

基于频域窄带莱斯噪声消除机制的 OFDM 网络信号发射精度增强算法^①

李俊霞, 袁社锋

河南农业职业学院 信息工程学院, 郑州 451450

摘要:为改善当前 OFDM 网络信号精度增强算法中难以高效消除频域窄带莱斯噪声,且系统误码率较高的不足,提出了一种基于频域窄带莱斯噪声消除机制的 OFDM 网络信号精度增强算法.首先,基于 128 频相移键控调制方法,在获取信号时域特征的基础上,引入快速傅里叶变换,对信号进行离散化,并基于信号投影机制,构建正交星座图,实现信号投影矢量在预发射状态下的正交分层排序,消除了信源状态下频域窄带莱斯噪声对系统的干扰;随后,引入快速傅里叶逆变换,对预发射信号进行加密处理,且通过量化评估模型对信号精度进行优化提升,有效节约了传输带宽,提高了信号发射性能,改善了信道抗衰落效果.仿真实验表明,与当前常见的时间窗消除机制(time window elimination mechanism, TWE)、频率拓扑映射机制(frequency topology mapping, FT)相比,本文算法的误码率更低,且具有更高的信号增益效果.

关键词: OFDM 网络信号;快速傅里叶变换;正交星座图;信号增益;频域窄带莱斯噪声;量化评估模型

中图分类号: TP393.04

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2019)03-0076-07

OFDM 信号调制及解调技术由于具有频谱正交成本低、抗多径衰落能力强及信号发射强度较低等特性,成为 LTE 技术中物理层信号调制与解调的主流技术之一^[1-3].为解决当前研究过程中存在的瓶颈,进一步提高当前 LTE 系统的物理层传输与解调的性能,研究者提出了若干具有前瞻性的 OFDM 网络信号发射精度增强算法,具有一定的工程领域实用价值.文献[4]等提出了一种基于时间窗消除机制的 OFDM 网络信号发射精度增强算法,然而该算法需要通过线性方式进行窗口函数频谱抽取,由于采用线性方式会导致频率扩展现象的发生,带来额外的杂波干扰,因此该算法的实际使用价值不高;文献[5]提出了一种基于空间拓扑距离一体化映射结构的 OFDM 网络信号发射精度增强算法,然而该方式仅能够适用于节点稀疏情况时的状态,当节点密集时,由于平面矢量不再处于正交状态,导致各子信号间存在严重的混频现象,降低了算法的适用性;文献[6]提出了基于信号兴衰追踪机制的 OFDM 网络信号精度增强算法,但是,该算法并未考虑各个子信号在信道中的频率碰撞现象,一旦由于节点信号发射密集而导致频率干涉,该算法的定位精度将会受到极大影响.

基于频域窄带莱斯噪声消除机制的 OFDM 网络信号发射精度增强算法:首先采取信号矢量投影的方式构建正交星座图,实现对信号预发射过程中各路子信号的分层发射序列排布,且通过 128 频相移键控调制方式及 FFT 方式,有效提高频域窄带莱斯噪声的消除效果;随后基于预加密方式,引入量化评估模型,进一步提高算法的抗噪及抗衰落性能.仿真实验证明了本文算法的有效性.

1 基于频域窄带莱斯噪声消除机制的 OFDM 网络信号发射精度增强算法

基于频域窄带莱斯噪声消除机制的 OFDM 网络信号发射精度增强算法见图 1.从图 1 可知,信号发射

① 收稿日期:2017-01-13

基金项目:河南省科技厅研究计划项目(132400410687).

作者简介:李俊霞(1973-),女,硕士,副教授,主要从事网络通信,计算机信息报技术研究.

精度增强由 2 个步骤组成:

1) 频域窄带莱斯噪声消除机制. 该机制首先通过 128 频相移键控调制方式进行时域信号预调制, 获取信号的时域特征, 并采取 FFT 变换方式进行信号离散化后, 通过构建正交星座图的方式进行信号投影矢量-发射矢量的正交化分层发射排列, 然后采用带通滤波方式进行一次性发射成型, 实现了对 OFDM 信号预发射状态的信号增益优化, 消除了信源中窄带莱斯噪声对信号发射过程的影响.

2) 投影矢量加密精度增强过程. 该过程将预发射的信号进行加密, 然后将各路子信号送入对应的子信道中进行加密传输, 提高信道发射效率, 节约传输带宽, 优化信道传输结构, 防止传输过程中出现信号衰落现象.

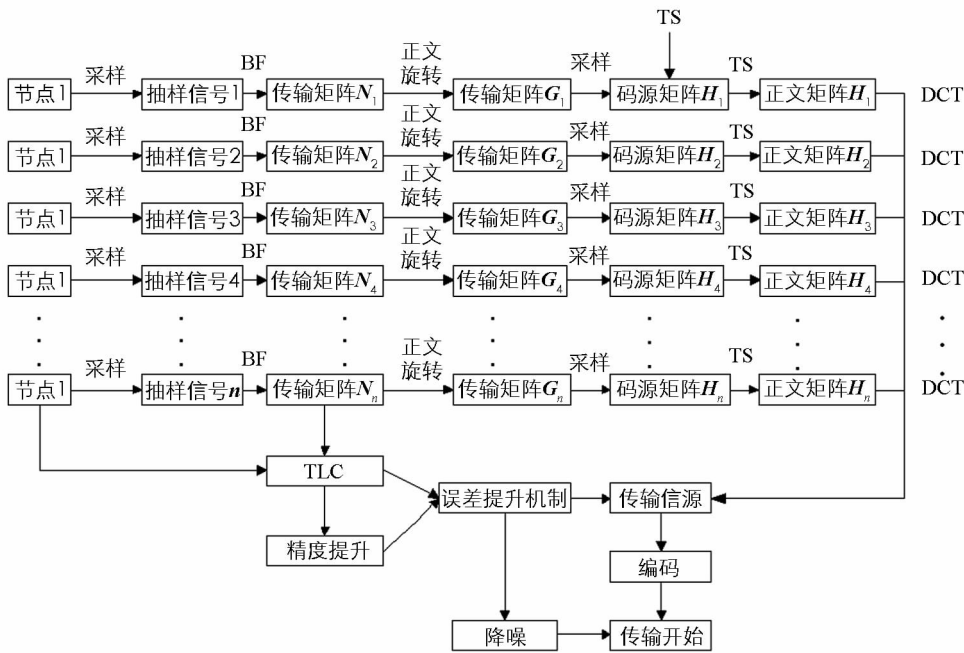


图 1 本文 OFDM 网络信号发射精度增强算法流程图

1.1 频域窄带莱斯噪声消除机制

典型的 OFDM 网络信号均通过无线节点内部的天线进行数据收发^[5-6], 为进一步提高本文算法接收过程中的码元间最小欧氏几何距离, 采用 128 进制星座进行 128 频相移键控调制(128PSK 调制), OFDM 网络信号在调制后分为 k 个抑制子信号(图 2), 则其任意一路抑制子信号的频域特征相应 $H^{(k)}(\omega)$ 为:

$$H^{(k)}(\varphi) = \beta_l^{(k)} \sum_{l=1}^k \varepsilon(\varphi - \varphi_k) \quad (1)$$

其中: $\varepsilon(\varphi)$ 为标准相应函数, $\beta_l^{(k)}$ 为第 k 路抑制子信号在第 l 个信道噪声干扰下的频域信号衰落, φ_k 表示该路抑制子信号因莱斯噪声干扰而导致的相位投影.

依据模型(1), OFDM 信号调制的第 k 路抑制子信号为:

$$Y^{(k)}(\varphi) = F^{(k)}(\varphi) + T(\varphi)H^{(k)}(\varphi) \quad (2)$$

其中: $Y^{(M)}(\varphi)$ 为第 k 路抑制子信号受到 IFFT 映射后的相位移动; $F^{(k)}(\varphi)$ 为该信号分量中窄带莱斯噪声在相位上的投影, 均值为 1, 标准差为 0; $T(\varphi)$ 为第 k 路抑制子信号在完成信号调制后的相位强度增益, 其时域获取方式 $T(t)$ 为

$$T(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{N_c} a_i b_j A(t - iT_s - jT_c) \quad (3)$$

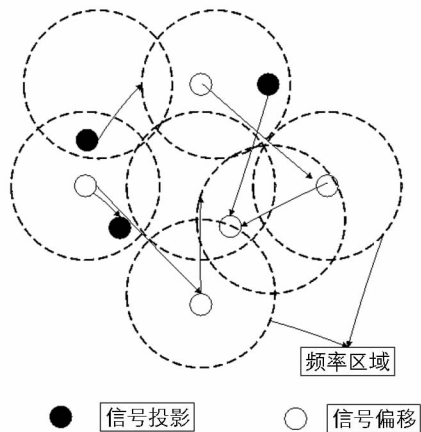


图 2 信号频谱偏移示意图

其中: T_s 表示 OFDM 信号的符号周期; T_c 表示 OFDM 调制-解调时域间隔; N_c 表示第 k 路抑制子信号中的符号在 T_c 内的发生频率; b_j 为进行 128 频相移键控调制过程中因窄带莱斯噪声干扰而产生的跳变, 且满足 $b_j \in \{+1, -1\}$; a_i 为进行 128 频相移键控调制过程的自相关序列, 且满足 $a_i \in \{+1, -1\}$.

为了进一步提高 OFDM 信号发射强度, 降低莱斯噪声对信号增益的削弱作用, 需对式 (3) 中的各个参数进行约束:

$$A(t) = e^{(1-4\pi^2/\Lambda^2)(-2\pi^2/\Lambda^2)} \quad (4)$$

其中 Λ 为标准三角函数.

联合式 (3), 将式 (2) 演变为

$$Y^{(k)}(\varphi) = \sum_{l=1}^k F^{(k)}(\varphi) + T(\varphi) H^{(k)}(\varphi) = \sum_{l=1}^k F^{(k)}(\varphi) + T(\varphi) \sum_{l=1}^k \beta_l^{(k)} e^{-j\varphi\varphi_l} \quad (5)$$

当信号完成初步调制之后, 再次进行基于 λ 等间隔的 FFT 正交离散化处理, 其生成的第 k 路信号投影矢量为:

$$Y^{(k)}(\varphi_\lambda) = \sum_{l=1}^k F^{(k)}(\varphi_\lambda) + T(\varphi_\lambda) H^{(k)}(\varphi_\lambda) = \sum_{l=1}^k F^{(k)}(\varphi_\lambda) + T(\varphi_\lambda) \sum_{l=1}^k \beta_l^{(k)} e^{-j\varphi\varphi_l} \quad (6)$$

可见, 对于不同的信号 k 而言, 其对应的投影矢量满足正交特性, 即:

$$Y^{(i)}(\varphi_\lambda) * Y^{(j)}(\varphi_\lambda) = 0 \quad (7)$$

由于各路抑制子信号均存在频率重叠现象, 且其中残存一定幅度的窄带莱斯噪声^[7], 虽然投影矢量发射前通过式 (7) 的方式能够将窄带莱斯噪声进行预消除, 然而对于第 M 路抑制子信号而言, 由于各个抑制子信号的频率相隔较近, 难以顺利进行预消除. 这是由于抑制子信号在调制过程中, 若各个子信号的频率均与图 2 所示的频率混叠结构相似, 将因频率重叠而导致严重的窄带干扰现象.

此外由图 2 可知, 整个信号频谱偏移过程中, 信号投影与实际投影距离间均单纯采用一对一的映射方式, 该方式虽然简便易行, 然而由于信号投影过程中因窄带莱斯噪声而不可避免地出现频率偏移现象, 一旦信号在预发射过程中出现信道抖动, 将导致严重的频率混叠现象, 严重影响信号投影的准确度.

因此, 本文构建频域窄带莱斯噪声消除机制, 整个消除机制由星座图发射结构与窄带莱斯噪声消除结构组成, 其中各路抑制子信号的核心频率将按照调制顺序一一映射为星座图发射状态下的投影, 详细过程如下:

Step 1: 首先确定各路抑制子信号的中心频率, 并将该频率投影为星座发射中心, 确保投影点的切线与法线呈现正交状态(图 3).

Step 2: 按投影先后顺序, 从基带频率投影处划分距离层次, 并将各个投影点依次分布在层次圈内(图 3). 当投影点处于镜像对称位置时, 选取最近的投影位置作为基准位置, 然后再次重新定位法线方向与切线方向(图 4).

Step 3: 投影完毕后, 根据各个抑制子信号的强度, 按预发射状态进行重制, 映射成新的发射结构, 映射规则如下:

1) 发射结构按照频率采样点的高低, 对投影点进行环状层次排序, 若调制方式为 M-QFSK, 按 π/M 的顺序进行等距排列.

2) 若存在两路呈现镜像对称状态的投影, 则对该层发射序列进行倒序处理, 以保证发射时不存在同时发射的两路抑制子信号(图 5). 在预发射信号时, 首先从距离最近的环上对信号进行解析(图 5), 并按照各路抑制子信号的带宽进行带通滤波, 消除信源中的窄带莱斯噪声, 完成信号的发送.

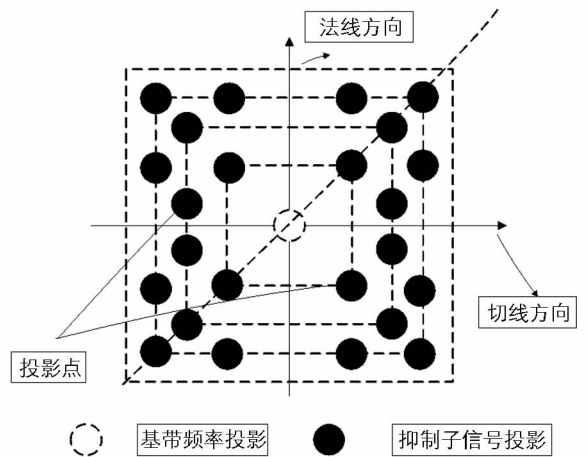


图 3 星座图发射结构(投影点不重合)

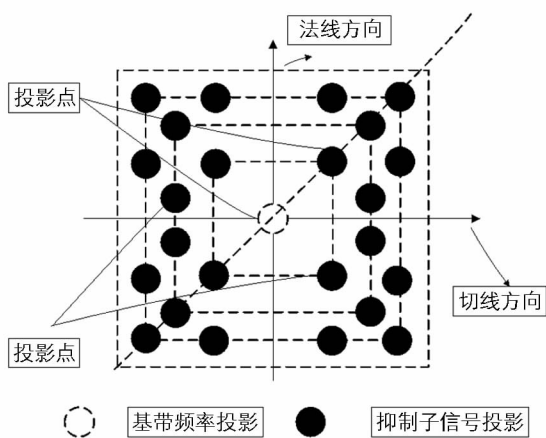


图 4 星座图发射结构(投影点镜像对称)

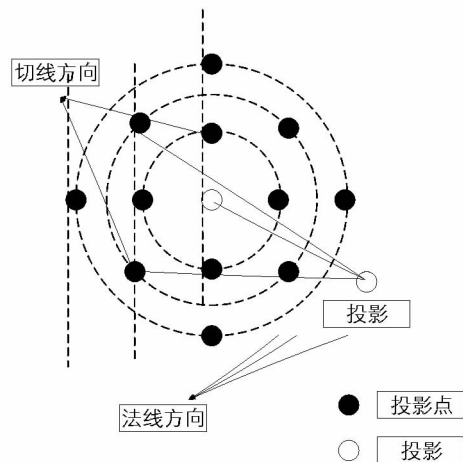


图 5 窄带莱斯噪声消除结构

1.2 投影矢量加密精度增强

由于各路抑制子信号的投影矢量进行发射时存在一定的频率抖动, 当信号发射强度较大时将极易因多普勒现象而导致频率失真现象^[8], 导致接收后的抑制子信号正确率受到严重影响. 为解决多普勒偏移现象^[9-10], 本文构建了投影矢量加密精度增强(图 6). 在 FFT 变换机制完成后, 将得到新的待发射子信号, 其能量分布模型满足:

$$E = \bigoplus \beta_i \mu_i \quad (8)$$

其中: β_i 为节点 i 的频谱能量; μ_i 为第 i 路信道能量衰落因子; E 为莱斯噪声能量分布.

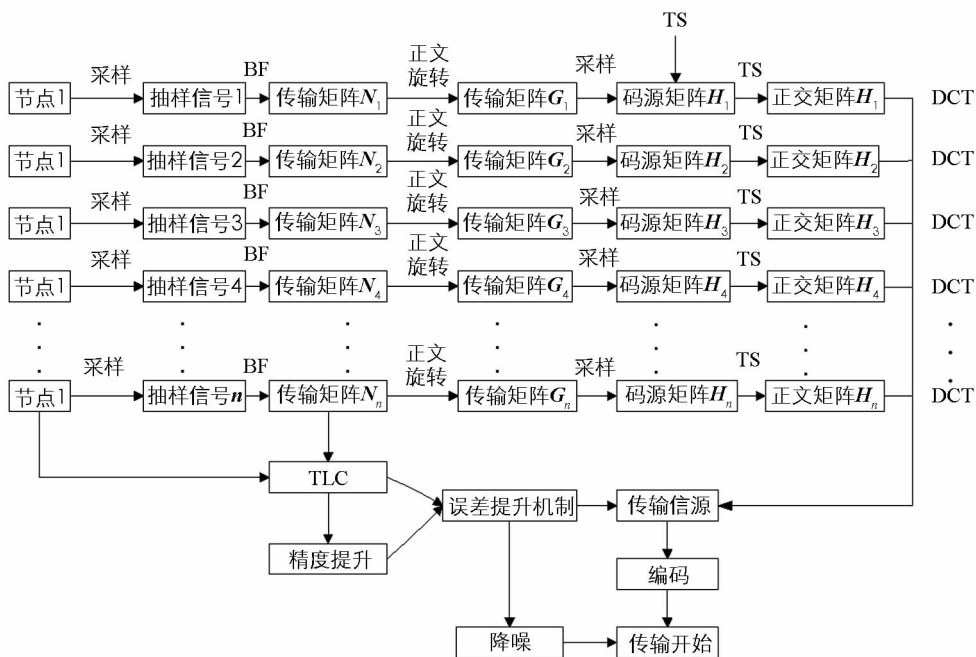


图 6 投影矢量精度加密提升机制

随后, 引入量化评估模型(quantitative easing assessment, QEA)^[11], 对式(8)所示的待发射子信号建立加密校验模型 Ψ :

$$\Psi = e^{(1-Q_{EA})^\delta} + \bigoplus E^{1-Q_{EA}} \quad (9)$$

$$REA(x, y) = \int \sqrt{\frac{\pi}{M}} - \frac{e^{(x-y)}}{x-y+N_1} dx \times \int \sqrt{\frac{\pi}{M}} - \frac{e^{\sum_{x=1, y=1}^m x-y}}{\sum_{x=1, y=1}^m x-y+N_2} dy \quad (10)$$

其中: Ψ 为校验值, 当仅当该值低于 0.1 时认为传输无误差; Q_{EA} 为量化误码指数; δ 为莱斯衰落因子; N_1 与 N_2 为常数, 可以通过模型(11) 获取; x, y 分别为任意两路不同的子信道所对应的干扰因子, 可通过式(8) 获取.

由于不同时刻所观察到的莱斯衰落因子具有一定的差异, 加密过程中因莱斯干扰而导致严重的误码现象. 为进一步提高本文算法对莱斯噪声的抗干扰性能, 建立莱斯衰落因子计算模型如下:

$$\delta = \left(\frac{1}{v_{\max}} + \frac{1}{v_{\min}} \right) E \times Q_{EA} + \left(\frac{1}{v_{\max}} - \frac{1}{v_{\min}} \right) \frac{\sum_{x=1, y=1}^m x - y}{\sum_{x=1, y=1}^m x - y + N_2} \quad (11)$$

其中: $v_{\min}$ 为信源最小编码速率; $v_{\max}$ 为信源最大编码速率.

使用本文所示的投影矢量加密精度增强对典型莱斯噪声进行信号增益衰落计算, 可以得到信号增益衰落曲线(图 7). 从图 7 中可以看到, 随着信噪比性能的不断下降, 本文采用投影矢量加密精度增强后, 有效降低了投影矢量的信号增益衰落, 这说明了本文在信道传输环境不断恶化的情况下, 能够通过投影矢量加密精度增强改善信道传输质量, 降低噪声干扰.

2 仿真实验

为便于比较本文算法的精度增强质量, 本文仿真实验使用 NS2 仿真环境. 仿真参数采用标准 OFDM 信号作为基准信号, 抑制子信号个数为 1024 个; 星座图采用 128QPSK 调制及 128QFSK 调制方式; 且单一路数抑制子信号个数为 512; 对照组采用 OFDM 技术中经常使用的时间窗消除机制(time window elimination mechanism, TWE)^[12]、频率拓扑映射机制(frequency topology mapping, FT)^[13].

图 8 显示了理想状态下标准 OFDM 信号的 SGC 曲线(signal gain curve, SGC)及本文算法与对照组算法的 SGC 曲线. 由图 8 可知, 无论采用 128QPSK 调制及 128QFSK 调制方式, 本文 OFDM 信号增益曲线与标准 OFDM 信号的 SGC 曲线重合程度高, 本文算法与标准 OFDM 信号最高相差 $1.7 \text{ dB} \cdot \text{rad}^{-1}$; TWE 算法与标准 OFDM 信号最高相差 $7.7 \text{ dB} \cdot \text{rad}^{-1}$; FT 算法与标准 OFDM 信号最高相差 $11.6 \text{ dB} \cdot \text{rad}^{-1}$, 可见, 本文算法与标准 OFDM 信号的 SGC 性能最为接近. 该现象表明, 本文算法采用频域窄带莱斯噪声消除机制, 能够在预调制阶段通过信号投影矢量的匹配方式基本消除频域窄带莱斯噪声的影响, 且经过逆向变换, 能够最大限度还原原始 OFDM 信号的 SGC 性能; TWE 机制由于需要针对不同频率的窄带莱斯噪声构建时间窗, 信道噪声具有频带特性, 当信号调制时各个时间窗上的窄带噪声将通过投影方式均衡地映射到各个信号投影矢量上, 因而难以通过带通滤波方式提高 OFDM 系统对窄带莱斯噪声的消除效率, 且存在严重的噪声残留现象; FT 机制由于对频域窄带莱斯噪声在信号预发射阶段估计不足, 未采取消除措施, 仅采取简单低通滤波方式, 无法消除带状噪声, 因而与原始 OFDM 信号出现较大幅度偏差, 导致该机制的 SGC 曲线出现了严重的畸变现象.

图 9 显示了本文算法与对照组算法的 OFDM 系统误码率(system error rate, SER)性能曲线. 由图 8 可知, 本文算法的 SER 指标要远远低于 TWE 机制与 FT 机制, 这是因为本文采取频域窄带莱斯噪声消除机制, 能够针对每路子信号与频域窄带噪声的匹配情况进行定向消除, 且使用投影矢量加密精度增强的方式对信号预发射过程进行精度增强, 有效降低了本文算法的系统误码率水平; TWE 机制在发射前采用脉冲一次发射成型方式, 由于难以对频率窄带噪声进行定向适配, 因而消除效果要远远低于本文算法; FT 机制虽然能够对信号发射波形进行一次匹配, 然而由于该方式是在时域上进行, 易导致因成型失败而引入带外杂波, 因而系统误码率性能不高.

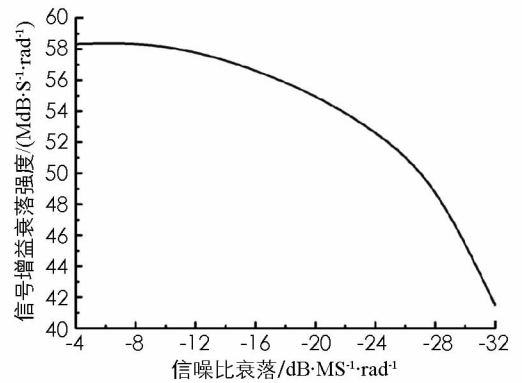


图 7 量化误差曲线

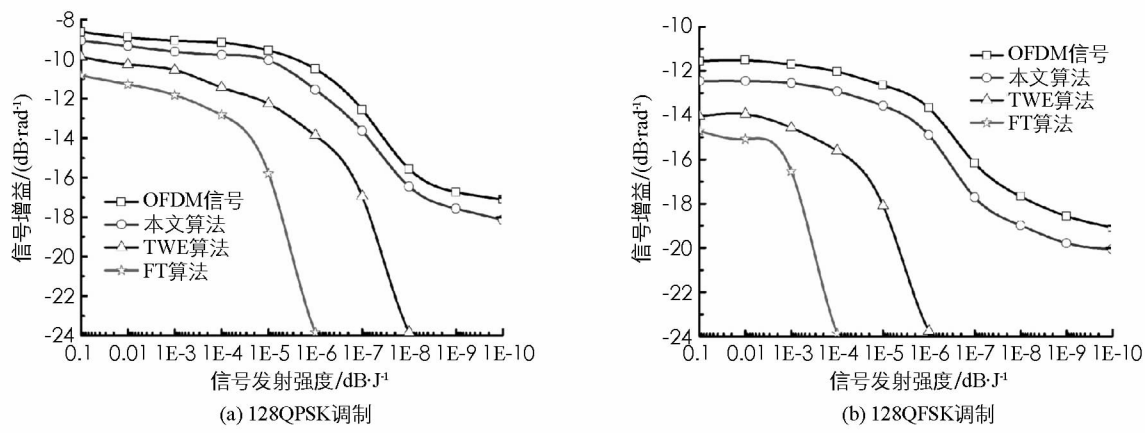


图 8 3 种算法的信号增益曲线测试

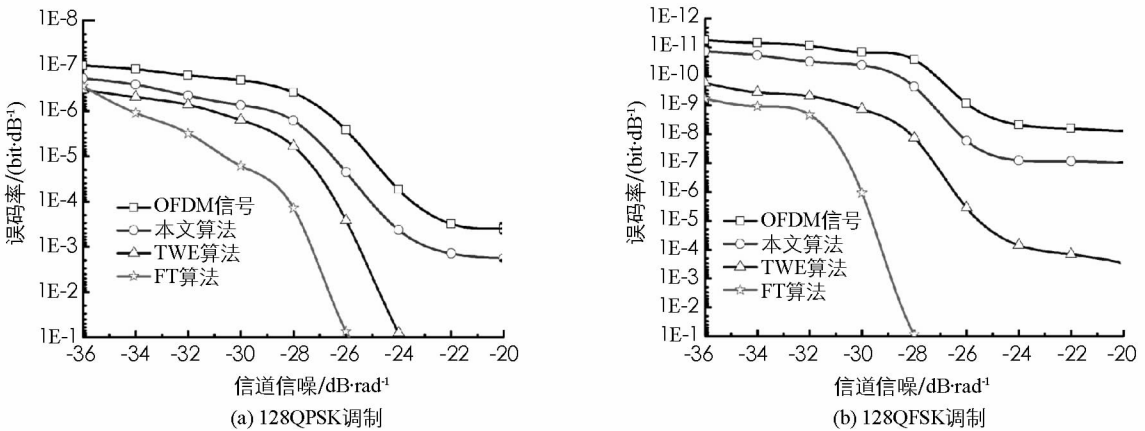


图 9 3 种算法的系统误码率测试

3 结束语

为进一步改善当前 OFDM 网络信号发射精度增强机制难以彻底消除频域窄带莱斯噪声的不足,本文提出了一种新的基于频域窄带莱斯噪声消除机制的 OFDM 网络信号精度增强算法.该算法首先通过频域窄带莱斯噪声消除机制,实现了对带通状态下的频域窄带莱斯噪声的初步消除;随后基于量化评估模型的方式构建投影矢量加密精度增强过程,采用傅里叶逆变换的方式进一步提高了 OFDM 信号对频域窄带噪声的消除效果,降低了信号衰落现象.仿真实验表明,本文算法与当前常见的时间窗消除机制、频率拓扑映射机制相比,系统误码率较低,且具有良好的信号增益效果,在实践中具有较强的使用价值.

下一步,将通过层级旋转映射的方式,对预发射状态的 OFDM 信号进行序列重排序过程的研究,通过信号序列自身的抗噪性能的提高,增强本文算法对各种复杂信道环境的适应性性能.

参考文献:

[1] 徐 强,全 欣,潘文生.同时同频全双工 LTE 射频自干扰抑制能力分析 & 实验验证 [J]. 电子与信息学报, 2014, 3(14): 662-668.

[2] 阳敏辉,谢胜治.基于环正交腔体噪声消除的 OFDM 网络信号误差限制算法 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2017, 42(10): 26-33.

[3] 申 敏,吴素园,李玲欣.一种改进的电力线通信 OFDM 自适应比特分配算法 [J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2017, 12(6): 732-738.

[4] HE Y S, CHENG Y F, WU G, et al. Performance Analysis of FFH/BPSK System with Partial Band Noise Jamming and Channel Estimation Error in High-mobility Wireless Communication Scenarios [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(35): 5011-5018.

- [5] ZHANG P L, ZHANG H X. Particle Filtering Based Channel Estimation in OFDM Power Line Communication [J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2014, 21(5): 24-30.
- [6] WANG H, LIU NAN, LI Z H, et al. A Unified Algorithm for Mobility Load Balancing in 3GPP LTE Multi-Cell Networks [J]. Science China(Information Sciences), 2013, 56(2): 1-11.
- [7] 谢显中, 刘源源, 雷维嘉. 高动态环境下基于数据辅助的稳健信噪比估计 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 32(8): 174-181.
- [8] XU Q, QUAN X, ZHANG Z L, et al. Analysis and Experimental Verification of Digital Self-Interference Cancellation for Co-time Co-frequency Full-Duplex LTE [J]. International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition, 2014(7): 299-312.
- [9] WANG D, ZHANG Q, LIU J C. Partial Network Coding: Theory and Application for Continuous Sensor Data Collection [C]// 2006 IEEE International Workshop on Quality of Service. New York: IEEE Computer Society Press, 2011.
- [10] LEI T, HE D P, LI X W. A New Cell Search Scheme for TD-LTE System [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 24 (7): 190-204.
- [11] HASAN M, HOSSAIN E. Distributed Resource Allocation for Relay-Aided Device-to-Device Communication: A Message Passing Approach [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(11): 6326-6341.
- [12] WANG J, XU C, YOU X H. Research on User Pairing Algorithm for LTE Femtocell Uplink [J]. Science China Information Sciences, 2014, 57(8): 1-10.
- [13] ZHAO Y, LI Y, CHEN X, et al. Joint Optimization of Resource Allocation and Relay Selection for Network Coding Aided Device-to-Device Communications [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(5): 807-810.

Signal Enhancement Algorithm of OFDM Network Based on Frequency Domain Narrowband Noise Cancellation

LI Jun-xia, YUAN She-feng

College of Information Engineering, Henan Vocational College of Agriculture, Zhengzhou 451450 China

Abstract: In order to improve the accuracy of OFDM network signal lifting algorithm is difficult to erase the high frequency narrow band Rician noise and high error rate, signal gain strength is difficult to reach the ideal state, presents a lifting algorithm of OFDM network signal precision frequency domain narrow-band Rician noise erasing mechanism based on. Based on the 128 frequency phase shift keying modulation, based on obtaining the signal on the use of the fast Fourier transform of discrete signals, and the signal based on orthogonal projection method to realize signal constellation, projection vector in the pre-launch condition orthogonal layer sorting, eliminate the interference source under the condition of Frequency Domain Narrowband the Rician noise on the system; then the fast Fourier transform based on pre launch signal is encrypted, and through the quantitative model of error evaluation mechanism of signal precision is further improved, greatly save the transmission bandwidth, improve the signal transmission performance, this algorithm improves the channel fading effect. Simulation results show that the time window algorithm and the common elimination mechanism (Time Window Elimination Mechanism TWE mechanism), frequency topology mapping mechanism (Frequency topology mapping FT mechanism) compared to the bit error rate of the system is low, and has a good signal gain effect, which is of great value in practice.

Key words: OFDM network signal; fast Fourier transform; orthogonal constellation; signal gain; narrow band noise in frequency domain; quantitative appraisalment model