

基于 QoS 策略的低压电力线信道容量研究

何威, 周克, 张超, 张霞, 邓颖

(贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 为了在有限的传输带宽内使低压电力线信道容量最大化, 提出了基于特定 QoS 策略的约束注水算法。该算法以低压电力线信道多径传输模型为研究基础, 从信号功率受限的角度出发, 导出了信道容量最大化的闭式解, 分析并得出信道分支支路数和终端负载阻抗是影响信道容量的主要因素。利用正交频分复用 (OFDM) 技术对输入信号进行离散化调制, 得到了不同信道状况下的最大传输比特数。仿真结果表明, 所提算法的信道容量优于已有注水法, 在信噪比为 40dB 时, 所提算法的最大容量为经典注水法的 1.37 倍, 完全满足低压电力线高速载波通信的要求。

关键词: QoS 策略; 低压电力线; 约束注水法; 多径传输; 信道容量; OFDM 技术

Study of channel capacity for low power-line based on QoS strategy

HE Wei, ZHOU Ke, ZHANG Chao, ZHANG Xia, DENG Ying

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to maximize the low power-line channel capacity under the constraints of bandwidth, a method of water-filling algorithm based on the specific QoS strategy is proposed. The multipath propagation model is used to derive the closed-expression of the maximum channel capacity under the condition of power limit. The analytic results show that the number of branches, the length of branches and different terminal loads have effects on the PLC channel capacity. Simulation results show that the mainly factors that affect the channel capacity of indoor low power-line are branch number and load impedance. In order to evaluate the performance of the proposed algorithm, a simulation environment based on OFDM is designed. The simulation results show that at the same SNR, the performance of proposed algorithm is superior to the existed water-filling algorithms. When SNR=40dB, the maximum capacity of the proposed algorithm is 1.37 times more than that of the classical water-filling algorithm, thus meeting the demand of high speed index in low power-line carrier communication system.

Key words: QoS strategy; low power-line; bound water injection; multipath transmission; channel capacity; OFDM

中图分类号: TM73

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)13-0106-06

0 引言

电力线通信 (简称 PLC) 是利用已铺设的电力线缆作为信息传输媒介来完成信号传输的通信技术, 它主要应用于家庭内部联网和宽带接入两个方面, 是构建智能电网^[1]通信平台的优先选择。目前对电力线通信的研究主要围绕在信道建模^[2-4]、信道特性分析^[2]、信道估计均衡^[5]和信道容量^[6-7]分析等方面。对通信系统信道容量的研究, 国内外的主流技术是采用拉格朗日乘系数法来计算信道容量最大

值。文献[6]采用经典注水法分析了电力线信道内信息的最大传输速率和信道容量, 但其研究的频带较窄, 不能充分涵盖高频载波通信信道的性能。文献[7]给出了影响信道容量的具体因素, 但未限制各子信道上的分配功率, 造成功率分配不均匀。文献[8-9]提出了约束注水法, 保证了每个子信道内功率的合理分配, 获得了较大的系统容量, 但其未将剩余功率分配至最优子载波上, 导致了功率浪费。服务质量 (Quality of Service, QoS) 是通信行业制定的一种安全机制, 用于衡量数据传输的速度和可靠性, 常用吞吐量、传输延迟或误比特率来表示。文献[10]提出了一种改进的基于特定 QoS 的注水算法, 将分配给各子信道的功率进行量化, 实现了功率的最优分配, 保证了一定的 QoS 水平。但该算法未约束分

基金项目: 贵州省科学技术基金项目 (黔科合 J 字 [2013]2125 号); 贵州省教育厅自然科学基金 (2009)0028; 贵州大学研究生创新基金 (研理工 2013002)

配至各子信道上的载波功率,使得频带上出现了超过额定功率谱的频点和频段。本文结合约束注水法和QoS机制的特点,提出了基于特定QoS策略的约束注水算法,分析了影响低压电力线信道容量的主要因素及克服办法。利用OFDM技术对输入信号进行离散化调制,根据信道状况来动态调整信号的发送比特数,从而提高其传输速率。最后,依据本文算法,给出了仿真结果,并与经典注水法与未考虑QoS的约束注水法进行了仿真比较。

1 低压电力线信道模型

电力线分支众多,分布无序,其传输特性的变化具有随机性。室内环境下,电力线分支终端负载的接入和断出,会给传输信号带来冲击,造成信息衰减或突变,降低信号速率。为了分析影响低压电力线信道容量的主要因素,建立良好的信道模型至关重要。目前学者们建立的低压电力线信道模型主要分为两种:网络拓扑型和多径传输型。J. Anatory提出了低压电力线信道的网络拓扑模型^[11-12],该模型侧重于描述电力线信道的支路拓扑和终端负载结构,能够紧密结合地域电网分布特点来阐述电力线信道内信号的流向和终端负载的阻抗特性。但该模型需要考虑的网络参数过多,在实际的实验测量过程中难以准确掌握,不利于分析低压电力线的信道特性对容量的影响。M.K.提出了低压电力线的多径传输模型^[2],它通过表征高频信号在分支众多的电力线信道内的多路径传输来研究信号的传播特性,能够直观地反映出信号的物理传播过程,已广泛运用于通信信号的传输特性分析。因此本文采用多径传输模型作为低压电力线信道模型。

多径效应的产生原因主要分为三类:①电力线分支终端接入设备的阻抗与线路阻抗不匹配造成的信号衰减、被吸收;②线路上存在大量的分支造成信号在传播过程中的多径反射;③传播线路的非连续性。多径效应的频率响应 $H(f)$ 为

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i e^{-(a_0 + a_i f^k) d_i} \cdot e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (1)$$

式中: i 为路径号; g_i 为路径 i 的加权系数; a_0 , a_i , k 为衰减系数, k 取0.5~1; d_i 为路径长度,路径时

延 $\tau_i = \frac{d_i}{v} = \frac{d_i \sqrt{\epsilon_r}}{c}$ 。加权系数 g_i 和衰减系数 a_0 、

a_i 可通过实验测得,路径数 N 可控制模型的准确性。室内环境下的电力线路径数要比室外环境下多的多,而且每条路径的距离更短,信号衰减更小。实验中,设置的路径数越多,所建立的模型就越准

确。

2 电力线信道容量

受电力线热噪声和接入负载的干扰,传输信号的信噪比SNR在传输带宽内通常存在显著变化,而非恒定不变,所以经典的香农公式并不适用于电力线信道。考虑到耦合至电力信道的载波信号功率通常是有限^[13]的,信道容量可用式(2)^[14]来表示。

$$C = \int_{f_1}^{f_2} \log_2 \left[1 + \frac{S(f)}{N(f)} \right] df \quad (2)$$

式中: $S(f) = |H(f)|^2 \cdot P(f)$; $S(f)$ 为接收信号功率谱; $H(f)$ 为信道传递函数; $N(f)$ 为噪声功率谱; $P(f)$ 为输入信号功率谱。 $H(f)$ 和 $N(f)$ 都是电力线信道的固有特性,对信道容量 C 的求解可转化为对 $P(f)$ 进行最优化分配。若能充分利用有限的输入总功率,即可实现信道容量的最大化。目前常用的资源分配方法为经典注水法。但是,经典注水法仅实现了功率的动态分配,未能保证所有子信道上功率最优分配,并且该方法未考虑QoS,不能确保信号的高速、无误传输。基于此,本文提出了基于特定QoS策略的约束注水法,该算法的具体实现步骤如下:

1) 假设被参考的低压电力线信道被分为 M 个跨度为 Δf 的窄带平坦衰落子信道,每个子信道的容量 $C_j = \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{P_j |H_j|^2}{N_j} \right)$ 。 P_j 是第 j 个子信道的分配功率, H_j 是第 j 个子信道的频率响应, N_j 是第 j 个子信道的噪声功率。经离散化的总信道容量 $C_s = \sum_{j=1}^M C_j = \sum_{j=1}^M \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{P_j |H_j|^2}{N_j} \right)$,而且 $\sum_{j=1}^M P_j \leq P_m$, $P_j > 0$, P_m 是信道的输入总功率。

2) 令 M_j , S_j , P_{e_j} 分别表示第 j 个子信道输入信号的调制阶数、信噪比和误比特率。它们满足 $S_j = F(P_{e_j}, M_j)$ 和

$$S_j = \frac{P_j |H_j|^2}{N_j} \quad (3)$$

其中, $M_j = 2^q$, $q = 1, 2, 3, \dots$ 。

3) 定义误比特率的阈值^[15] $\Phi = 10^{-6}$ 表示PLC设备的QoS。

4) 令

$$C = \sum_{j=1}^M \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{P_j |H_j|^2}{N_j} \right) - \lambda \left(\sum_{j=1}^M P_j - P_m \right) \quad (4)$$

对 P_j 求偏导并令 $\frac{\partial C}{\partial P_j}$ 为0,得

$$P_j = \frac{\Delta f}{\lambda \ln 2} - \frac{N_j}{|H_j|^2} \quad (5)$$

由 $P_j > 0$ 知, $\frac{|H_j|}{N_j} > \frac{\lambda \ln 2}{\Delta f}$ 。

5) 设定子信道功率分配限值 ψ_j 且 $\psi_j > 0$, 在满足 QoS 的前提下, 找到最大可用的 M_{Φ_j} 值, 继而得到 S_{Φ_j} , 再通过式(3)来计算分配给第 j 个子信道的功率 P_{Φ_j} 。

6) 当分配给某些子信道的发射功率 $P_{\Phi_j} > \psi_j$ 时, 令剩余功率 $\Delta p_j = P_{\Phi_j} - \psi_j$, $P_{\Phi_j} = \psi_j$; 当 $0 < P_{\Phi_j} \leq \psi_j$ 时, 保留其值; 当 $P_{\Phi_j} < 0$ 时, 令 $P_{\Phi_j} = 0$ 并关闭该子信道。

7) 将第 j 个子信道的剩余功率分配至第 $j+1$ 个子信道中, 即 $P_{\Phi(j+1)} = P_{\Phi(j+1)} + \Delta p_j$, 重复步骤 5)、6), 往复迭代, 至所有子信道的分配功率都满足 $0 < P_{\Phi_j} \leq \psi_j$ 。

8) 在满足 $\sum_{j=1}^M P_{\Phi_j} \leq P_m$ 的前提下, 迭代调整 ψ_j 的值, 并计算出此时的 P_{Φ_j} , 直至 $\sum_{j=1}^M P_{\Phi_j}$ 无限逼近于 P_m 。将 P_{Φ_j} 代入式(5), 得到参数

$$\lambda = \frac{\Delta f |H_j|^2}{(S_{\Phi_j} + 1) N_j \ln 2} \quad (6)$$

9) 将式(6)代入式(4), 可得到最大化的信道容量为

$$C_{\max} = \sum_{j=1}^M \Delta f \log_2 \left(1 + \frac{P_{\Phi_j} |H_j|^2}{N_j} \right) + \frac{\Delta f |H_j|^2}{(S_{\Phi_j} + 1) N_j \ln 2} (P_m - \sum_{j=1}^M P_{\Phi_j}) \quad (7)$$

由式(7)可知, C_{\max} 与电力线信道模型函数 $H(f)$ 息息相关, 而 $H(f)$ 主要受多径分支数目、分支长度和因分支终端接入的负载阻抗引起的衰减影响。因此, 在算法仿真过程当中, 本文主要从信道多径分支数目、分支长度和分支终端接入阻抗这三个方面入手分析信道容量。

3 OFDM 自适应调制

通过基于特定 QoS 的约束注水法, 本文得出了室内低压电力线信道容量最大化的闭式表达式。算法步骤 5 需要确定各子信道输入信号最大可用的调制阶数, 这在实际通信环境中需根据信道的状况信息来动态调整信号的调制方式。OFDM 技术因其频带利用率高、抗信道衰落强等优点被广泛应用于通信系统。采用 OFDM 自适应调制技术^[16-17]可根据子信道的增益幅度来优化输入信号的调制方式, 能够

有效地提高频带内信号的传播速率, 降低信号在传播过程中的误码和失真危险。

OFDM 技术中常用的信号调制方式有多进制正交幅度调制 (MQAM)、双相移相键控调制 (BPSK) 和四相移相键控调制 (QPSK)。MQAM 的误码率 P_e 与信道可用比特数 q 、信号的平均功率 P 和噪声功率 N 有关, 设误差函数为 $erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\eta^2} d\eta$, 定义 $y = erf(x)$ 的反函数为

$x = \zeta(y)$, 则 $erfc(x) = 1 - erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-\eta^2} d\eta$ 。那么

MQAM 的误码率 $P_{eMQAM} = 1 - erf^2 \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{1}{2^q - 1} \cdot \frac{P}{N} \right)$, 经变换, 发射比特数 $q_{MQAM} = \log_2 \left(1 + \frac{3}{2} \zeta^{-2} (\sqrt{1 - P_{eMQAM}}) \cdot \frac{P}{N} \right)$ 。

对于非理想通信信道, MQAM、BPSK 和 QPSK 在每个子信道可实现的发射比特数分别为

$$q_{MQAM} = \text{ent} \left[\frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{3}{2} \zeta^{-2} (\sqrt{1 - P_{eMQAM}}) \cdot \frac{P_j |H_j|^2}{N_j} \right) \right] \quad (8)$$

$$q_{BPSK} = 1, \quad q_{QPSK} = 2$$

其中, $\text{ent}(x)$ 为小于 x 的最大整数。

OFDM 自适应调制方法可根据当前子信道内信号的发射比特数来动态调整调制方式。当 $q < 1$ 时, 说明信道环境恶劣, 令 $q = 0$, 关闭该子信道; 当 $q = 1$, 选择 BPSK 调制; 当 $1 < q < 3$, 取 $q = 2$, 选择 QPSK 调制; 当 $3 \leq q < 5$ 时, 取 $q = 4$, 选择 16QAM 调制; 当 $q \geq 5$ 时, 取 $q = 6$, 选择 64QAM 调制。

OFDM 自适应调制方法可有效避免因信道环境恶劣造成的信号误比特率增大、信噪比降低等情况, 在最大程度上保留了原信号信息, 提高了信号的传输速率。

4 算法仿真与实验分析

本文采用蒙特卡洛法对提出的基于特定 QoS 的约束注水法和 OFDM 自适应比特分配策略分别进行了仿真分析, 实验测试为 5 000 次。由前文可知, 影响室内低压电力线信道容量的主要因素有信道多径分支数目、分支长度和分支终端接入阻抗。在实验仿真中, 本文将对以上因素进行逐一分析。

实验情景 1: 根据式(7), 分别分析分支数目、分支长度和终端接入负载阻抗对信道容量的影响。

a) 设定支路阻抗为纯电阻负载、支路长度为 5 m, 支路数分别为 4、6、12、15, 仿真本文算法, 得到的图形如图 1 所示。

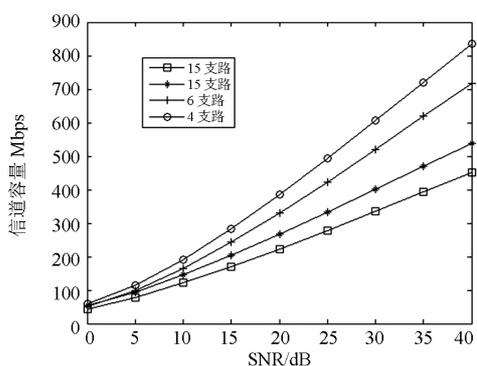


图 1 信道容量与支路数之间的关系

Fig. 1 Relationship between branch number and channel capacity

由图 1 可知,信道容量随支路数的增加而降低。在 $SNR < 5$ dB 时,支路数的增加对信道容量影响并不大,后随着信噪比的增加,不同支路信道容量之间的差距逐渐拉大。在 $SNR = 40$ dB 时,6 支路信道的容量比 4 支路下降了约 100 Mbps。当支路数由 4 增至 15 时,信道容量降低了近 380 Mbps。由此可知,随着电力线信道分支数的增加,信号在传播过程中遇到的反射点明显增多,导致多径效应影响加剧,致使信道容量急剧减小。

b) 设定支路阻抗为纯电阻负载,支路数为 12,支路长度分别为 5 m、10 m、20 m,仿真本文算法,得到的图形如图 2 所示。

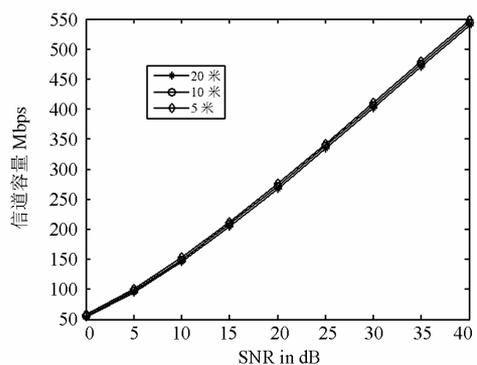


图 2 信道容量与分支长度之间的关系

Fig. 2 Relationship between branch length and channel capacity

由图 2 可知,随着 SNR 增加,信道容量呈非线性增长。当 $SNR = 40$ dB 时,信道容量最大可达 540 Mbps。虽然随着支路长度的逐渐增加,信道容量略有下降,但下降幅度并不明显,这与文献[7]中的结论吻合。

c) 设定支路数为 12,支路长度为 5 m,支路负载为纯电阻负载、感性负载、容性负载和无负载情形。仿真本文算法,得到的图形如图 3 所示。

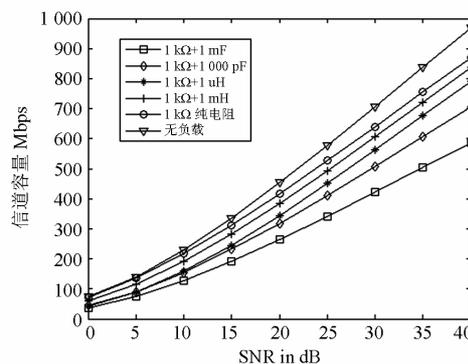


图 3 信道容量与支路终端阻抗之间的关系

Fig. 3 Relationship between branch end-impedance and channel capacity

由图 3 可知,当电力线信道支路无负载时,信道容量达到最大。在 $SNR = 40$ dB 时,容量可达 980 Mbps。而当分支接有负载,无论是纯电阻负载、感性负载还是容性负载,信道容量均有不同程度的损失,特别是接入容性负载后,信道容量损失最大。这是由于分支阻抗的接入衰减或吸收了信号能量,增大了信号的传输损耗,造成 SNR 降低,从而降低了信道容量。

比较带“+”和带“*”的两条曲线可知,当电力线信道接入感性较强的负载时,其所在信道容量会相对较大。这是由于分支终端接入的电感值越大,负载所呈现的阻抗值也越大,从而削弱了负载对信号的衰减和干扰。

比较带“o”和带“+”、“*”的三条曲线可知,当电力线信道分支接入较大的阻性负载时,串入电感对信道容量的影响较弱。当 $SNR = 40$ dB,在电力线分支终端串入 $1 \text{ k}\Omega + 1 \text{ mH}$ 的感性负载,仅比单独接入 $1 \text{ k}\Omega$ 纯电阻时的信道容量降低了 20 Mbps。

比较带“◇”和带“□”的两条曲线可知,容性较强的负载,其所在信道容量会相对较小。容性负载对高频信号具有吸收作用,加剧了信号的衰减程度,进而削减了信道容量。

由以上分析可知,为了提高室内低压电力线的信道容量,应适宜缩短电力通信设备之间的距离,优化信号耦合电路的设计^[18],尽量选择分支少、无接入负载的线路作为通信信道。必要时可使用优化装置来改变室内局域网拓扑结构中的负载特性,提高负载阻抗值,将容性负载尽可能地转化为阻性负载,以降低负载对载波信号的干扰。

实验情景 2: OFDM 自适应调制。根据信道状况的优劣程度来自动选择调制方式和发射比特数,仿真图形如图 4 所示。

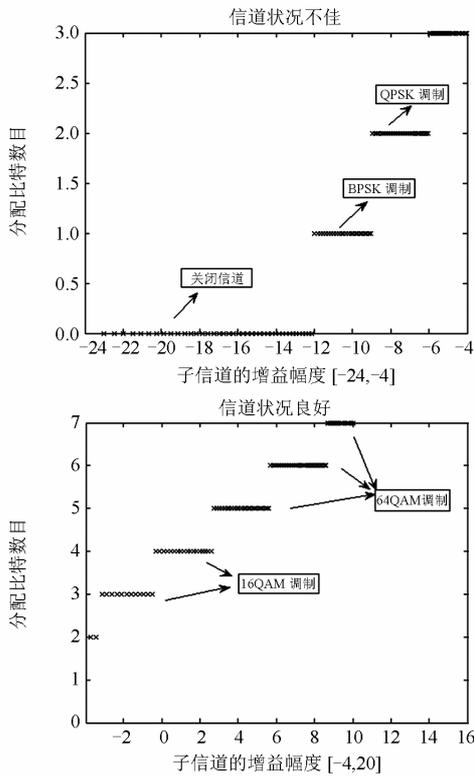


图 4 OFDM 自适应调制

Fig. 4 OFDM adjustive modulation

由图 4 可知，信号的调制方式需根据信号所在子信道的增益幅度来自适应调节，信道增益幅度表征了当前信道的通信状况。当子信道的增益幅度 $g \in [-23, -12]$ ，说明信道干扰严重，不合适传播信号，应予以关闭。当 $g \in [-12, -8]$ ，采用 BPSK 调制，传输少量的数据。当 $g \in [-8, -6]$ ，采用 QPSK 调制，加大数据的传输量。当 $g > -2$ ，说明信道状况良好，可使用 QAM 调制进一步加大数据的传输长度。当 $g \in [-2, 4]$ ，使用 16QAM 调制；当 $g > 4$ ，使用 64QAM 调制传输高速数据。

低压电力线载波通信设备的设计不仅要考虑电力线信道的传播特性，来提高信号的抗干扰能力和传输无误性，也要考虑终端用户的业务需求，即高速通信。本文以较低的误比特率作为服务质量，提出了基于 QoS 策略的信道容量研究，为了验证本文算法的高速通信性能，选取文献[6-7]提及的经典注水法、文献[8-9]中的约束注水法与本文算法在同样的实验环境设置下做出仿真比较，得到的图形如图 5 所示。

由图 5 可知，本文算法得到的信道容量优于经典注水法和约束注水法。由于本文考虑了 QoS 和子信道分配功率限值，有效地约束了分配至各子信道

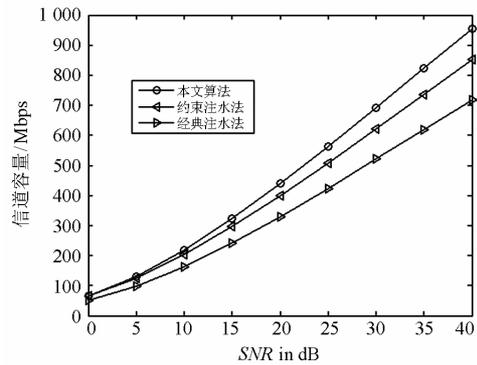


图 5 算法性能比较

Fig. 5 Contrast of performance between each algorithm

的最大功率，保证了输入总功率的完全分配。由仿真结果可知，当 $0 < SNR < 15$ dB 时，各子信道上分配的功率较少，本文算法与约束注水法得到的信道容量相当，但都高于未优化分配功率的经典注水法。当 $SNR > 15$ dB，随着 SNR 的增加，各子信道上分配的载波功率逐渐增加，三种方法之间的信道容量差值也逐渐增大。本文算法对剩余功率的再次分配，充分地利用了信道资源，防止了约束注水法和经典注水法可能存在的误剔除子信道情况，得到了较高的信道容量值，在 $SNR = 25$ dB 时，本文算法的信道容量已是经典注水法的 1.4 倍。当 SNR 增至 40 dB 时，本文算法的信道容量比约束注水法和经典注水法分别提升了 112% 和 137%，完全满足低压电力线高速载波通信系统的设计要求，可以实现楼宇内高速宽带组网和有线电视多元业务的接入。

5 结语

本文提出了基于特定 QoS 的约束注水算法，对室内低压电力线信道容量进行了研究分析，探究了影响信道容量的主要因素：多径分支支路数和终端负载阻抗。提出了提高信道容量的改进措施。利用 OFDM 自适应调制技术，根据信道通信状况有效地分配了信号比特数，提高了信号的传输速率。为低压电力线高速载波通信设备的设计和低压配电网宽带通信技术的研究提供了技术参考。

参考文献

- [1] 刘文, 杨慧霞, 祝斌. 智能电网技术标准体系研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 120-126.
LIU Wen, YANG Hui-xia, ZHU Bin. Review of research on smart grid technical standard system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 120-126.
- [2] 陈凤, 郑文刚, 申长军, 等. 低压电力线载波通信技术及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 188-195.

- CHEN Feng, ZHENG Wen-gang, SHEN Chang-jun, et al. Low-voltage power line carrier communication technology and its application[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(22): 188-195.
- [3] 蔡伟, 乐健, 靳超, 等. 电力线载波通信信道建模技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 149-154.
CAI Wei, LE Jian, JIN Chao, et al. Overview of the channel modeling methods of power line carrier communication[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 149-154.
- [4] 雍静, 桂小智, 牛亮亮, 等. 基于自回归参数模型的低压系统串联电弧故障识别[J]. 电工技术学报, 2011, 26(8): 213-219.
YONG Jing, GUI Xiao-zhi, NIU Liang-liang, et al. Series arc fault identification in low voltage system based on auto-regressive parameter model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(8): 213-219.
- [5] MORELLI M, MENGALI U. A comparison of pilot-aided channel estimation methods for ofdm systems[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2004, 49(12): 3065-3073.
- [6] 刘海涛, 张保会, 谭伦农. 低压电网信道容量的研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(4): 40-44.
LIU Hai-tao, ZHANG Bao-hui, TAN Lun-nong. Research on the channel capacity in a low voltage network channel[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(4): 40-44.
- [7] 罗文亮, 柯熙政, 马鸣. 基于蒙特卡洛低压电力线信道容量的研究[J]. 电波科学学报, 2009, 24(4): 691-696.
LUO Wen-liang, KE Xi-zheng, MA Ming. Study of channel capacity for low voltage power-line based on Monte Carlo simulation[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2009, 24(4): 691-696.
- [8] 王航. CR-OFDM系统中的一种新的动态频谱分配算法[J]. 南京邮电大学学报: 自然科学版, 2012, 32(4): 23-27.
WANG Hang. A novel dynamic resource allocation algorithm for CR-OFDM system[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunication: Natural Science, 2012, 32(4): 23-27.
- [9] 王业胜, 季薇, 侯晓赞. 认知 OFDM 系统中一种改进的注水功率分配算法[J]. 计算机技术与发展, 2013, 23(1): 79-86.
WANG Ye-sheng, JI Wei, HOU Xiao-yun. An improved algorithm based on water-filling power allocation in cognitive OFDM system[J]. Computer Technology and Development, 2013, 23(1): 79-86.
- [10] 杨杰. OFDM 通信系统容量与信道估计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
YANG Jie. Research on capacity and channel estimation of OFDM communication system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009.
- [11] ANATORY J, THOTTAPPILLIL R. Broadband power-line communication: the channel capacity analysis[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(1): 164-169.
- [12] ANATORY J, THOTTAPPILLIL R. Channel characterization for indoor power-line networks[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2009, 24(4): 1883-1887.
- [13] 吴少琴. 接收功率受限下的信道容量研究[J]. 电讯技术, 2012, 52(1): 86-89.
WU Shao-qin. Research on channel capacity under received-power constraint condition[J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(1): 86-89.
- [14] 吕峰. 低压配电网高频信道特性及通信信道容量的研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2004.
Lü Feng. Research on high frequency channel performance and channel capacity of low-voltage distribute network[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2004.
- [15] 赵知劲, 赖海超, 尚俊娜. 基于 QoS 需求的认知无线电资源分配算法[J]. 计算机工程, 2013, 39(2): 85-89.
ZHAO Zhi-jing, LAI Hai-chao, SHANG Jun-na. Resource allocation algorithm for cognitive radio based on QoS requirements[J]. Computer Engineering, 2013, 39(2): 85-89.
- [16] 张有兵, 翁国庆, 曹一家. 网络化电能质量监测系统 中的配电网载波通信[J]. 电工技术学报, 2010, 25(6): 116-122.
ZHANG You-bing, WENG Guo-qing, CAO Yi-jia. Distribution line carrier communication in networked power quality monitoring system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(6): 116-122.
- [17] 陈晓栋. OFDM 双向多跳网络的新型比特和功率分配 算法[J]. 电讯技术, 2013, 53(3): 307-311.
CHEN Xiao-dong. A novel bit and power allocation algorithm for OFDM-based two-way multihop network[J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(3): 307-311.
- [18] 李阳, 杨庆新, 闫卓, 等. 无线电能有效传输距离及其 影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 106-112.
LI Yang, YANG Qing-xin, YAN Zhuo, et al. Analysis on effective range of wireless power transfer and its impact factors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 106-112.

收稿日期: 2013-09-07; 修回日期: 2013-10-10

作者简介:

何威(1988-), 男, 硕士生, 主要研究方向为电力系统通信; E-mail: 512407654@qq.com

周克(1977-), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 硕士生导师, 现主要从事通信信号处理、智能电网技术等方面的研究。