解决码间干扰等问题, 并因此能够实现很好的克服在传统 OFDM 系统中峰均比过高、子信道间相互干扰 (ICI)

以及单载波时域均衡技术 (SC-TDE) 复杂度过高^[2]的缺点, 同时能够保持与 OFDM 相似的复杂度^[3], 因此成为引起了学术界许多相关研究者共同的热点研究对象。传统上的单载波频域均衡技术往往需要在每个传输数据段前加入循环前缀 (CP), 且 CP 的长度应略长于信道传输的最大时延, 因此导致信道冗余、频带利用率下降^[4]。许多研究者都提供了方法来改变有 CP 的系统开销的情况, 当中包含了无 CP 传输、低 CP 传输和多符号封装技术研究等^[1], 本文重点研究无 CP 传输。

收稿日期: 2022-10-31; 修回日期: 2022-11-10。

基金项目: 通信网信息传输与分发技术国家级重点实验室基金 (FFX22641X010)。

作者简介: 刘家玉 (1998-), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要从事无前后缀频域均衡技术, 机器学习算法方向的研究。

通讯作者: 韩军 (1964-), 男, 河北人, 研究员, 高级工程师, 主要从事数字通信系统方向的研究。

引用格式: 刘家玉, 韩军, 陈宝文. 基于 KNN 信道识别算法的无前后缀频域均衡技术[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(1): 174-180.

2003 年 Ihan Martoyo 等人^[5]提出了重叠剪切频域均衡, 是无 CP 传输的一种重要方法。算法的核心思想是把发送信号经过信道的过程近似看作循环卷积, 然后再去除结果中误差大的部分^[6], 保留误差小的部分。首先, 把接受信号分割为长度相同的数据块, 每个数据块的长度为, 数据块加前后缀长度为, 之后经过点的快速傅里叶变换 (FFT) 到频域, 频域均衡后再通过点的快速傅立叶逆变换 (IFFT) 到时域, 保留长度为的有效数据, 去除前后缀, 得到最终结果。由于重叠剪切频域均衡未添加冗余作为保护间隔, 此算法改善了有 CP 传输时的传输效率。之后, 王伟^[7]在 SC-FDE 系统中的均衡技术研究一文中较为系统的介绍了单载波频域均衡技术, 并对如何进一步实现滤波器信道估计精度与计算复杂度平衡的问题进行研究, 提出了一种改进的自适应滤波 LS 算法。目前, 重叠剪切频域均衡已经在各个领域得到了广泛的应用, 曹蕾等人^[8]提出用重叠剪切算法与最小均方误差 (MMSE) 结合代替 Rake 接收机应用于频率选择性的直接序列码分多址 (DS-CDMA) 系统中; 李功把重叠剪切的 MMSE 频域均衡进一步应用于更复杂的宽带码分多址 (WCDMA) 系统^[9]; 洪浩^[10]用重叠剪切算法降低了 FFT/IFFT 的点数, 设计出了均衡器模块使其适用于 60 GHz 通信系统基带接收机。相关文献算法大多通过经验选择 50% 的重叠剪切长度^[23], 未与具体的信道相结合。

1968 年, Cover 和 Hart^[11]率先提出最邻近规则分类 (KNN) 算法, KNN 算法的具体思路是测试数据与训练集中 K 个最邻近的数据中的大多数分为一类^[12]。由于算法方便简洁且能很好的提高分类的效率和准确性, KNN 算法被广泛的应用于机器学习和模式分类领域。文献 [12] 在 KNN 算法的基础上改进了 K 值选取方式; 文献 [13] 在 KNN 算法的基础上结合协作表示分类等相关知识, 对 KNN 算法进行了改进与拓展; 文献 [14] 用 KNN 算法进行信道的检测与识别; 文献 [15] 还提出基于 KNN 的信道频率响应估计算法; 文献 [16] 将模糊 C-means 理论与传统 KNN 分类算法相结合, 简化了传统 KNN 算法的计算工作量、提高了分类效率。

1993 年由 C. Berrou 给出定义了一种 Turbo 码算法^[17], 在低信噪比的条件下, Turbo 码通过采用软输入软输出 (SISO) 迭代译码算法获得较低误码率^[18]。Turbo 码的技术优势十分明显, 它还拥有着良好稳定的信号抗衰落性、较高可靠的频带利用率性以及具有较很强可靠的抗干扰处理能力等优点^[19], 所以正日益地引起了国际和国内有关专家学者们的日益普遍重视。文献 [19] 对软输入软输出维特比 (SOVA) 译码算法提出改进, 减小了译码延时和计算复杂度; 文献 [20] 设计实现了一种支持多码率、自适应的双二进制码译 Turbo 码器并且已在 FPGA 上实现; 文献 [21] 研究了 Turbo 码高效编译码的方案用以空间通信; 文献 [22] 设计了一种资源占用较低、译码速率较高的高效并行译码器。

本文通过研究基于 KNN 算法的信道识别技术与重叠剪

切单载波频域均衡技术, 提出了一种基于 KNN 信道识别算法的无前后缀频域均衡技术。该技术将 KNN 算法与信道识别相结合, 进而识别出信号经过的具体信道模型和最小前后缀长度。通过信道最小前后缀长度仿真确定无前后缀重叠剪切频域均衡算法的最优重叠剪切长度, 与常用的 50% 重叠长度^[23]相比, 兼顾了抗干扰和降低复杂度两方面, 显著地降低了系统开销, 提高频带利用率和通信速率。除此之外, 本文采用 Turbo 编译码进一步降低误码率, 提高系统性能。本文章节 1 给出了相关算法的模型及基本原理, 章节 2 给出了相关的仿真结果及分析, 最后给出了相关结论。

1 算法模型

本文通过将接收信号划分为重叠数据块, 利用 KNN 算法确定最小前后缀长度, 再通过仿真确定最优重叠长度与最小前后缀长度的关系, 实现数据块前后缀重构以消除残余干扰。

1.1 重叠剪切频域均衡

衰落信道中的多径传播会导致符号间干扰 (ISI) 和信道间干扰 (ICI), 引起信道的频率选择性衰落, 严重影响信道传输的性能。为了避免多径干扰和子块间的干扰, 我们采用单载波频域均衡^[24]。单载波频域均衡往往需要使用一个单抽头的频域均衡滤波器, 这其中就必然需要信道矩阵是一个循环矩阵, 传输的符号序列中还需有周期性规律地依次插入循环前缀或保护间隔前缀等前后缀, 用于将信道的线性卷积关系转换为循环卷积^[25], 比如 CP 与添零 (ZP) 频域均衡。但是, CP 与 ZP 频域均衡加入循环前缀后, 产生了冗余数据, 降低了信道传输的速度^[7]。

本文在发送端发送无 CP 的数据符号, 在接收端利用重叠剪切算法重构 CP 再进行均衡, 消除块间干扰, 使得信道传输矩阵近似满足循环矩阵^[9], 避免了数据冗余的问题, 原理图如图 1 所示。

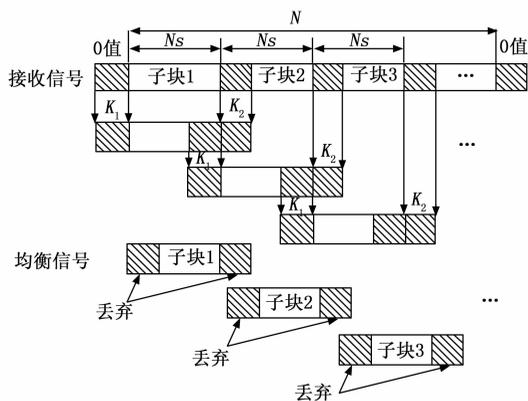


图 1 重叠剪切法的数据结构

重叠剪切均衡方案的原理是: 两个信号的循环卷积和线性卷积中间部分相同, 前后不同。将接收信号分为长度相同的子块, 各子块再结合前后数据形成数据块, 将数据块经过 FFT 变换到频域, 进行频域均衡, 再经过 IFFT 变

换到时域，去除前后数据，得到均衡后的子块^[9]。子块的长度 N_s 的值越小，子块间干扰的影响就越小，系统的均衡性能就越好；同时，运算的复杂度也会越高。本文通过仿真确定 N_s 的值，使其在保证性能的同时复杂度尽可能的低^[9]。

重叠剪切数据块均衡计算步骤^[7]如下：

设接收信号的总长度为 N ，把长度为 N 的接收信号分成 M 个长度为 N_s 的子块，每个子块前缀的长度都为 K_1 ，后缀的长度都为 K_2 。第一个子块和最后一个子块通过补零保证前后缀长度。信道输出信号根据 KNN 算法分类，得到具体传输信道 H 和最小前后缀长度，前后缀 K_1 、 K_2 取最小前后缀长度的倍数，根据误码率曲线对比得到最优重叠长度。

第 n 个重叠剪切数据块的表达式为：

$$r_n = r [N - (n - 1)N_s - K_1 + 1, N - (n - 1)N_s - K_1 + 2, \dots, N - (n - 2)N_s + K_2, N - (n - 2)N_s + K_2 + 1] \quad (1)$$

第 n ($n = 1, 2, 3, \dots, M$) 个重叠剪切数据块进行 N_g ($N_s + K_1 + K_2$) 点 FFT 可以得到：

$$R_n = FFT(r_n) \quad (2)$$

常用的均衡方式有迫零均衡和最小均方误差均衡，迫零均衡是最小化码间干扰的算法，最小均方误差 (MMSE) 是最小化错误出现概率的算法^[9]，同时考虑了码间干扰和噪声，所以本文选用最小均方误差的算法。MMSE 的公式为：

$$\varphi(k) = \frac{H^*(k)}{|H(k)|^2 + (E_s/N_0)^{-1}} \quad (3)$$

均衡后得到的数据块的表达式为：

$$Y_n = \varphi R_n \quad (4)$$

其中： φ 为 MMSE 的均衡矩阵系数阵， $H(k)$ 为信道频域响应， E_s 为信号的能量， N_0 为噪声的能量。

将 Y_n 进行 N_g 点 IFFT 得到：

$$y_n = IFFT(Y_n) \quad (5)$$

去掉 y_n 的前后缀 K_1 与 K_2 ，得到 y_n^s ，则最终的解调信号为：

$$y^s = [y_1^s, y_2^s, y_3^s, \dots, y_n^s, \dots, y_M^s] \quad (6)$$

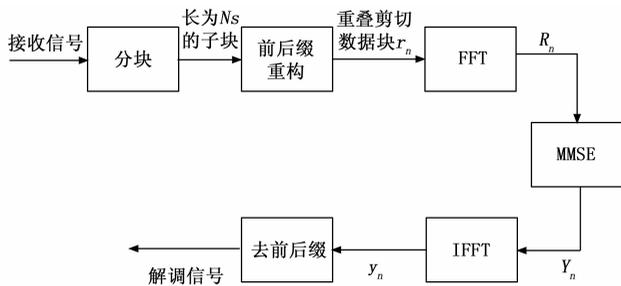


图 2 重叠剪切频域均衡流程图

1.2 KNN 算法

KNN 算法是机器学习中常用的监督学习算法^[26]，是一

种易于实现的非参数分类方法^[27]，因其简单高效在机器学习中占有重要地位。

KNN 算法的核心思想是用特征空间距离大小判定类别^[28]，首先计算出训练集和测试集的距离，按距离从小到大排序，找到距离最小的前 K 个数据，把 K 个数据中出现次数最多的标签赋给测试数据^[29]。KNN 算法有三个基本要素： K 值的选择、距离度量、确定分类决策规则^[12]。欧氏距离是最常用的距离度量方式，且具有易于理解、计算量小、使用范围广等优点^[30]，因此本文采用欧氏距离作为距离度量方式。分类决策规则采用最大投票原则，依据简单的“少数服从多数的思想^[31]”，标签数量最多的信道即为样本的信道。 K 值的选择也是 KNN 算法中重要的部分， K 值过高会导致算法的复杂度高、分类效率低下和计算量大的问题； K 值过低则会导致分类结果与实际结果误差增大，分类准确率低的问题^[32]。同时，传统的 KNN 分类方法可能会面临 K 个标签中不同标签数量一样的情况，导致分类错误^[33]。文献 [12] 提出基于 K 值选取策略的改进 KNN 算法，其思路为，设定 K 的初值，用欧氏距离计算距离，当出现 K 个标签中最多的类别标签数相等时，则求平均距离最小的一个标签为待测样本标签， K 值加 1 后重复上述步骤，直到 K 值达到设定循环次数或者分类准确率达到设定阈值后停止循环。经实验得到， $K = 4$ 时信道分类准确率最高，准确率为 0.972 0，本文选取 K 值为 4。

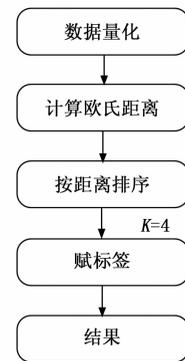


图 3 KNN 流程图

KNN 算法的分类步骤如下：

1) 由于数据集是多维数据，每个维度的数据由于单位不同差异可能会比较大。为了避免特征属性^[30]的差异引起的取值范围的不同，在计算数据距离之前，先对每一组数据进行量化处理。

2) 从数据集中选取 900 个数据组作为训练集 $S = [S^1, S^2, \dots, S^d, \dots, S^D]^T$ ，每个训练数据为 $S^d = [s_1^d, s_2^d, \dots, s_i^d, \dots, s_q^d]$ ，测试数据为 $X = [x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_q]$ 。计算测试数据和训练集的欧氏距离：

$$Dist(X, S^d) = \sqrt{\sum_{i=1}^q (x_i - s_i^d)^2} \quad (7)$$

3) 欧氏距离从小到大排序，选取与测试数据距离最小的 K 个值， K 的取值不同对测试数据的标签有很大影响。

经过测试得到, $K=4$ 时分类情况准确且 K 值较小, 所以本文选取 $K=4$ 。这 4 个测试数据中, 出现最多的标签赋给测试数据, 得到测试数据经过的信道情况。

1.3 Turbo 编译码

通信系统的信道在实际传输中存在各种干扰以及噪声, 会导致系统接收错误信号, 信道编码可以纠正错误信号, 降低误码率^[34]。C. Berrou 等人提出的 Turbo 码是一种具有高性能的信道编译码, 其具有在速率接近香农理论极限时仍保证一定的误码率的性能^[35], 因此本文采用 Turbo 码降低系统在衰落信道下的误码率。

Turbo 码的编码结构示意图如图 4 所示。待编码序列 $\{a_m\}$ 分为两路分别进入两个分量编码器, 第一个分量编码器按照原始信息序列进行编码, 生成校验位 c_i^{p1} ; 对于第二个分量编码器, 其先进入交织器, 经过交织, 改变输入信号的顺序后^[21], 生成校验位 c_i^{p2} , 之后按照不同的删余准则进行删余, 以达到码率匹配; 最后将系统比特和校验比特合并成一路输出。

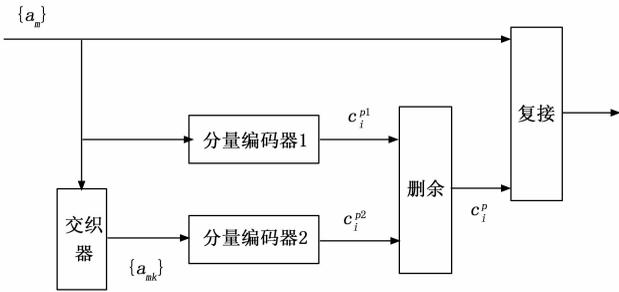


图 4 Turbo 码的编码结构

分量编码器和交织器是 Turbo 编码器的重要组成部分。根据差错控制编码的理论, 递归系统卷积码 (RSC) 优于非系统卷积码和系统卷积码^[21]。因此, 本文选择 RSC 码作为 Turbo 码的分量码。交织就是将输入的信息序列按照具体的规则进行位置置换, 减少了相邻码字的数量, 得到一组新的信息序列^[35]。交织器可以使分量编码器 1 和 2 的输出尽可能的不相关, 在迭代译码过程中, 能够相互提供外信息且交织后能够提高生成码字的码距, 提高译码性能^[35]。

图 5 是 Turbo 译码框图。其中, $z_m = [z_m^{p1}, z_m^s, z_m^{p2}]$ 是接收端接收到的数据, $\{z_m^s\}$ 对应系统位数据, 而 $\{z_m^{p1}\}$ 和 $\{z_m^{p2}\}$ 同样是位数据。Le1 和 Le2 是经过分量译码器计算得到的外信息, La1 和 La2 是对应比特的先验信息; 解交织变换是交织变换一种的逆过程, 将数据从置换后的位置还原到初始位置, 以原始位置顺序输出按交织顺序得到的 LLR。

当接收端接收到输入信号校验位数据 $\{z_m^{p1}\}$ 和系统位数据 $\{z_m^s\}$ 时, 分量译码器 1 开始工作, 第一次假设先验信息 La1 相等, 计算得到外信息 Le1, Le1 经过交织模块后得到先验信息 La2。信号校验位数据 $\{z_m^{p2}\}$ 、交织后的系统位数据 $\{z_m^s\}$ 与先验信息 La2 一起输入分量译码器 2, 得到外

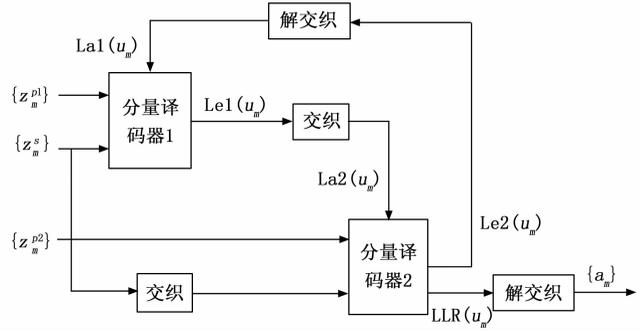


图 5 Turbo 码的译码结构框图

信息 Le2, Le2 外信息经过交织处理后得到先验信息 La1, 作为分量译码器 1 的先验信息, 如此迭代运算。当迭代次数满足最高迭代次数要求或者错误比特满足预设要求时终止迭代, 然后输出对数似然比 (LLR), 将 LLR 解交织之后输出, 再判决得到译码比特。

2 实验结果及分析

2.1 KNN 信道识别

通过利用一系列信道条件下所对应的信道响应矩阵数据构建训练数据集, 同时实施训练。当进行训练的时候, 不断调整 K 值, 在最后达到一个精度较高的估计结果。

本文选取 James W. Matthews 文献中, 经典的 7 径衰落信道模型, 设计通信体制, 并搭建仿真系统^[36]。信道类型为瑞利信道, 多普勒频移取 5 Hz, 信道的多径相对时延和平均功率的取值如表 1 所示。

本文将随机的发送信号分别通过信道 1、2、3, 每个信道选取 300 个输出数据, 组成训练数据集。将接受数据分别与 900 个训练数据求欧氏距离, 之后, 将欧氏距离从小到大排序, 选出最小的四个距离中标签相同最多者, 即为接收数据的标签, 由标签就可知道数据通过的具体信道模型。

表 1 多径信道参数表

	时延/ μs	功率/dB
信道 1	[0 0.588 2 1.176 5 1.764 7 2.352 9 2.941 2 3.529 4]	[-10 -3 0 -2 -5 -8 -10]
信道 2	[0 1.323 5 2.647 1 3.970 6 5.294 1 6.617 6 7.941 2]	
信道 3	[0 1.668 2 3.336 3 5.004 5 6.672 6 8.340 8 10.008 9]	

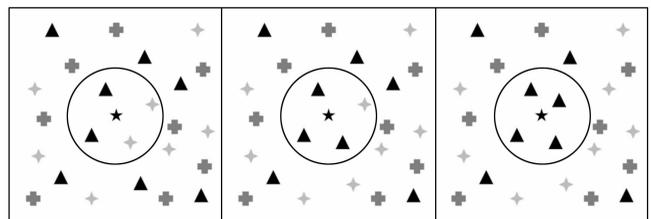


图 6 实际信道分类的三种情况

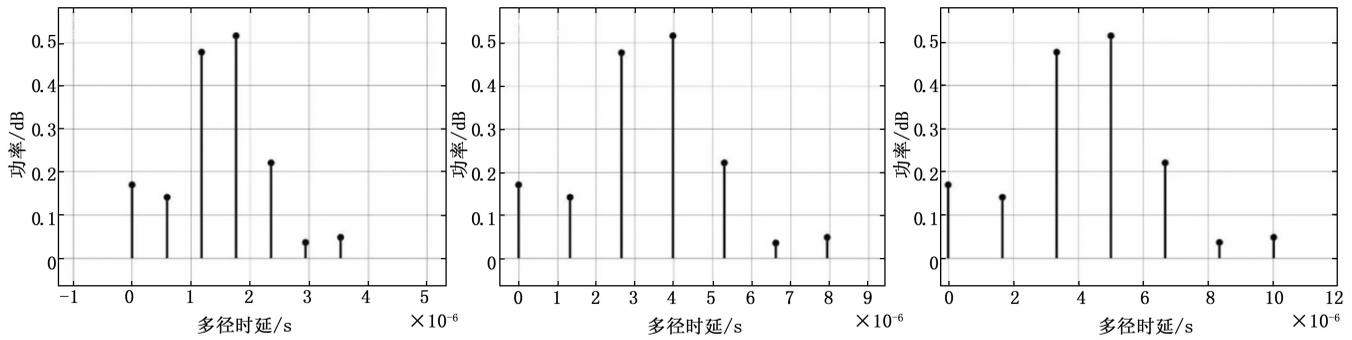


图 7 实际多径信道模型

根据标签得知具体信道模型，如图 7 所示，本文仿真采用 4 MHz 的符号速率，信道 1 的最大多径时延是 3.5 μs ，即多径干扰到 14 个符号；信道 2 的最大多径时延是 8 μs ，即多径干扰到 32 个符号；信道 3 的最大多径时延是 10 μs ，即多径干扰到 40 个符号。重叠剪切均衡算法的最小前后缀长度，需大于最大多径符号数，以避免码间串扰。

2.2 最佳前后缀长度确定

2.2.1 信道 1 仿真

本文用仿真来求最佳重叠长度，表 2 为仿真参数设置。

表 2 信道 1 仿真参数表

发送端	帧长	764 bits
	采样时间间隔	0.5 ms
	编码方式	Turbo 编码
	调制方式	BPSK
	均衡方式	重叠剪切(OC)
	分集方式	二分集
信道	仿真建模	信道 1 模型
接收端	均衡方式	重叠剪切(OC)
	均衡准则	MMSE
	译码方式	Turbo 译码
	N_s 的长度	512
	FFT/IFFT 长度	576,584,588,596,604,612,1 100

频域均衡选取的前后缀长度越长时，误码率性能越好，由图 8 可以得出，前后缀取长度为 3 和 3.25 倍最小前后缀长度时，与 50% 的前后缀长度^[15]相比，在误码率为 10^{-3} 情况下，信噪比恶化小于 0.5 dB；50% 的重叠剪切法对应的前后缀长度为 294，3、3.25 倍最小前后缀长度对应的前后缀为 42、46 个符号，前后缀长度减少 248~252 个符号，达到性能与复杂度的平衡。

2.2.2 信道 2 仿真

表 3 为仿真参数设置。

频域均衡选取的前后缀长度越长时，误码率性能越好，由图 9 可知，前后缀长度为 2.5、2.75 和 3 倍最小前后缀长度时，对应的长度分别为 80、88 和 96 个符号，都满足在误码率为 10^{-3} 情况下，信噪比恶化小于 0.5 dB。综上所述，最优重叠长度，约为最小重叠长度的 2.5~3 倍。

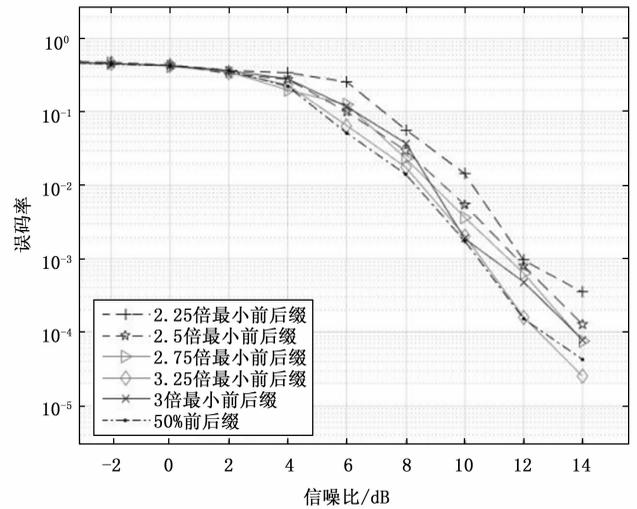


图 8 信道 1 前后缀为不同倍数的最小前后缀长度对误码率的影响

表 3 信道 2 仿真参数表

发送端	帧长	764 bits
	采样时间间隔	0.5 ms
	编码方式	Turbo 编码
	调制方式	BPSK
	均衡方式	重叠剪切(OC)
	分集方式	二分集
信道	仿真建模	信道 2 模型
接收端	均衡方式	重叠剪切(OC)
	均衡准则	MMSE
	Turbo 译码	译码方式
	N_s 的长度	512
	FFT/IFFT 长度	640,656,672,688,704,720,1 100

2.2.3 信道 3 仿真

表 4 为仿真参数设置。

频域均衡选取的前后缀长度越长时，误码率性能越好，由图 10 可知，2.5~3 倍最小前后缀长度既可以满足相同误码率性能相差不超过 0.5 dB，又满足前后缀长度减少了 272~312 个符号，大大降低了计算复杂度。前后缀取长度为最小前后缀长度的 2.5~3 倍时，达到最优重叠长度。

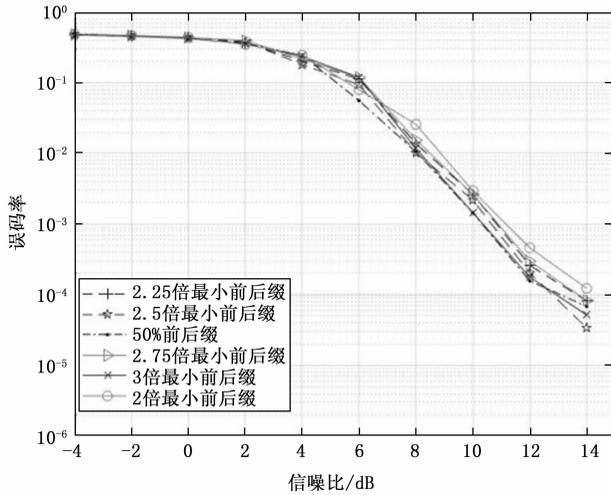


图 9 信道 2 前后缀为不同倍数的最小前后缀长度对误码率的影响

表 4 信道 3 仿真参数表

发送端	帧长	764 bits
	采样时间间隔	0.5 ms
	编码方式	Turbo 编码
	调制方式	BPSK
	均衡方式	重叠剪切(OC)
	分集方式	二分集
信道	仿真建模	信道 3 模型
接收端	均衡方式	重叠剪切(OC)
	均衡准则	MMSE
	Turbo 译码	译码方式
	N_s 的长度	512
	FFT/IFFT 长度	672、692、712、732、752、772、1 100

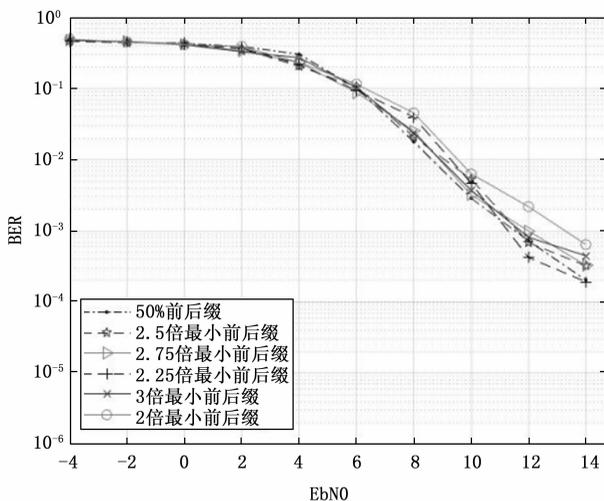


图 10 信道 3 前后缀为不同倍数的最小前后缀长度对误码率的影响

综上所述, 前后缀长度为 3 倍最小前后缀长度时, 达到最优效果, 不仅在相同误码率性能下信噪比相差不超过

0.5 dB, 而且大大减少了前后缀的长度, 降低了系统的复杂度, 兼顾了抗干扰和降低复杂度两方面。

3 结束语

本文将 Turbo 码、KNN 信道识别算法与重叠剪切频域均衡相结合, 通过仿真表明了算法的有效性。对于经典的 3 种 7 径多径模型, 首先利用 KNN 信道识别算法识别信道类型并确定无码间串扰需重构的最小前后缀长度, 进而通过进一步仿真确定了最优重叠长度与最小前后缀长度的关系。仿真表明当均衡算法构造的重叠长度为最小前后缀长度的 3 倍时可以达到与文献推荐的 50% 重叠法近似相同的性能, 即在误码率为 10^{-3} 的情况下, 信噪比恶化不大于 0.5 dB。

本文通过信道识别算法准确确定了最优重叠长度, 清除了码间干扰, 保证了多径信道下系统的误码性能, 可以节省大量无效的重叠长度, 减小了 FFT 块均衡的次数, 节省大量硬件资源, 减小系统处理时延; 另外由于采用了无 CP 均衡算法, 显著降低了系统帧结构的开销, 提高了系统的频带利用率, 本研究结果为以后快速确定最优重叠长度提供了理论支撑, 具有不错的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 王杰令. 无线通信中抗多径衰落新技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [2] 邓小红. 单载波频域均衡算法研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [3] 刘威. 基于 FRFT 的单载波均衡技术在地空通信中的应用研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [4] 刘喜庆. 无循环前缀 OFDM 无线传输的关键技术 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [5] MARTOYO L, WEISS T, CAPAR F, et al. Low complexity CDMA downlink receiver based on frequency domain equalization [C] // Proc. IEEE VTC2003-Fall, 2003, 987-991.
- [6] 王茂源. 毫米波超高速通信单载波频域均衡低复杂度实现方案研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [7] 王炜. SC-FDE 系统中的均衡技术研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [8] 曹蕾, 张欣, 杨大成. 频域均衡联合干扰删除的频域实现方法 [J]. 电子科技大学学报, 2008, 37 (6): 818-822.
- [9] 李功. 地铁传输环境中 WCDMA 系统单载波频域均衡技术研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [10] 洪浩. 60 GHz 通信系统中单载波分数级均衡算法研究与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [11] COVER T M, HART P E. Nearest neighbor pattern classification [J]. IEEE Trans. inf. theory, 1967, 13 (1): 21-27.
- [12] 陈德强. 基于改进 KNN 算法的图像分类研究 [D]. 贵州: 贵州民族大学, 2020.
- [13] 周承如. 基于协作表示的近邻分类方法研究 [D]. 南京: 江苏大学, 2020.
- [14] 朱宇坤. 网络隐蔽信道检测关键技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- [15] 李朔, 雷为民, 张伟. 基于 KNN-TSVR 算法的 MIMO-

- OFDM 系统信道估计 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2022, 43 (2): 176-181, 242.
- [16] 朱付保, 谢利杰, 汤萌萌, 等. 基于模糊 C-Means 的改进型 KNN 分类算法 [J]. 华中师范大学学报 (自然科学版), 2017, 51 (6): 754-759.
- [17] BERROU C, GLAVIEUX A, THITIMAJSHIMA P. Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding: Turbo-Code [J]. Proc Icc93 Geneva May, 1993: 1064-1070.
- [18] 王伟, 张靖. 一种 Turbo 乘积码编译码器的设计与实现 [J]. 计算机与网络, 2010, 36 (2): 56-59.
- [19] 吴雪玲. 基于 FPGA 的 Turbo 编译码的研究与设计 [D]. 绵阳: 西南科技大学, 2021.
- [20] 徐敏伟. 双二进制 Turbo 码编译码研究与 FPGA 实现 [D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- [21] 吴磊. 面向空间通信的 Turbo 编译码器设计与 FPGA 实现技术 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- [22] 张茜. 基于状态度量合并的高效并行 Turbo 码译码器结构设计及 FPGA 仿真 [D]. 重庆: 西南大学, 2022.
- [23] OBARA T, TAKEDA K, ADACHI F. Performance analysis of single-carrier overlap FDE [C] //2010 IEEE International Conference on Communication Systems. : IEEE, 2010: 446-450.
- [24] 董文泰. 基于 SC-FDE 散射通信系统的 MIMO 技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- [25] 涂星滨, 肖芳贵, 许肖梅. 水声通信中一种新型无前缀的单载波频域均衡技术 [J]. 电子与信息学报, 2021, 43 (3): (上接第 173 页)
- [6] 柏庆文. 基于无味卡尔曼滤波的电动汽车动力电池 SOC 估计 [D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [7] CARLO TABORELLI, SIMONA ONORI, SEBASTIEN MAES, et al. Advanced battery management system design for SOC/SOH estimation for e-bikes applications [J]. International Journal of Powertrains, 2016, 5 (4): 325-357.
- [8] YAN M A, BINGSI L I, GUANGYUAN L I, et al. A Non-linear Observer Approach of SOC Estimation Based on Hysteresis Model for Lithium-ion Battery [J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, 4 (2): 195-204.
- [9] 孙鹏宇, 李建良, 陶知非, 等. 动态工况电池在线参数辨识及 SOC 估计研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35 (1): 10-17.
- [10] 杨云龙, 徐自强, 吴孟强, 等. 基于免疫遗传算法的动力电池 SOC 估计研究 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (12): 220-224.
- [11] 徐万, 谢长君, 邓坚, 等. 基于自适应 CKF 的锂离子电池 SOC 估算 [J]. 电池, 2020, 50 (4): 333-337.
- [12] 王浩, 郑燕萍, 虞杨. 基于动态优选遗忘因子最小二乘在线辨识的磷酸铁锂电池 SOC 估算 [J]. 汽车技术, 2021 (10): 23-29.
- [13] 袁代林, 朱允民, 马洪. 推广的遗忘因子递推最小二乘算法在 GPS 中的应用 [J]. 四川大学学报 (自然科学版), 2002 (4): 595-601.
- 758-766.
- [26] 尹欢一. 基于皮尔森系数距离权重 KNN 算法的 P2P 流量分类方法研究 [D]. 株洲: 湖南工业大学, 2019.
- [27] 赵凯迪. 基于 SVM 的局部加权 KNN 分类算法的研究 [D]. 杭州: 浙江工商大学, 2018.
- [28] SHEIKHI S, KHEIRABADI M T, BAZZAZI A. A novel scheme for improving accuracy of KNN classification algorithm based on the new weighting technique and stepwise feature selection [J]. Journal of Information Technology Management, 2020, 12 (11): 90-104.
- [29] 王楠. 基于 KNN 的改进算法研究及其在图像去噪的应用 [D]. 桂林: 广西师范大学, 2016.
- [30] 程世雄. 基于 KNN 的非规则算法线程级推测调度方法 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2021.
- [31] 蔡瑞光. 伪近邻分类算法研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- [32] 孙聪慧. 非独立同分布下异构数据 KNN 算法研究 [D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2021.
- [33] 许佩迪. 基于聚类与区域划分的改进 KNN 算法 [D]. 四平: 吉林师范大学, 2020.
- [34] 杨勇, 戴清杰, 黎艳. Turbo 码编译码技术研究 [J]. 通信与信息技术, 2011 (6): 62-64.
- [35] 陶李. Turbo 编译码方案研究与实现 [D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [36] 牛晓明. 散射通信链路自适应传输技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [14] 刘熹, 李琳, 刘海龙. 动力型锂电池 SOC 与 SOH 协同估计 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020, 18 (4): 750-755.
- [15] WANG C X. SOC estimation algorithm for Li-ion battery in electric or hybrid vehicles [J]. International Journal of Electric and Hybrid Vehicles, 2016, 8 (1): 61-77.
- [16] 赵亚妮. 基于强跟踪卡尔曼滤波的电池 SOC 估计 [J]. 沈阳工业大学学报, 2018, 40 (2): 192-197.
- [17] PASCHERO, MAURIZIO, STORTI, GIAN LUC A, RIZZI, ANTONELLO, et al. A Novel Mechanical Analogy-Based Battery Model for SoC Estimation Using a Multi-cell EKF [J]. IEEE transactions on sustainable energy, 2016, 7 (4): 1695-1702.
- [18] 侍壮飞, 玄东吉, 李广诚, 等. 改进的 UKF 算法估算锂离子电池 SOC [J]. 电池, 2019, 49 (2): 105-108.
- [19] WANG C X. SOC estimation algorithm for Li-ion battery in electric or hybrid vehicles [J]. International Journal of Electric and Hybrid Vehicles, 2016, 8 (1): 61-77.
- [20] 胡晓松, 孙逢春, 邹渊. SOC distribute on-based modeling for lithium-ion battery for electric vehicles using numerical optimization [J]. 哈尔滨工业大学学报 (英文版), 2011, 18 (5): 49-54.
- [21] ZHOU J Z, ZHANG X W. Power battery SOC estimation with combination method based on UKF and open circuit voltage [J]. International Journal of Electric and Hybrid Vehicles, 2014, 6 (3): 215-226.