

# 宽带电力线 MIMO 通信中基于能效的波束成形算法<sup>①</sup>

潘子春<sup>1</sup>, 于浩<sup>1</sup>, 柏思瑶<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(国网安徽省电力公司 信息通信分公司, 合肥 230061)

<sup>2</sup>(华北电力大学 电气与电子工程学院, 保定 071003)

**摘 要:** 宽带电力线 MIMO 通信中, 由于存在多用户干扰和共信道干扰, 需要应用波束成形算法消除, 由于信道状态信息不能准确获得, 需要对信道进行量化反馈, 故反馈误差会导致系统性能下降; 针对此问题, 本文提出了一种考虑量化误差影响的波束成形算法, 此算法在保证用户服务质量的前提下, 以最大化系统能源利用效率为优化目标, 仿真验证了此波束成形算法的有效性和鲁棒性。

**关键词:** 宽带电力线; 多输入多输出; 波束成形; 量化误差; 算法

## Energy Efficient Beamforming Algorithm in Broadband Power Line MIMO Communication System

PAN Zi-Chun<sup>1</sup>, YU Hao<sup>1</sup>, BAI Si-Yao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(Information and Communication Branch, State Grid Anhui Electric Power Company, Hefei 230061, China)

<sup>2</sup>(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** In broadband power line Multi-input multi-output (MIMO) communication, there are multi-user interference and co-channel interference, which needs an application of a beam forming algorithm to eliminate it. Because the channel state information cannot be accurately acquired, it needs a quantitative feedback for channels, so that the feedback error would cause a decline in performance of the system. Aiming at this problem, this paper proposes a beam forming algorithm, which considers the influences of quantization error of the algorithm. In the premise of ensuring the quality of customer service, this algorithm takes maximizing the system energy efficiency as the optimization goal. The beamforming simulation verifies the effectiveness and robustness of the algorithm.

**Key words:** the broadband PLC; MIMO; beamforming; quantization error; algorithm

能源互联网中, 能源接入设备众多、通信方式多种多样, 需要传输的信息量较大. 电力线部署的地域广, 无需额外搭建费用, 从而宽带电力线载波通信成为研究的一个热点<sup>[1]</sup>. 特别是多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)技术的引入<sup>[2]</sup>, 使得宽带电力线 MIMO 系统成为重要的能源互联网通信支撑系统. 在宽带电力线 MIMO 系统中, 文献[3]提出了不同接收端零干扰的块对角化预编码方法来解决多个接收端的共信道干扰问题. 对于电力线中的同频干扰问题, 根据脏纸编码理论, 同频干扰可以全部消除, 从而提高系统传输速率. 但是由于全部消除同频干扰的脏纸编码为非线性运算, 计算复杂度高, 不能在实际

中应用; 故线性波束成形算法成为研究的一个重点<sup>[4]</sup>.

随着能源资源日益紧张, 节约能源, 提倡绿色环境保护成为当今的潮流. 随着信息和通信技术的快速发展, 相应的能量消耗也以惊人的速度增加; 根据文献[5-8]的调查, 超过 50% 的电能用在了频谱接入方面, 故绿色高能源利用效率的宽带电力线通信成为了研究趋势. 然而, 片面的追求高能源效率, 而忽视用户的传输速率的需求显然也是违背了客观实际需求.

传统的宽带电力线载波通信均是采用单相传输线进行传输的, 然而单相传输没有利用电力线三相传输线的优势, 从而造成了传输速率不高, 承载业务能力不强的劣势; 文献[3]应用了多输入多输出的传输方式,

① 收稿时间:2016-09-13;收到修改稿时间:2016-11-03 [doi:10.15888/j.cnki.csa.005802]

并且应用预编码的方法消除共信道干扰,然而在消除干扰的同时,造成了能量利用率不高;根据文献[9]的综述可以看出,多输入多输出的宽带电力线载波能够提供空间自由度,可以利用信号的正交特性,提高传输速率,同时可以提高能量利用效率.然而,由于预编码技术需要发送端已知信道的状态信息,但是由于接收端量化码本会产生量化误差,所以造成传输速率和能量利用率的损失;正是基于研究现状,本文考虑了量化误差的统计特性,设计一种波束成形方法,此方法能够最大化能量利用效率,同时能够保证用户服务质量;此算法对宽带电力线 MIMO 通信具有很强的实际应用意义.

## 1 系统模型

考虑一个宽带电力线载波通信系统,这里设有多个用户接收,故根据文献[9],设有  $M$  个发送用户,并且有  $N$  个接收用户,每个用户之间均通过三条电力线相连,则信道可以表示为 MIMO 的矩阵形式,如式(1)所示:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{11} & \mathbf{H}_{12} & \cdots & \mathbf{H}_{1N} \\ \mathbf{H}_{21} & \mathbf{H}_{22} & \cdots & \mathbf{H}_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{H}_{M1} & \mathbf{H}_{M2} & \cdots & \mathbf{H}_{MN} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中  $\mathbf{H}_{ij}$  ( $i=1, \dots, M$ ,  $j=1, \dots, N$ ), 代表第  $i$  个发送用户与第  $j$  个接收用户的信道衰落函数, 其为  $3 \times 3$  子矩阵, 即每个接收用户和发送用户均是采用三条线传输. 则在用户端接收到的信号可表示为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{x}$  为用户发送的数据, 其为  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_M]^T$ ,  $\mathbf{n} = [n_1, n_2, \dots, n_N]^T$  为接收端接收到的噪声, 其中每个元素服从独立同分布的正态分布, 并且  $E\{\mathbf{n}\mathbf{n}^H\} = \sigma_n^2 \mathbf{I}_N$ ,  $E\{\bullet\}$  代表取均值;  $(\bullet)^H$  代表共轭转置运算.

为了消除用户间的干扰以及共信道干扰, 本文拟在发送端应用波束成形矩阵, 并在接收端采用均衡算法, 从而实现收发联合优化. 应用波束成形矩阵, 发送端波束成形算法的接收信号表示为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{T}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{T}$  为波束成形矩阵, 其维度为  $N \times M$ . 相应的, 在接收端采用均衡算法得到接收信号可以表示为:

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{G}(\mathbf{H}\mathbf{T}\mathbf{x} + \mathbf{n}) \quad (4)$$

根据分析, 可以得到第  $m$  个用户接收数据的速率为:

$$C_m = BE \{\log_2 (1 + SINR_m)\} \quad (5)$$

其中,  $B$  代表用户所占用的带宽,  $SINR_m$  代表第  $m$  个用户接收的信干噪比. 根据接收端的均衡条件, 选取复杂度最小的迫零均衡, 其表达式为:

$$\mathbf{G}_m = (\mathbf{T}_m^H \mathbf{H}_m^H \mathbf{H}_m \mathbf{T}_m)^{-1} \mathbf{T}_m^H \mathbf{H}_m^H \quad (6)$$

则在第  $m$  个用户均衡后的信干噪比:

$$SINR_m = \frac{1}{\sigma_n^2 \left[ (\mathbf{T}_m^H \mathbf{H}_m^H \mathbf{H}_m \mathbf{T}_m)^{-1} \right]_{m,m}} \quad (7)$$

由此,  $N$  个接收用户接收的总速率为:

$$C = \sum_{i=1}^N Tr(\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}^H) \quad (8)$$

## 2 问题描述

本文研究能源利用效率优化问题, 先确定能源利用效率. 对通信的能源消耗, 定义  $p_M$  和  $p_l^P$  分别是发送端发送功率和接收端的功率, 而  $\eta_M$  和  $\eta_P$  分别是功率放大系数,  $p_C$  代表整个异构网络的电路能量消耗. 由此, 总的消耗能量为:

$$P_{total} = \frac{1}{\eta_M} p_M + \frac{1}{\eta_P} \sum_{l=1}^L p_l^P + p_C \quad (9)$$

在总的发射能量受限的情况下, 系统的吞吐量越高, 则能源利用效率越高. 故本文能效采用广泛的度量模式, 即每焦耳所能传送的比特速率, 其单位为 bits/Joule/Hz, 其度量定义为<sup>[10]</sup>:

$$\mu_{EE} = \frac{C}{P_{total}} \quad (10)$$

根据能效度量的定义, 又需要保证通信质量, 故确定优化的函数为:

$$\begin{aligned} & \max_{\{\mathbf{T}\}} \mu_{EE} \\ & s.t. \sum_{i=1}^K Tr(\mathbf{T}\mathbf{T}^H) \leq P_{max} \end{aligned} \quad (11)$$

$$C_m = BE \{\log_2 (1 + SINR_m)\} \geq C_{min}$$

根据文献[11]所介绍, 由于接收和发送之间的信道需要量化, 并且通过有限反馈机制, 将信道信息传送给发送端, 故信道的分解形式为:

$$\bar{\mathbf{H}}_k = \hat{\mathbf{H}}_k \mathbf{X}_k \mathbf{Y}_k + \mathbf{S}_k \mathbf{Z}_k \quad (12)$$

其中,  $\mathbf{S}_k$  和  $\mathbf{Z}_k$  相互独立,  $\hat{\mathbf{H}}_k, \mathbf{X}_k$  和  $\mathbf{Y}_k$  相互独立.  $\hat{\mathbf{H}}_k$  是  $\mathbf{H}_k$  的列组成的一组子空间正交基,  $\mathbf{X}_k$  在格拉斯曼流形  $\text{Grass}(N, N)$  平均分布, 与码本矩阵具有相同的列空间;  $\mathbf{Y}_k$  是上三角形矩阵, 对角元素是正数<sup>[8]</sup>, 为投影在码本矩阵列空间的值;  $\mathbf{S}_k$  是码书矩阵的零空间,  $\mathbf{Z}_k$  是上三角形矩阵, 对角元素是正数<sup>[8]</sup>, 为投影在码本矩阵零空间的值即量化误差. 根据文献[11]的分解方法可得:

$$\mathbf{Y}_k^H \mathbf{Y}_k = \hat{\mathbf{H}}_k^H \mathbf{W} \mathbf{W}^H \hat{\mathbf{H}}_k \quad (13)$$

$$\text{Tr}(\mathbf{Y}_k^H \mathbf{Y}_k) = N - d^2 \left( \hat{\mathbf{H}}_k, \mathbf{W} \right) \quad (14)$$

$$\mathbf{Z}_k^H \mathbf{Z}_k = \mathbf{I}_N - \mathbf{Y}_k^H \mathbf{Y}_k \quad (15)$$

$$\text{Tr}(\mathbf{Z}_k^H \mathbf{Z}_k) = d^2 \left( \hat{\mathbf{H}}_k, \mathbf{W} \right) = D \quad (16)$$

上述具体推导过程可以参见文献[11], 其中  $D$  代表量化误差, 此误差在文献[11]有具体表达式, 此处不再赘述.

### 3 基于能效的波束成形方法

根据式(11)所示优化问题, 采用拉格朗日算法进行优化, 假设  $\lambda$  和  $\mu$  是非负实数, 并且根据凸优化原理, 其构建的能效函数为非凸函数, 故采用迭代拉格朗日乘数方法, 通过迭代找到最优解, 从而提高能效.

拉格朗日乘数目标函数为:

$$L(\mathbf{T}_m; \mathbf{G}_m; \lambda; \mu_m) = \mu_{EE} - \lambda \left\{ \sum_{i=1}^K \text{Tr}(\mathbf{T} \mathbf{T}^H) - P_{\max} \right\} - \mu_m \left\{ BE \{ \log_2(1 + \text{SINR}_m) \} - C_{\min} \right\} \quad (17)$$

根据拉格朗日乘数法, 对两个优化矩阵  $\mathbf{T}_m$  和  $\mathbf{G}_m$  分别求导, 从而求得极值点.

$$\frac{\partial L(\mathbf{T}_m; \mathbf{G}_m; \lambda; \mu_m)}{\partial \mathbf{T}_m} = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial L(\mathbf{T}_m; \mathbf{G}_m; \lambda; \mu_m)}{\partial \mathbf{G}_m} = 0 \quad (19)$$

根据式(18)和(19)可以得到  $\mathbf{T}_m$  和  $\mathbf{G}_m$  的表达式为:

$$\mathbf{T}_m = \left[ \left( M^2 N^3 - M^2 N^2 D \right) \hat{\mathbf{H}}_m^H \mathbf{G}_m^H \mathbf{G}_m \hat{\mathbf{H}}_m + M^2 D (1 - N) \mathbf{G}_m^H \mathbf{G}_m + \lambda_m (MN - N^2) \mathbf{I} \right]^{-1} \hat{\mathbf{H}}_m^H \mathbf{G}_m \quad (20)$$

$$\mathbf{G}_m = \mathbf{T}_m \hat{\mathbf{H}}_m \left[ \hat{\mathbf{H}}_m^H \mathbf{T}_m^H \hat{\mathbf{H}}_m^H + M^2 D (1 - N) \mathbf{T}_m^H \mathbf{T}_m + M^2 N^2 \right]^{-1} \left[ \hat{\mathbf{H}}_m^H \hat{\mathbf{H}}_m^H + (DMP_k N^2) \mathbf{I} \right] \quad (21)$$

由式(20)和(21)的结果可以得到, 发送的波束成形矩阵和接收的均衡矩阵之间存在相互决定的关系, 故即使得到了极值点, 也不能确定另一矩阵对应的就是

最大值点, 故需要迭代方法确定组合的最大值点. 其迭代步骤为:

步骤 1. 设置迭代计数变量  $n=0$ . 对  $\mathbf{G}_m(0), m=1, \dots, N$  赋初值, 采用正交的酉矩阵为初值;

步骤 2.  $n \leftarrow n+1$ . 用式(20)更新  $\mathbf{T}_m$ ;

步骤 3. 用式(21)计算并且更新  $\mathbf{G}_m$ ;

步骤 4. 重复步骤 2 和步骤 3 到收敛.

### 4 仿真结果

为了生成 1500 个随机 MIMO 信道的集合, 我们使用文献[12]的通道生成器工具. 模拟一个现实家庭网络设置, 铺设了 15 个插座的树形拓扑节点和 20 个分支, 并且改变分支长度 1 至 100 米, 每个出口处的负载条件不同, 在 1 k $\Omega$  到 2k $\Omega$  之间. 也改变主干导体具有对称的两个可用选项带状电缆. 这导致具有子载波的信道衰减在 10 dB 和 70 dB 之间变化, 平均值为 42dB.

我们认为 PLC 噪声是背景、窄带脉冲噪声的和, 如<sup>[13]</sup> 附录 F 中给出了噪声的分布, 前两者可以假定为静止的并且通过其分布函数来描述.

(1) 有色背景噪声: 有色背景噪声的 PSD 被建模为一阶指数:

$$S(f) = a + b|f|^c \quad (21)$$

其中  $a$ 、 $b$  和  $c$  根据表 1 设置.

表 1 不同信道噪声水平的统计参数

|                     | High        | Medium      | Low         |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|
| $F(\text{MHz})$     |             |             |             |
| PS                  | u[0.25,0.5] | u[0.25,0.5] | u[0.25,0.5] |
| PA                  | u[2,13]     | u[2,13]     | u[2,13]     |
| AP                  | u[0.5,1]    | u[0.5,1]    | u[0.5,1]    |
| $T_d(\mu\text{s})$  |             |             |             |
| PS                  | 300         | u[2,300]    | 2           |
| PA                  | 10          | u[1.5,10]   | 1.5         |
| AP                  | 150         | u[15,150]   | 15          |
| $A_f(\text{mV})$    |             |             |             |
| PS                  | 1500        | u[5,1500]   | 5           |
| PA                  | 40          | u[4,40]     | 4           |
| AP                  | 150         | u[5,150]    | 5           |
| $T_{in}(\text{ms})$ |             |             |             |
| PS                  | u[10,200]   | u[10,200]   | u[10,200]   |
| PS                  | u[10,200]   | u[10,200]   | u[10,200]   |

| PA             | $\varepsilon(\lambda^{-1}=100)$ | $\varepsilon(\lambda^{-1}=100)$ | $\varepsilon(\lambda^{-1}=100)$ |
|----------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| AP             |                                 |                                 |                                 |
| $N_T$          |                                 |                                 |                                 |
| PS             | 10                              | $u[1,10]$                       | 1                               |
| PA             | 5                               | $u[0,5]$                        | 0                               |
| AP             | 10                              | $u[1,10]$                       | 1                               |
| $S(f)(dBm/Hz)$ |                                 |                                 |                                 |
| a              | -145                            | $u[-140,-145]$                  | -140                            |
| b              | 53.23                           | $u[52.23,38.75]$                | 38.75                           |
| c              | -0.337                          | $u[-0.337,-0.72]$               | -0.72                           |

(2) 窄带噪声: 窄带噪声 PSD 是参数高斯函数. 不改变窄带噪声参数, 因为它们通常是不同的噪声电平, 独立于网络条件和通常通过干扰短波或无线电引入信号.

(3) 脉冲噪声: 脉冲噪声在时间上产生域使用正弦和模型.

仿真中, 考虑收发节点之间信道服从瑞利衰落, 采用 QPSK 作为调制方式. 为分析本方案的有效性, 从系统的能源效率和吞吐量两个方面进行了分析对比. 对比方案为:

(1) 不考虑能效优化的波束成形算法, 并且不考虑有限反馈误差, 在仿真图中表示为“传统波束成形方法”.

(2) 考虑能效优化的波束成形算法, 但不考虑有限反馈误差, 在仿真图中表示为“传统能效优化”.

(3) 本论文所提出的方法, 在仿真图中表示为“本方案”.

在仿真中, 采用快速傅里叶变换的变化点数为 128 位, 信道编码采用 turbo 码, 其码率为 3/4, 采用数据位 72, 非数据位为 64 位, 图 1 所示, 随着频谱效率的增加, 其能源利用率经历了先升高后降低的过程, 可以看出, 本方案能效利用率是所有对比方案最高的, 说明本方案可以在整个发送功率区域具有节能鲁棒性, 并且较传统能效优化有 5bps/Hz 的增益.

图 2 可以看出, 本方案的系统中断概率最低, 其原因是本方案考虑了量化误差的影响, 所以在整个的频谱效率的范围下, 其中断概率较低, 相比其他两个方案, 获得了至少 5bps/Hz 的增益, 表明了本方案在吞吐量方面的优势, 能够提高系统的能效, 提升系统用户的服务质量.

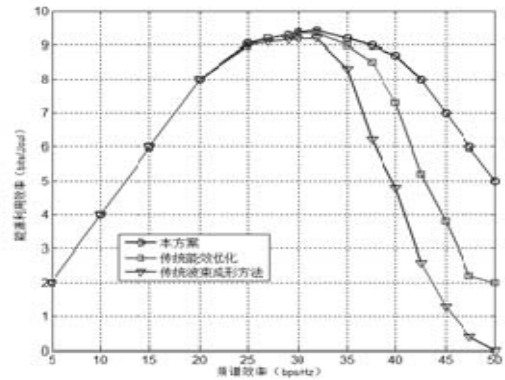


图 1 三种方案能效对比(QPSK)

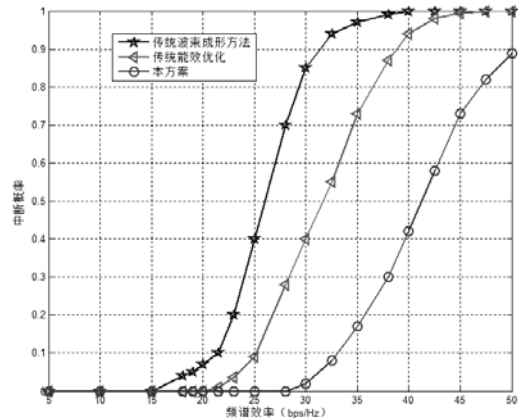


图 2 三种方案中断概率对比

## 5 结论

宽带电力线载波 MIMO 系统中, 提出了一种考虑量化误差的能效波束成形和均衡联合优化算法, 此算法采用迭代的方式寻找最优解, 仿真结果验证了所提方案在能效和吞吐量方面的优势和鲁棒性.

## 参考文献

- 1 蒋伟, 杨俊杰, 初凤红. 宽带电力线通信技术及其前景展望. 光通信研究, 2009, 35(2): 38-41.
- 2 Galli S, Scaglione A, Wang Z. For the grid and through the grid: The role of power line communications in the smart grid. Proc. of IEEE, 2011, 99(6): 998-1027.
- 3 伍韵文, 郭劲松, 吴海东, 等. 宽带电力线载波 MIMO 系统干扰消除预编码方法. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 123-126.
- 4 李文刚, 易克初, 刘祖军, 邵飞. 改进的多用户波束赋形算法. 通信学报, 2009, 30(12): 79-84.
- 5 Nassar M, Lin J, Mortazavi Y, Dabak A, Kim IH, Evans BL. Local utility power line communications in the 3-500 kHz

- band: Channel impairments, noise, and standards. IEEE Signal Processing Magazine, Special Issue on Signal Processing Techniques for the Smart Grid, 2012, 29(5): 116–127.
- 6 Han J, Choi C, Park WK, Lee I, Kim SH. PLC-based photovoltaic system management for smart home energy management system. IEEE Trans. Consumer Electron, 2014, 60(2): 184–189.
- 7 Son YS, Pulkkinen T, Moon KD, Kim C. Home energy management system based on power line communication. IEEE Trans. Consumer Electron, 2010, 56(3): 1380–1386.
- 8 Des Marais DJ, Strauss H, Summons RE, et al. Carbon isotope, evidence for the stepwise oxidation of the Proterozoic environment. Nature, 1992, (359):605–609.
- 9 Berger L, Schwager A, Pagani P, Schneider D. MIMO power line communication. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2015, 17(1): 106–124.
- 10 HomePlug Powerline Alliance, Home plug AV specification version 2.0, 2012, <http://www.homeplug.org>.
- 11 Ravindran N, Jindal N. Limited feedback-based block diagonalization for the MIMO broadcast channel. IEEE Trans. on selected areas in communications, 2008, 26(8): 1473–1482.
- 12 Gruber F, Lampe L. On PLC channel emulation via transmission line theory. 2015 International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC). IEEE. 2015, 178–183.
- 13 Tonello AM, Versolatto F. Bottom-up statistical PLC channel modeling-Part I: Random topology model and efficient transfer function computation. IEEE Trans. on Power Delivery, 2011, 26(2) :891–898.