

宽带 MIMO 电力线系统有限反馈预编码方法*

郑建宏^{a,b}, 林欢^{a†}, 李想^a

(重庆邮电大学 a. 通信与信息工程学院; b. 新一代宽带移动通信重点实验室, 重庆 400065)

摘要: 多输入多输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) 宽带电力线通信 (power line communication, PLC) 系统中由于电磁耦合存在共信道干扰, 从而限制系统信道容量性能。针对该问题, 提出一种基于量化反馈的预编码算法。利用两个相位角对预编码矩阵进行参数化, 通过对相位角均匀量化形成预编码码本; 再采用弦距离准则从码本中选取最优码字; 最后基于数据流的子载波映射信息, 提出一种新的功率分配方案。仿真结果表明, 该算法利用码本索引可有效降低反馈开销, 同时结合新的功率分配方案可有效降低系统误码率、提升系统吞吐量。

关键词: 电力线通信; 预编码; 量化反馈; 多输入多输出

中图分类号: TN915.853

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2018)05-1488-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2018.05.045

Limited feedback precoding method in broadband MIMO powerline communication system

Zheng Jianhong^{a,b}, Lin Huan^{a†}, Li Xiang^a

(a. School of Communication & Information Engineering, b. Key Laboratory of New Generation Broadband Mobile Communication Technology, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: The co-channel interference from electromagnetic coupling limited the channel capacity performance of MIMO broadband PLC system. To solve this problem, this paper proposed a precoding algorithm based on quantitative feedback. Firstly, this method parameterized the precoding matrix by two phase angles, and generated the codebook by uniform quantization of the phase angles. Secondly, it selected the optimal codeword from the codebook by the chordal distance criteria. Finally, based on the tone map information of data streams, it proposed a new power allocation scheme. The simulation results show that the algorithm can effectively reduce the feedback overhead by the codebook index, and can further reduce the system bit error rate and improve the system throughput by the new power allocation scheme.

Key words: power line communication (PLC); precoding; quantitative feedback; multi-input multi-output (MIMO)

近年来, 凭借低成本、分布范围广和无须额外布线的优势, 电力线通信可提供高速率宽带通信服务, 与无线局域网技术互补从而改善家庭接入网的服务质量^[1]。MIMO 技术已广泛应用于无线通信系统中, 同样将其应用于 PLC 通信系统, 可有效提高系统比特速率、增强通信链路可靠性。目前国际标准化组织家庭插电联盟和国际电信联盟已将 MIMO 技术确定为新一代电力线网络的关键技术^[2]。由于电磁耦合 MIMO PLC 信道间相关性很强^[3,4], 从而导致共信道干扰并限制了信道容量, 所以, 有效消除 MIMO PLC 信道间的相互干扰, 提升系统吞吐量是一个亟待解决的问题。迄今为止, 针对 MIMO PLC 系统中的预编码技术, 国内外已有许多研究人员取得了相关的研究成果。文献[5]比较了三种不同 MIMO 方案的系统吞吐量性能, 包括波束赋形方案、空时编码方案和无预编码的空间复用方案, 结果表明即使是在脉冲噪声环境下, 结合自适应调制的 MIMO 波束赋形方案性能最优, 但该方案要求发射端获取理想的信道状态信息 (channel state information, CSI)。文献[6]提出一种 MMSE 预编码, 使用多项式矩阵分解构造基于 MIMO PLC 信道的 MMSE 预编码器和均衡器, 并引入子带方法解决

在低能量频带不能实现对角化的问题, 然而该算法由于存在矩阵求逆运算, 运算复杂度太高。为了实现系统互信息最大化, 文献[7]针对输入为有限字符集 (如 PSK、QAM 调制符号) 的 MIMO PLC 系统提出一种简化的预编码设计方法, 即将预编码矩阵分解成右酉矩阵和功率矩阵, 该右酉矩阵的设计只与调制方式有关, 从而简化了设计; 但该方案的功率分配矩阵基于迭代搜索的方法, 计算复杂度过高。

本文利用基于传输线理论^[8]的自下向上的信道建模方法, 对 MIMO PLC 信道进行建模, 并推导其信道容量公式。在此基础上提出一种基于量化反馈的预编码算法, 无须反馈完整的预编码矩阵信息, 可有效降低反馈开销。传统的预编码方案只考虑了等功率分配, 因此给出一种简单实用的新的功率分配机制, 与所提预编码算法结合可进一步改善电力线系统的综合性能。

1 系统模型和信道建模

1.1 MIMO PLC 系统模型

传统的基于单输入单输出 (single-input single-output, SISO) 系统的 PLC 调制解调器只使用火线—零线这组相线发送

收稿日期: 2017-05-09; 修回日期: 2017-06-28 基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目 (2016ZX03002010-003)

作者简介: 郑建宏 (1961-), 男, 重庆人, 教授, 博导, 主要研究方向为通信核心芯片、协议与系统应用技术; 林欢 (1992-), 女 (通信作者), 四川南充人, 硕士研究生, 主要研究方向为宽带 MIMO 电力线载波通信技术 (867600741@qq.com); 李想 (1993-), 男, 湖南长沙人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力线信号检测技术。

和接收信号,而大多数家庭传输电缆具有三相线配置,即火线(P)、零线(N)和保护地线(PE),利用这三条差分相线可组成 MIMO PLC。根据基尔霍夫定律,闭合回路中三个输入信号电压和为零,则只能使用三个输入端口中的任意两个作为发送端口;而接收端除了三个差分的接收端口外,还存在第四条接收路径,称为共模(common mode, CM)路径。因此,在发射端可以使用由火线、零线或保护地线(即 P-N、P-PE 和 N-PE)组成的任何两个发送端口,而接收端至多有四个接收端口。

对于由 N_T 个发送端口和 N_R 个接收端口组成的预编码 MIMO PLC 系统,系统模型如式(1)所示。

$$Y = HFX + N \quad (1)$$

其中: X 表示发送信号; F 表示预编码矩阵; H 表示信道传输矩阵; N 表示噪声; Y 表示接收信号。预编码 MIMO PLC 系统框图如图1所示。

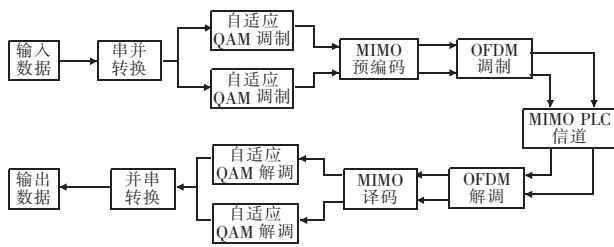


图1 预编码 MIMO PLC 系统框图

1.2 MIMO PLC 信道建模

根据三导体传输线的单元长度等效模型^[9]可获取多输入多输出信道的电阻、电导、电感、电容的单元长度参数矩阵 R 、 G 、 L 和 C 。单元长度电阻为 $r = \frac{1}{2\pi r_w \sigma_c \delta}$, r_w 表示导体半径; σ_c 表示导体电导率; δ 为趋肤深度,计算公式为 $\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu_0 f \sigma_c}}$, f 是频率; μ_0 是真空磁导率。单元长度电感公式为 $l = \frac{\mu_0}{\pi} \log\left(\frac{d}{r_w}\right)$, d 是相邻两导体之间的距离。假设电缆是均匀介质,利用式(2)可得到电容和电导的单元长度参数矩阵。

$$\begin{cases} C = \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon_r l / L \\ G = \mu_0 \sigma_d l / L \end{cases} \quad (2)$$

其中: ε_0 是真空介电常数; ε_r 是导体相对介电常数; l 是 2×2 的单位矩阵。因此可得到电阻、电导、电感和电容的单位长度参数矩阵 R 、 G 、 L 和 C 分别为

$$\begin{aligned} R &= \begin{bmatrix} 2r & r \\ r & 2r \end{bmatrix} & G &= \begin{bmatrix} g_1 + g_m & -g_m \\ -g_m & g_2 + g_m \end{bmatrix} \\ L &= \begin{bmatrix} l & 0.5l \\ 0.5l & l \end{bmatrix} & C &= \begin{bmatrix} c_1 + c_m & -c_m \\ -c_m & c_2 + c_m \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

利用传输线电压比方法,可得到总的 MTL 传输函数是各单元传输函数的乘积。

$$H(f) = \prod_{b=1}^N H_b(f) \quad (4)$$

MIMO PLC 系统的信道容量公式如下:

$$C_{\text{MIMO}} = B \sum_{n=1}^N \log_2 \left[\det \left(I + H_n H_n^H \frac{\gamma_n}{N_T} \right) \right] \quad (5)$$

其中: B 表示子信道带宽; l 表示 2×2 单位矩阵; $\gamma_n = P_{t,n}/P_{w,n}$, 表示发送信号与噪声信号功率谱密度之比; $\{\cdot\}^H$ 表示共轭转置。

2 预编码过程

2.1 波束赋形

对信道矩阵 H 进行 SVD 分解,如式(6)所示,可得到包含信道矩阵奇异值的对角矩阵 D 、左奇异矩阵 U 、右奇异矩阵 V 。由于 V 是酉矩阵,利用 V 进行预编码不会影响平均发射信号能量。利用酉矩阵 V 进行的预编码方案称做特征波束赋形。

$$H = UDV^H \quad (6)$$

在发送端对每个子载波进行预编码操作,即发送符号乘以预编码矩阵以实现线性预编码。

$$F = VP \quad (7)$$

预编码矩阵 F 可等效为两个矩阵 V 和 P , V 为 H 的右奇异矩阵, P 是描述功率分配的对角矩阵,即如何将总的发射功率分配给各发射数据流。当接收端使用迫零均衡时,均衡矩阵为

$$W = V^H H^P = D^{-1} U^H \quad (8)$$

其中: $\{\cdot\}^P$ 表示求广义逆。均衡后的符号为

$$y = D^{-1} U^H (HV s + n) = s + D^{-1} U^H n \quad (9)$$

2.2 量化预编码矩阵

波束赋形方案需要反馈完整的预编码矩阵信息,反馈开销大,因此需要对预编码矩阵 V 进行量化,降低反馈开销。 V 可以由接收机反馈的两个相位角 θ 和 φ 表示。

$$V = [v_1 \ v_2] = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} \\ v_{21} & v_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -e^{j\theta} \sin \varphi & e^{j\theta} \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (10)$$

对相位角进行均匀量化可得

$$\begin{cases} \varphi = \frac{k\pi}{2^{b_\varphi+1}} & k=0,1,\dots,2^{b_\varphi}-1 \\ \theta = \frac{k\pi}{2^{b_\theta-1}} - \pi & k=0,1,\dots,2^{b_\theta}-1 \end{cases} \quad (11)$$

其中: b_φ 表示量化 φ 的比特数; b_θ 表示量化 θ 的比特数。

$$\hat{F} = \{V_n\} \quad 1 \leq n \leq 2^b \quad (12)$$

对预编码矩阵进行量化后得到有效的码本 \hat{F} , b 位反馈比特对应 2^b 个码字。此时接收端基于弦距离最小准则,从码本中选出最优码字,反馈其二进制码本索引给发送端。

$$d_c^2(v, v_n) = 1 - \|v^H v_n\|^2 \quad (13)$$

采用弦距离作为距离准则^[10],两个向量的弦距离定义如式(13)所示,其中 v 是信道矩阵 H 进行 SVD 分解后的第一列,求出所有码字与 v 的弦距离,对应最小距离的码字则是当前最优的码字。

2.3 功率分配

传统的预编码方案采用等功率分配方案,即各发射端口的发射功率相等,信道容量性能受限。对于高斯分布的输入信号,注水算法^[11]可提供最佳 MIMO 功率分配以最大化系统的信道容量,但该算法复杂度较高。简化注水算法在其基础上改进,分配给各数据流的功率与信道特征值成正比,如式(14)所示。

$$p_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_i} \times P \quad (14)$$

由于两条数据流子载波的信噪比不同,提出一种新的功率分配方案,根据两条数据流的子载波映射(tone map)信息设置两个流的功率分配系数。两条数据流预分配相同的发送功率,当某条流上子载波估计出的信噪比非常低,以致分配该子载波

的星座调制比特数为零,从而该子载波不携带任何信息时,该数据流预分配的发射功率全部转移给另一条数据流。此时,信道子载波信噪比计算如式(15)所示。新的功率分配流程如图2所示。如果信道上某子载波被刻凹痕(notched),即所选的子载波没有用于在信道上传输数据。

$$\text{SNR} = \frac{|H(f)|^2}{\delta^2} \quad (15)$$

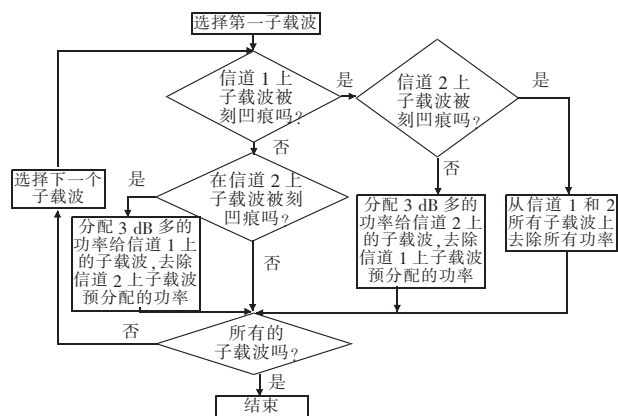


图2 新的功率分配流程

3 仿真性能与分析

基于传输线理论对 MIMO PLC 信道建模并搭建 MIMO PLC 系统仿真链路进行算法验证。本文假定理想信道估计,支持 QPSK-1024QAM 自适应调制。从信道容量和误码率性能方面对不同预编码方案进行仿真对比。本文仿真环境为 MATLAB R2010b, CPU 频率为 2.5 GHz, 内存为 4 GB, 具体仿真参数如表 1 所示。

表1 仿真参数

仿真参数	参数内容	仿真参数	参数内容
系统总带宽/MHz	12	反馈比特数	4
采样频率/MHz	25	IFFT 点数	1 024
子载波间隔/kHz	24.414	噪声环境	背景噪声
子载波数	512	编码方式	Turbo 编码
帧控制有效子载波	411	调制方式	自适应调制

图3显示,与 SISO PLC 系统相比,MIMO PLC 的信道容量得到明显提升,这证明 MIMO 技术确实能改善 PLC 系统的信道容量。可以看出,所提方案与其他几种预编码方案下的信道容量性能十分接近,分析可知,预编码矩阵是酉矩阵,具有规范性,因此不影响 MIMO PLC 系统信道容量性能。仿真结果显示所提方案十分接近波束赋形方案的容量性能,这表明该算法尽管进行了量化但未带来容量性能损失。

图4显示与没有预编码方案相比,所提算法具有6 dB左右的 SNR 增益,这表明预编码操作可降低系统的误码率。可以看出,所提方案在低信噪比区域误码率性能十分接近未经量化的波束赋形方案,在高信噪比区域由于对预编码矩阵信息进行了量化,性能略有下降。所以,该方案在误码率性能接近理想预编码的同时还具有反馈开销小的优势。

图5、6对比了三种不同功率分配方案对信道容量性能和系统误码性能的影响。图5表明,新的功率分配方案可进一步优化预编码算法,从而改善系统的信道容量性能,而且与其他方案相比具有3 dB的 SNR 增益。图6显示新的功率分配方案也可进一步降低系统的误码率,与传统等功率分配方案相比,具有2 dB左右的性能优势。

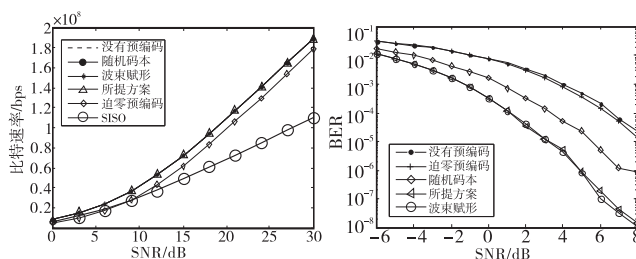


图3 不同预编码方案的比特率性能对比

图4 不同预编码方案的误码率性能对比

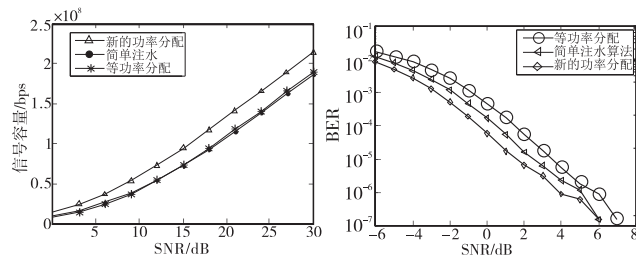


图5 不同功率分配方案的信道容量性能对比

图6 不同功率分配方案的误码率性能对比

4 结束语

本文针对多输入多输出宽带电力线系统中的共信道干扰和反馈开销大的问题,提出一种基于均匀量化的有限反馈预编码算法。仿真结果表明,该算法在信道容量和误码率性能方面能接近理想的波束赋形方案,同时通过反馈二进制码本索引大力降低了反馈开销。与传统等功率分配方案相比,采用新的功率分配方案可进一步优化预编码 MIMO PLC 系统性能。由于本文未考虑脉冲噪声,接下来可进一步研究脉冲噪声环境下的 MIMO PLC 系统的预编码算法。

参考文献:

- [1] 戚佳全,陈雪萍,刘晓胜. 低压电力线载波通信技术研究进展[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 161-172.
- [2] Berger L T, Schwager A, Pagani P, et al. MIMO power line communications [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(1): 106-124.
- [3] Tomasoni A, Riva R, Bellini S. Spatial correlation analysis and model for in-home MIMO power line channels [C]//Proc of the 16th International Symposium on Power Line Communications and Its Applications. 2012: 286-291.
- [4] Corchado J A, Cortés J A, Cañete F J, et al. Analysis of the spatial correlation of indoor MIMO PLC channels [J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(1): 40-43.
- [5] Stadelmeier L, Schill D, Schwager A, et al. MIMO for inhome power line communications [C]//Proc of the 7th International ITG Conference on Source and Channel Coding. 2008: 1-6.
- [6] Weiss S, Moret N, Millar A P, et al. Initial results on an MMSE precoding and equalisation approach to MIMO PLC channels [C]//Proc of IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications. 2011: 146-152.
- [7] Peng Jisheng. Linear precoding design for MIMO-PLC systems [J]. Tsinghua Science and Technology, 2015, 20(2): 155-163.
- [8] Versolatto F, Tonello A M. An MTL theory approach for the simulation of MIMO power-line communication channels [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(3): 1710-1717.
- [9] 曹旺斌,尹成群,谢志远,等. 多输入多输出宽带电力线载波通信信道模型研究 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 1136-1142.
- [10] Love D J, Heath R W, Strohmer T. Grassmannian beamforming for multiple-input multiple-output wireless systems [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2003, 49(10): 2735-2747.
- [11] Schneider D, Speidel J, Stadelmeier L, et al. Precoded spatial multiplexing MIMO for inhome power line communications [C]//Proc of IEEE Global Telecommunications Conference. 2008: 1-5.