

OFDM中基于DFT的自适应信道估计算法

王晓雯, 任浩浩

(山西大学 物理工程学院, 山西 太原 030006)

摘要: 针对正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)系统中传统离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)信道估计算法因固定使用循环前缀(Cyclic Prefix, CP)长度、非整数倍时延信道下能量泄漏严重、噪声抑制不充分等问题, 提出一种基于联合时延与信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)估计的自适应阈值DFT改进算法。该算法以最小二乘(Least Square, LS)初始估计为基础, 引入多重信号分类(Multiple Signal Classification, MUSIC)超分辨率技术实现信道多径时延的精准估计, 根据实际最大时延动态确定最优时域降噪窗口, 摆脱对固定CP长度的依赖。基于动态窗口重新划分纯净信号区间与噪声区间, 精确完成信号功率与噪声功率计算, 实现可靠SNR估计, 并将该SNR估计值作为核心依据构造自适应降噪阈值, 通过两级时域滤波完成噪声抑制与信号保护。最后经频域变换与窗函数补偿得到最终信道响应。仿真结果表明, 在瑞利多径衰落信道下, 与传统DFT算法、固定阈值算法相比, 本文算法的误码率(Bit Error Rate, BER)与均方误差(Mean Square Error, MSE)显著降低, 在中高信噪比及非整数倍时延场景下性能提升尤为明显。该算法实现了时延估计、窗口长度与降噪阈值的联合自适应优化, 有效提升了信道估计性能。但受MUSIC算法特性影响, 整体计算复杂度高于传统方法, 在时延敏感场景下存在一定限制, 后续将围绕复杂度优化开展进一步研究。

关键词: 正交频分复用; 信道估计; 信噪比估计; 自适应阈值; MUSIC算法

中图分类号: TN919.72

文献标识码: A

doi: 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2026.01.0012

引用格式: 王晓雯, 任浩浩. OFDM中基于DFT的自适应信道估计算法[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2026, 47(4): 569-576.

Wang Xiaowen, Ren Haohao. Adaptive DFT channel estimation algorithm based on joint delay and SNR estimation in OFDM system[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2026, 47(4): 569-576.

Adaptive DFT Channel Estimation Algorithm Based on Joint Delay and SNR Estimation in OFDM System

Wang Xiaowen, Ren Haohao

(School of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Aiming at the problems of traditional Discrete Fourier Transform channel estimation algorithms in orthogonal frequency division multiplexing systems, such as fixed use of cyclic prefix length, severe energy leakage under non-integer delay channels, and insufficient noise suppression, an improved adaptive threshold DFT algorithm based on joint delay and signal-to-noise ratio estimation was proposed. Based on the initial least square estimation, the algorithm introduced the multiple signal classification super-resolution technology to achieve accurate estimation of channel multipath delays, and dynamically determined the optimal time-domain denoising window according to the actual maximum delay, thus getting rid

收稿日期: 2026-01-16

基金项目: 山西省基础研究计划资助项目(202403021221010)

作者简介: 王晓雯(1979—), 女, 副教授, 硕士, 主要从事网络通信方面的研究。E-mail: 381984245@qq.com.

of the dependence on fixed CP length. Based on the dynamic window, the pure signal interval and noise interval were re-divided, the signal power and noise power were accurately calculated to realize reliable SNR estimation, and the estimated SNR value was used as the core basis to construct an adaptive denoising threshold, and noise suppression and signal protection were completed through two-stage time-domain filtering. Finally, the final channel response was obtained through frequency-domain transformation and window function compensation. Simulation results show that under Rayleigh multipath fading channels, compared with the traditional DFT algorithm and fixed threshold algorithm, the mean square error and bit error rate are significantly reduced, and the performance improvement is particularly obvious in medium and high SNR and non-integer delay scenarios. The algorithm realizes the joint adaptive optimization of delay estimation, window length and denoising threshold, which effectively improves the channel estimation performance. However, affected by the characteristics of the MUSIC algorithm, the overall computational complexity is higher than that of traditional methods, which has certain limitations in delay-sensitive scenarios, and further research will focus on complexity optimization in the future.

Key words: orthogonal frequency division multiplexing; channel estimation; signal-to-noise ratio estimation; adaptive threshold; multiple signal classification algorithm

0 引 言

在无线通信领域,正交频分复用技术凭借其出色的抗多径干扰能力与高频谱利用率,已成为4G、5G乃至未来6G通信系统的核心技术支撑^[1-2]。然而,无线信道的时变性与随机性会导致信号在传输过程中产生幅度衰减、相位偏移与多径时延扩展,严重影响接收端信号解调质量。因此,精准的信道估计技术成为保障OFDM系统传输性能的关键环节^[3-4]。

目前,OFDM系统中主流的信道估计算法可分为三类:基于最小二乘的算法、基于线性最小均方误差(Linear Minimum Mean Squared Error, LMMSE)的算法,以及基于离散傅里叶变换的算法。其中,LS算法因结构简单、无需信道先验信息而被广泛应用于工程实践,但其未考虑噪声干扰,在低信噪比场景下均方误差较大,估计精度受限^[5];LMMSE算法虽能有效抑制噪声,理论性能最优,却需已知信道统计特性(如自相关矩阵),且涉及复杂矩阵求逆运算,硬件实现难度高,难以适配突发通信场景^[6-7];基于DFT的信道估计算法则在性能与复杂度之间取得平衡,通过“频域-时域-频域”的转换流程实现噪声滤除,但其传统方案存在两大核心缺陷:一是仅对CP外的噪声进行置零处理,未考虑CP内噪声对估计结果的干扰;二是在非整数倍时延信道下,信号能量易泄漏至噪声区间,导致噪声估计偏差^[8]。

为了解决上述问题,一些学者提出了改进方案,郑兆飞等^[9]提出的门限算法弥补了传统DFT

方法无法抑制CP内噪声的不足,通过阈值判决实现了更优的降噪效果。但该算法采用固定加权阈值,阈值取值偏大,在多径信道中易将低能量有效多径分量一并滤除,导致有用信道信息损失。陈艳杰等^[10]提出的改进DFT阈值滤噪算法,将CP内的平均样点值与CP外的最大样点值取平均作为阈值,以在保留有用信道冲激响应的同时最大限度地滤除噪声。然而,该阈值构造方式对CP外最大样点的依赖较强,在噪声波动较大时易导致阈值不稳定,且固定平均的加权方式缺乏对信道条件的自适应能力,限制了其在复杂衰落环境下的泛化性能。周维海等^[11]提出的设定门限算法,通过估计信噪比自适应构造降噪阈值,并引入汉明窗抑制非整数倍时延下的能量泄漏,有效提升了信道估计精度。然而,该算法对CP外噪声窗口的选取较为敏感,窗口设置不当会影响信噪比估计的准确性,并且低信噪比下阈值稳定性仍有不足。针对上述问题,本文在现有DFT阈值降噪框架的基础上,提出一种改进的自适应阈值算法。该算法先利用多重信号分类算法估计多径信道的实际时延分布,精准捕获最大时延,以最大时延动态设定降噪窗口长度,替代传统算法中的固定CP长度,最后结合动态窗口内的信号样本完成SNR估计,并生成适配当前信道时延场景的自适应阈值,进行联动优化,仿真验证可知,本算法可以有效抑制样本内噪声,具有较低的BER和MSE。

1 OFDM 系统模型

本文的研究对象为基于导频的OFDM基带系

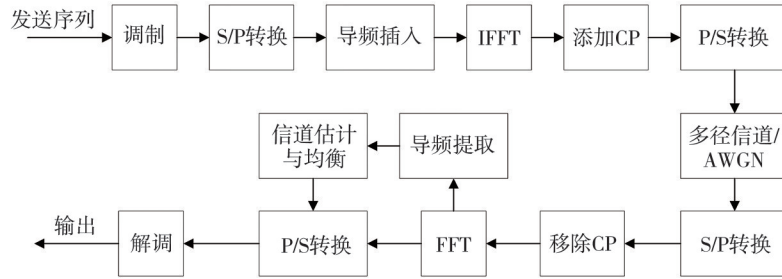


图1 OFDM系统原理图

Fig. 1 OFDM system diagram

先产生需要发送的二进制比特流,经调制后通过串并转换将高速的串行数据流转换为 N 路低速并行数据流,然后插入导频,经IFFT变为时域信号

$$x(n) = \text{IFFT}[X(K)] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi \frac{nk}{N}}, \quad 0 \leq n \leq N-1. \quad (1)$$

信号经并串转换后进入信道传输,信道的冲激响应可以表示为

$$h(n) = \sum_{i=0}^{l-1} a_i \delta(n - \tau_i), \quad (2)$$

式中: l 为信道的径数; a_i 为第 i 径的振幅; τ_i 为 i 径的路径延迟。信号经过多径衰落信道后,与信道响应进行卷积,得到的时域信号表示为

$$y(n) = x(n) \otimes h(n) + w(n), \quad (3)$$

式中: $w(n)$ 为加性高斯白噪声。式(3)经离散傅里叶变换可得

$$Y(k) = X(k)H(k) + W(k), \quad 0 \leq k \leq N-1, \quad (4)$$

式中: $X(k)$ 为发送端发射的信号; $Y(k)$ 为收发端收到的信号; $H(k)$ 为信道频域响应; $W(k)$ 为噪声的频域响应。

2 信道估计算法

2.1 LS信道估计算法

最小二乘算法因其计算简单、无需知道信道

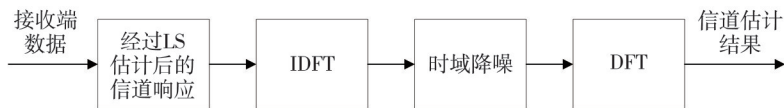


图2 传统DFT算法流程图

Fig. 2 Flow chart of traditional DFT algorithm

其时域模型可表示为

$$\hat{h}_{LS}(n) = h(n) + w(n), \quad (9)$$

统^[12],使用的模型为瑞利多径衰落信道,系统模型如图1所示(参考文献[12]绘制)。

先验信息,被广泛应用于初始信道估计^[13]。在OFDM系统中,假设 $X(k)$ 为发送信号, $Y(k)$ 为接收信号,频域接收模型可以表示为

$$Y(k) = X(k)H(k) + W(k), \quad (5)$$

式中: $H(k)$ 为信道频域响应; $W(k)$ 为AWGN的频域形式。LS估计的目的是将下面的代价函数最小化。

$$\hat{H}_{LS}(k) = \arg \min_{H(k)} |Y(k) - X(k)H(k)|^2, \quad (6)$$

其解为

$$\hat{H}_{LS}(k) = \frac{Y(k)}{X(k)} = H(k) + \frac{W(k)}{X(k)}. \quad (7)$$

此算法一般作为铺垫来进行更为准确的估计。

2.2 传统DFT信道估计算法

传统DFT信道估计算法首先利用LS准则获得频域初始信道估计,经IDFT变换至时域后,利用信道冲激响应集中在CP窗口内的特性,将CP长度以外的时域样点置零以滤除带外噪声,最后通过DFT变换回频域,得到降噪后的信道频率响应估计^[14-15]。算法流程如图2所示(参考文献[14]绘制)。

首先对LS频域估计结果进行 N 点逆离散傅里叶变换(IDFT),得到含噪的时域CIR估计

$$\hat{h}_{LS}(n) = \text{IDFT}[\hat{H}_{LS}(k)] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \hat{H}_{LS}(k) e^{j2\pi \frac{nk}{N}}, \quad 0 \leq n \leq N-1. \quad (8)$$

式中: $h(n)$ 为真实的信道冲激响应; $w(n)$ 为时域噪声。根据信道能量集中于CP内的特点,直接将

CP 长度以外的点置零, 完成时域降噪

$$\hat{h}_{\text{DFT}}(n) = \begin{cases} \hat{h}_{\text{LS}}(n), & 0 \leq n \leq N_{\text{CP}} - 1, \\ 0, & N_{\text{CP}} \leq n \leq N - 1. \end{cases} \quad (10)$$

再经 DFT 变换回频域, 得到最终信道频率响应估计

$$\hat{H}_{\text{DFT}}(k) = \text{DFT}[\hat{h}_{\text{DFT}}(n)] = \sum_{n=0}^{N-1} \hat{h}_{\text{DFT}}(n) e^{-j \frac{2\pi nk}{N}}, \quad 0 \leq k \leq N - 1. \quad (11)$$

这一估计值将会用于后续的数据子载波均衡。

2.3 基于阈值降噪的信道估计算法

传统 DFT 算法隐含假设信道能量完全集中在 CP 长度内, 但实际多径时延扩展通常小于 CP 长度, 导致 CP 后半段以噪声为主。传统算法保留这些噪声, 制约了性能提升。阈值降噪算法对此改进: 在 CP 范围内, 仅保留能量超过门限的样点, 其余置零^[16]。文献[11]进一步通过频域加窗抑制能量泄漏, 结合 SNR 估计实现动态阈值降噪。

第一次阈值降噪

$$h_{\text{DFT}-w1}(n) = \begin{cases} h_w(n), & |h_w(n)|^2 \geq E_{S-cp-w}, \quad 0 \leq n \leq N_{\text{CP}} - 1, \\ 0, & \text{其它。} \end{cases}$$

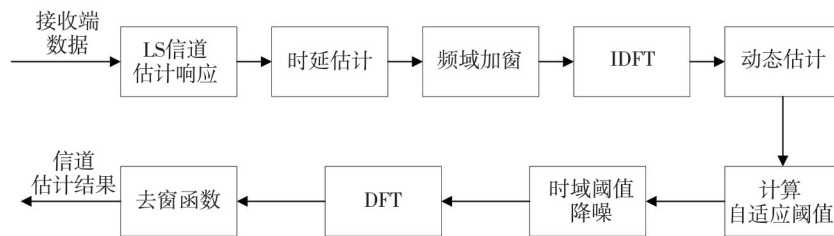


图 3 本文改进算法整体流程图

Fig. 3 The overall flow chart of the improved algorithm in this paper

3.1 基于 MUSIC 算法的信道时延估计

为了精确估计信道的多径时延, 确定其有效长度, 本文采用了 MUSIC 算法, 该算法基于子空间分解原理, 具有超分辨率特性, 其时延估计精度远高于传统 IDFT 方法。对 LS 估计并经过 IDFT 得到的初始时域 CIR 估计 $h_{\text{LS}} = [h_{\text{LS}}(0), h_{\text{LS}}(1), \dots, h_{\text{LS}}(N-1)]^T$, 取其前 N_{CP} 个点来构造自相关矩阵

$$R_{hh} = E[h_{\text{LS}} h_{\text{LS}}^H]. \quad (14)$$

然后对 R_{hh} 进行特征值分解

$$R_{hh} = U \Lambda U^H. \quad (15)$$

将特征值按降序排列为 $\lambda_0 \geq \lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_{N_{\text{CP}}-1}$,

(12)

第二次阈值降噪: 防止脉冲噪声残留, 对局部信噪比过低的点进行强制置零, 可得

$$h_{\text{DFT}-w2}(n) = \begin{cases} h_{\text{DFT}-w1}(n), & \hat{\rho} \geq 1, \quad 0 \leq n \leq N_{\text{CP}} - 1, \\ 0, & \hat{\rho} \leq 1. \end{cases} \quad (13)$$

该算法有效抑制了能量泄漏, 实现了动态阈值降噪, 性能优于传统方法。然而, 其噪声与信号功率的估计仍依赖于固定的 CP 长度 N_{CP} , 未能自适应于信道的真实时延扩展。

3 本文提出的信道估计算法

针对以上算法的不足, 本文提出了改进算法。引入高分辨率时延估计技术来实时获取信道的精确时延扩展以替代固定的 CP 长度, 在此基础上, 动态设定最优的噪声估计窗口与信号处理范围, 从而实现对噪声功率、信号功率及 SNR 的精确估计, 并最终计算出与当前信道状态相匹配的最优自适应阈值, 具体步骤流程如图 3 所示。

对应的特征向量分别为 $u_0, u_1, \dots, u_{p-1}$, 假设多径数为 p , 则前 p 个特征值对应的特征向量张成信号子空间 $U_S = [u_0, u_1, \dots, u_{p-1}]$, 剩下的 $N_{\text{CP}} - p$ 个特征向量张成噪声子空间 $U_N = [u_p, u_{p+1}, \dots, u_{N_{\text{CP}}-1}]$ 。多径数可通过赤池信息准则(AIC)/最小描述长度准则(MDL)等信息论准则^[17]确定。定义 MUSIC 空间谱为

$$P_{\text{MUSIC}}(\tau) = \frac{1}{\alpha^H(\tau) U_N U_N^H \alpha(\tau)}, \quad (16)$$

其中, $\alpha(\tau) = [1, e^{-j2\pi\tau/N}, e^{-j2\pi2\tau/N}, \dots, e^{-j2\pi(N_{\text{CP}}-1)\tau/N}]^T$ 是对应时延 τ 的导向矢量, 通过搜索 $P_{\text{MUSIC}}(\tau)$ 的 p 波峰位置, 便可得到各多径分量的时延估计值 $\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_{p-1}$ 。取最大的时延估计值 $\tau_{\max} = \max(\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_{p-1})$, 可以确定信道的有效长度为

$$L_e = \left\lceil \frac{\tau_{\max}}{T_s} \right\rceil + \Delta, \quad (17)$$

式中: T_s 为系统采样间隔; Δ 为容纳估计误差和信道时变特性所设置的少量保护样本; $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整符号。MUSIC算法通过子空间分解实现超分辨率时延估计, 能够有效区分间隔小于采样间隔的多径分量, 解决了传统IDFT方法无法精确估计非整数倍时延的问题, 为动态降噪窗口提供了可靠依据, 从根源上避免了固定CP长度带来的能量泄漏。

3.2 噪声与信噪比估计

接下来使用估计出的 L_e 动态设定处理窗口, 提高估计精度, 先对 $H_{LS}(k)$ 加汉明窗 $D(k)$ 抑制泄漏, 可以得到 $H_w(k) = H_{LS}(k) \cdot D(k)$, 再进行IDFT得到 $h_w(n)$ 。通过SNR估计算法得到的信噪比可以作为信道估计的先验信息, 由此可以计算所接收的导频能量, 使用 L_e 动态定义的纯净噪声估计窗口 $[L_e, N - L_e - 1]$ 对噪声功率精确估计

$$\sigma_n^2 = \frac{1}{N - 2L_e} \sum_{n=L_e}^{N-L_e-1} |h_w(n)|^2. \quad (18)$$

在真实的信号区域 $[0, L_e - 1]$ 内计算接收功率

$$\hat{P}_{\text{total}} = \frac{1}{L_e} \sum_{n=0}^{L_e-1} |h_w(n)|^2. \quad (19)$$

该接收功率包含信号分量与残留噪声分量。从中减去式(18)估计出的噪声功率, 即可得到信号功率的估计值

$$\sigma_s^2 = \hat{P}_{\text{total}} - \sigma_n^2. \quad (20)$$

在获得噪声功率与信号功率的估计值后, 计算信噪比

$$\hat{\rho} = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_n^2}. \quad (21)$$

该结果由有效信号区间与纯净噪声区间精确计算得到, 是后续自适应阈值计算的核心依据, 可保证阈值大小与当前信道噪声水平、时延特性严格匹配。采用动态时延窗口替代固定CP长度后, 信号区间与噪声区间划分更纯净, 显著提升了噪声功率与信号功率的估计准确度, 使后续阈值能够自适应匹配信道实时状态, 避免因噪声估计偏差导致的过降噪或欠降噪。

3.3 阈值计算与时域降噪

随后基于能量比例进行自适应阈值计算, 首先计算有效窗口内的总接收能量

$$E_{R-\text{cp}} = \sum_{n=0}^{L_e-1} |h_w(n)|^2. \quad (22)$$

计算该总能量中信号能量所占的比例并估计信号能量

$$E_{S-\text{cp}} = E_{R-\text{cp}} \cdot \frac{\hat{\rho}}{1 + \hat{\rho}}. \quad (23)$$

计算自适应阈值, 即信号的平均能量

$$T_{\text{adaptive}} = \frac{E_{S-\text{cp}}}{L_e} = \frac{E_{R-\text{cp}} \cdot \frac{\hat{\rho}}{1 + \hat{\rho}}}{L_e}. \quad (24)$$

最后利用自适应阈值对时域响应进行滤波, 此为第一次降噪

$$h_{\text{final}-1}(n) = \begin{cases} h_w(n), & |h_w(n)|^2 \geq T_{\text{adaptive}}, 0 \leq n \leq L_e - 1, \\ 0, & \text{其它}. \end{cases} \quad (25)$$

针对第一次降噪后残留的、能量较高但可能是突发脉冲噪声样本点的信号, 进行第二次降噪, 对于每一个样本 n , 本文将该点的功率与估计的噪声功率的比值定义为局部信噪比, 设定一个严格的局部信噪比门限, 如果某点的功率甚至低于或等于噪声功率(即局部信噪比 ≤ 1), 则认为该点为噪声, 第二次降噪为

$$h_{\text{final}-2}(n) = \begin{cases} h_{\text{final}-1}(n), & \frac{|h_{\text{final}-1}(n)|^2}{\sigma_n^2} > \gamma, 0 \leq n \leq L_e - 1, \\ 0, & \frac{|h_{\text{final}-1}(n)|^2}{\sigma_n^2} \leq \gamma, \end{cases} \quad (26)$$

第二次降噪采用局部信噪比判决, 设定门限 $\gamma=1$ 。该值的依据是: 若某一样本点的功率不大于估计的噪声平均功率(即局部信噪比 ≤ 1), 则判定该点源于噪声的概率极大, 故应置零。此判决准则在虚警与漏检概率间取得了良好平衡, 判决为

$$h_{\text{final}-2}(n) = \begin{cases} h_{\text{final}-1}(n), & |h_{\text{final}-1}(n)|^2 > \sigma_n^2, 0 \leq n \leq L_e - 1, \\ 0, & |h_{\text{final}-1}(n)|^2 \leq \sigma_n^2. \end{cases} \quad (27)$$

最终把经过两次降噪后的最终时域响应 $h_{\text{final}-2}(n)$ 通过DFT变换回频域, 并除以窗函数进行补偿, 就可以得到完整的信道估计值

$$\hat{H}(k) = \frac{DFT[h_{\text{final}-2}(n)]}{D(k)}. \quad (28)$$

尽管MUSIC算法具有较高的时延分辨率,但其计算复杂度也随之提升,主要来源于自相关矩阵构建、特征值分解以及谱峰搜索,在实时性要求高的系统中可能成为性能瓶颈。为平衡估计精度与计算效率,本文在实际实现中可采用以下优化策略:

1) 降维处理: 由于信道多径数 p 远小于CP长度 N_{CP} , 可仅对自相关矩阵的前若干个大特征值对应的信号子空间进行处理, 减少特征分解的计算量。

2) 快速子空间分解: 可采用迭代方法(如幂迭代法)或利用Toeplitz结构特性加速特征值求解, 避免完整的特征分解。

3) 谱峰搜索优化: 时延估计范围通常限于 $[0, N_{\text{CP}}]$ 内, 且多径数量有限, 可采用梯度下降或插值法等快速峰值检测方法替代全局精细搜索。

4) 滑动窗与更新策略: 在连续OFDM符号中, 信道时延扩展变化较慢, 可每若干符号更新一次时延估计, 避免每符号重复计算, 显著降低平均复杂度。

通过上述措施, 可在保持高精度时延估计的同时, 有效控制算法复杂度, 使其适用于对实时性要求较高的OFDM系统。

4 仿真结果分析

为评估本文所提算法的性能, 在MATLAB平台搭建了基于导频的OFDM系统仿真链路。系统与信道关键参数设置如表1所示, 多径信道采用瑞利衰落模型, 每条径的衰落系数相互独立, 其幅度服从瑞利分布, 相位服从 $0 \sim 2\pi$ 的均匀分布, 各径平均功率按指数衰减模型设置(衰减因子取0.5)。通过与传统算法对比, 从BER和MSE两个核心指标展开分析。为充分验证算法对能量泄漏的抑制能力, 设置了整数倍时延和非整数倍时延两种典型的多径信道场景进行对比。

在整数倍时延信道场景中, 设置的整数倍多径时延为 $[0, 2, 4, 8, 12] \mu\text{s}$, 图4和图5分别给出了在整数倍时延信道下, 各对比算法的BER与MSE性能曲线。在低信噪比($\text{SNR} < 10 \text{ dB}$)区域, 信道噪声占主导, 各算法性能差异不显著。随着SNR的提升, LS算法因无噪声抑制机制, BER进入平台期。传统

表1 系统仿真参数

Tab. 1 System simulation parameters

信道估计参数	设置
调制方式	16-QAM
子载波数	256
OFDM符号数	50
循环前缀长度	64
导频间隔	5
多径数量	5
导频类型	DMRS
噪声类型	AWGN
仿真次数	1 000

DFT算法通过剔除CP外的噪声, 性能获得初步改善。文献[11]的算法进一步引入了阈值机制以抑制CP内的噪声, 性能更优。本文所提算法在此基础上, 通过MUSIC算法精确估计信道有效时延窗口 L_e , 并构建与之匹配的自适应阈值, 实现了更精细的噪声分离。仿真结果显示, 在 $\text{SNR} > 15 \text{ dB}$ 的中高信噪比区域, 本文算法的BER明显低于其他对比算法。各算法的MSE均随信噪比的提升而单调递减, 且变化趋势与BER一致, 即LS算法MSE最大, 传统DFT算法次之, 文献[11]算法有所优化, 本文算法MSE最小。

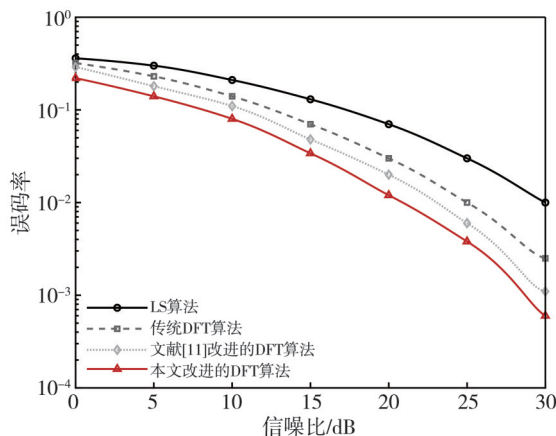


图4 整数倍时延信道下各种算法的误码率比较

Fig. 4 Comparison of bit error rate of various algorithms under integer multiple delay channel

在非整数倍时延信道场景中, 设置的非整数倍多径时延为 $[0, 1.4, 2.2, 4.1, 7.4] \mu\text{s}$, 图6和图7分别给出了在非整数倍时延信道下, 各对比算法的BER与MSE性能曲线。本文算法的优势在此场景下得到决定性体现: 通过MUSIC算法高精度估计实际最大时延 τ_{max} , 动态确定信号处理窗口, 从而将因非整数时延而泄漏的能量重新纳入“信号区域”进行保护与有效利用, 避免了误删。因此, 其BER和MSE性能显著且稳定地优于所有对比算法。

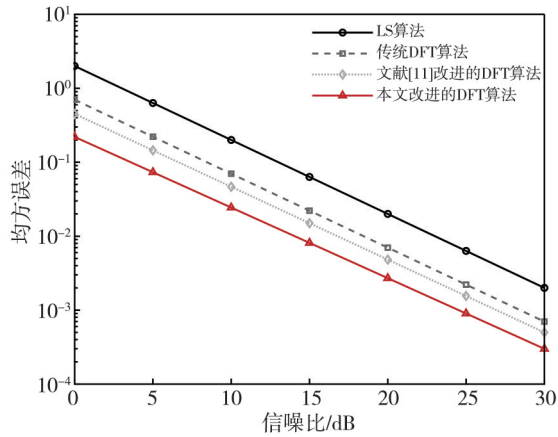


图 5 整数倍时延信道下各种算法的均方误差比较

Fig. 5 Comparison of mean square error of various algorithms under integer multiple delay channel

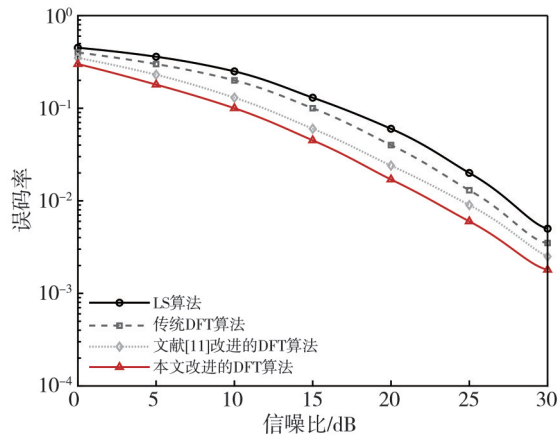


图 6 非整数倍时延信道下各种算法的误码率比较

Fig. 6 Comparison of bit error rate of various algorithms under non-integer delay channel

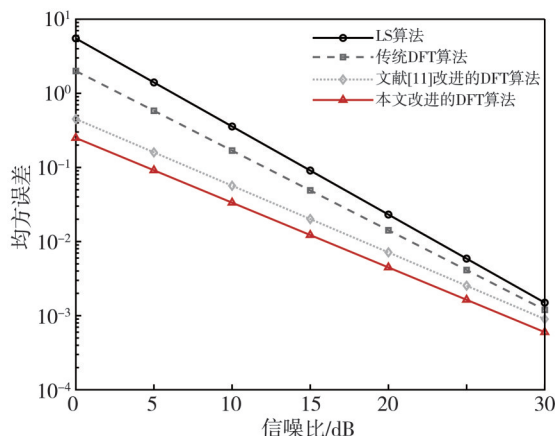


图 7 非整数倍时延信道下各种算法的均方误差比较

Fig. 7 Comparison of mean square error of various algorithms under non-integer delay channel

5 结 论

本文针对传统DFT信道估计算法性能较差的问题,提出了一种联合时延与SNR估计的自适应

阈值DFT算法。本文的创新在于通过引入MUSIC高分辨率时延估计,动态获取信道真实时延扩展,以替代固定的CP长度。这一改进使得后续的噪声功率估计、信号功率估计及SNR计算更为精确,从而能够设定更优的自适应降噪阈值。本文对几种算法在整数倍时延和非整数倍时延情况下分别进行了仿真,仿真结果表明本文所提算法相较于其它算法有明显提升。但需要指出的是,本文算法虽在精度上优势明显,但MUSIC算法的计算复杂度高于传统方法,在移动通信或对时延高度敏感的场景(如车联网、高速铁路通信)下,其计算负担可能成为制约因素。如何在保持高精度估计的同时进一步降低复杂度,是后续研究需要重点解决的问题。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献:

- [1] 许向阳, 李恩, 王晓君, 等. 基于循环前缀与DFT的信道估计改进算法[J]. 信息化研究, 2025, 51(1): 12-17.
Xu Xiangyang, Li En, Wang Xiaojun, et al. Improved algorithm for channel estimation based on cyclic prefix and DFT [J]. Informatization Research, 2025, 51 (1): 12-17. (in Chinese)
- [2] 胡皓. 基于压缩感知的OFDM通信系统信道估计算法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2024.
- [3] 纪金伟, 高雷涛, 周云, 等. 一种适用于低空多径环境的MIMO-OFDM信道估计新方法[J]. 西安邮电大学学报, 2025, 30(3): 11-19.
Ji Jinwei, Gao Leitao, Zhou Yun, et al. A new channel estimation method for MIMO-OFDM in low-altitude economic communications [J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2025, 30(3): 11-19. (in Chinese)
- [4] 谭钢, 鄢社锋, 叶子豪, 等. OFDM系统迭代脉冲噪声抑制与信道估计方法[J]. 系统工程与电子技术, 2024, 46(8): 2841-2849.
Tan Gang, Yan Shefeng, Ye Zihao, et al. Iterative impulsive noise mitigation and channel estimation method for OFDM system [J]. Systems Engineering and Electronics, 2024, 46 (8) : 2841-2849. (in Chinese)
- [5] 刘阳, 杨蕾, 吴志强. 面向海上OFDM通信系统的

- LS信道估计算法优化[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2024, 49(5): 68-76.
- Liu Yang, Yang Lei, Wu Zhiqiang. Optimization of LS channel estimation algorithm for maritime OFDM communication systems[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 49(5): 68-76. (in Chinese)
- [6] 蔡云浩, 刘祖深, 许虎. 基于IPSO-LMMSE算法的信道估计仿真与实现[J]. 现代电子技术, 2023, 46(23): 23-27.
- Cai Yunhao, Liu Zushen, Xu Hu. Simulation and implementation of channel estimation based on IPSO-LMMSE algorithm [J]. Modern Electronics Technique, 2023, 46(23): 23-27. (in Chinese)
- [7] 朱鹏博, 朱勇刚, 安康, 等. 一种面向多RIS的LMMSE信道估计方法[J]. 无线电工程, 2024, 54(11): 2657-2663.
- Zhu Pengbo, Zhu Yonggang, An Kang, et al. A channel estimation method based on LMMSE for multi-RIS [J]. Radio Engineering, 2024, 54(11): 2657-2663. (in Chinese)
- [8] Cho Y H, Son H. Enhanced DFT-based channel estimator for leakage effect mitigation in OFDM systems [J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(5): 875-879.
- [9] 郑兆飞, 谢跃雷, 万杰. 混合载波调制系统中的阈值DFT信道估计算法[J]. 无线电工程, 2017, 47(7): 30-33, 98.
- Zheng Zhaofei, Xie Yuelei, Wan Jie. A threshold channel estimation algorithm based on hybrid carrier modulation[J]. Radio Engineering, 2017, 47(7): 30-33, 98. (in Chinese)
- [10] 陈艳杰, 王丹. 协作通信系统信道估计算法研究[J]. 计算机仿真, 2015, 32(8): 217-220, 270.
- Chen Yanjie, Wang Dan. Research on channel estimation for cooperative communication system [J]. Computer Simulation, 2015, 32(8): 217-220, 270. (in Chinese)
- [11] 周维海, 程方, 邓炳光, 等. OFDM系统中基于SNR估计的改进DFT信道估计算法[J]. 电讯技术, 2022, 62(4): 489-494.
- Zhou Weihai, Cheng Fang, Deng Bingguang, et al. An improved DFT channel estimation algorithm based on SNR estimation in OFDM system [J]. Telecommunication Engineering, 2022, 62(4): 489-494. (in Chinese)
- [12] Kumar A, Bharti S. Design and performance analysis of OFDM and FBMC modulation techniques [J]. The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty, 2017, 37(2): 30-34.
- [13] 杨建, 钱博, 邓特达. 一种基于时频联合降噪的LS信道估计算法[J]. 网络安全技术与应用, 2024(7): 32-33.
- [14] 乔厚财, 刘光祖, 邹骏, 等. 基于DFT的OFDM无线通信系统信道估计算法研究[J]. 电子设计工程, 2023, 31(1): 152-156, 162.
- Qiao Houcai, Liu Guangzu, Zou Jun, et al. Research on channel estimation algorithm of OFDM wireless communication system based on DFT [J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(1): 152-156, 162. (in Chinese)
- [15] Gu F L, Fan Y X, Wang L, et al. A universal channel estimation algorithm based on DFT smoothing filtering [J]. IEEE Access, 2019, 7: 129883-129891.
- [16] Mansour N A A, Kadhim A A. Improved DFT-based channel estimation techniques for OFDM signal [J]. International Journal of Engineering Research, 2016, 5(12): 922-926.
- [17] 黄泽钦, 潘晴, 田妮莉. 基于DMR-WF与信息论准则的信源数估计[J]. 计算机仿真, 2023, 40(6): 202-206.
- Huang Zeqin, Pan Qing, Tian Nili. Source number estimation based on DMR-WF and information theory criteria [J]. Computer Simulation, 2023, 40(6): 202-206. (in Chinese)