

城市路灯监控中电力载波通信的可靠性研究

汪 坤 毕雪芹 张立广

(西安工业大学电子信息工程学院 西安 710021)

摘 要:城市路灯监控系统采用电力线载波通信技术实现路灯单灯控制。有利于城市路灯的数字化管理,满足了社会发展的需求,响应了国家绿色照明计划。由于采用电力线作为通讯介质,其本身有着很大的局限性,低压电网是一个时变的频率选择性衰落信道,信号衰减、阻抗变化和噪声干扰是影响低压电网信道特性的最主要的因素。因此,必须采用具有很强自适应能力的路由中继方案与调制技术才能满足低压电力线载波通信网络的需要。提出了 OFDM 调制解调方式及采用蚁群算法的路由中继策略完成数据传输过程中的最优路径规划问题选择使用,提高电力载波通信质量。

关键词:电力载波通信;信道特性;OFDM;蚁群算法

中图分类号: TN913 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5010

Study on reliability of electric power carrier communication in urban street light monitoring

Wang Kun Bi Xueqin Zhang Liguang

(School of Electronics Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: Urban street light monitoring system uses power line carrier communication technology to realize street lamp single lamp control. Is conducive to the digital management of urban street lamps to meet the needs of social development, in response to the national green lighting program. Because of the power line as the communication medium, which itself has great limitations. The low voltage grid is a time-varying frequency selective fading channel. Signal attenuation, impedance change and noise interference are the most important factors influencing the channel characteristics of low voltage power network. Therefore, it is necessary to adopt a route relay scheme and a modulation technique with strong adaptability to meet the needs of low voltage power line carrier communication network. In this paper, the OFDM modulation and demodulation method and the routing relay strategy using ant colony algorithm are used to optimize the optimal path planning problem in the data transmission process, and improve the quality of power carrier communication.

Keywords: power carrier communication; channel characteristics; OFDM; ant colony algorithm

0 引 言

电力线载波技术是现代电力通信网络中不可或缺的部分。早在 20 世纪 20 年代已经开始对电力载波技术进行了初步研究,载波通信技术在 10 kV 以上的高压电力线上已经比较成熟,但在低压电网上的信息传输技术尚未得到广泛的应用,或者说还未达到完全实用的阶段^[1]。近年来,政府积极有力的推动数字化城市建设,市政基础设施对数字化的要求也日益明显。低压电力载波技术对城市化建设具有重要的意义,以其特有的优势,在城市路灯监控系统建设中有广阔的发展空间,成为数字化城市建设的有力推手^[2]。由于低压电力载波通信技术的发展起

步较晚,在技术上还有一定的缺陷,主要集中在通信过程中的可靠性方面,因此将对提高低压电力载波通信技术的可靠性方面问题进行深入分析研究。

1 路灯监控系统结构

利用现有的路灯电力线进行载波通信,由于载波信号不能有效穿越变压器,则路灯监控系统采用分布式 3 层结构如图 1 所示,分别是监控中心、路灯集中器、路灯控制终端。路灯监控系统采用 GPRS 与低压电力载波相结合的两级通信方式^[3],在准用变压器处通过路灯集中器中转信号。集中器与监控中心采用 GPRS 远程通信,利用 GPRS 网络实现对城市大范围覆盖;集中器与路灯控制终端采用

电力线载波通信实现对每盏路灯的控制和故障检测^[4]。可以有效解决人工巡查带来的不安全因素和大量工作,而

且可以准确的监控路灯,以及根据要求设定路灯运行状态,并对系统通讯受阻、路灯故障等有相应的报警处理能力^[5]。

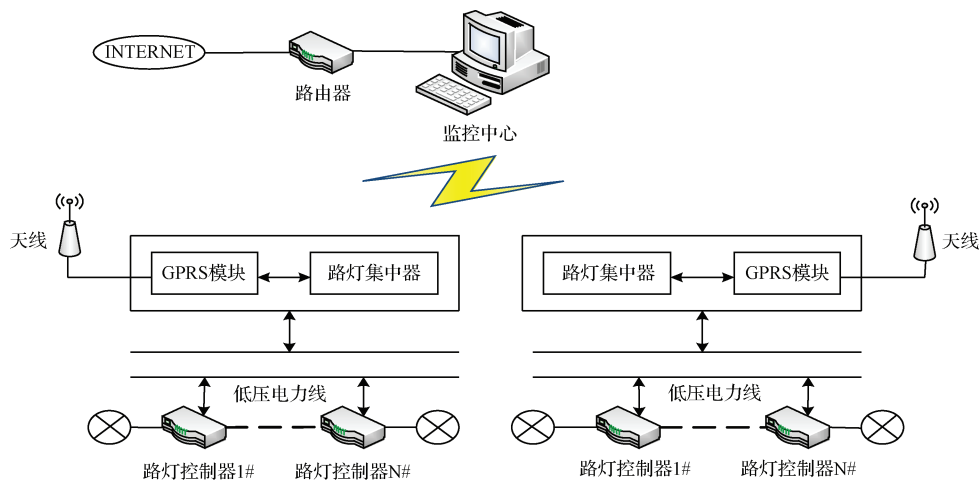


图1 路灯控制系统总体结构

2 低压电力线信道特性研究

低压电力线是非均匀分布的传输线,信道传输特性是影响载波通信的关键。在低压电力线上的负载接入或退出会使阻抗不匹配导致高频载波信号产生衰减^[6]。对低压电力线在100 m以内和20 MHz频率下的传输衰减一般不低于60 dB。实验表明,信号的衰减与传输距离有关,在城市250 m大约20 dB,在郊区250 m能达到25 dB的衰减。一般情况下随着频率的增加,信号衰减也增加,在一些频段由于传输效应、谐振、反射等因素,衰减会剧烈变化。在实际应用中需对低压电力线的信道构造模型进行研究。低压电力线信道模型如图2所示。

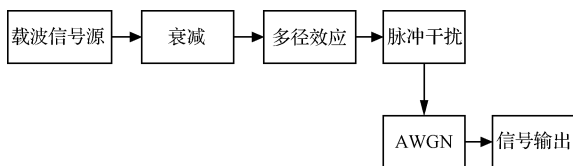


图2 低压电力线信道模型

此时,电力线上的频率相应计算公式为:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N |g_i(f)| \cdot e^{og_i(f)} \cdot e^{-(a_0+a_1 f^k) \cdot d_i} \cdot e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (1)$$

式中: $|g_i(f)| \cdot e^{og_i(f)}$ 为加权因子 $e^{-(a_0+a_1 f^k) \cdot d_i}$ 为衰落区域, $e^{-j2\pi f \tau_i}$ 为延迟区域, i 为路径的实际数量, N 则为信号可以与接收机相连的路径数量, a_0 以及 a_1 表示衰减相关参数, k 为衰减因子, 而 g_i 为 i 路径的加权因子。一般情况下, 该参数被视为关于反射以及传送因子的柔和, d_i 则代表 i 路径的实际长度, τ_i 代表 i 路径的延时区域。延时参数应按式(2)计算:

$$\tau_i = d_i \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{c_0} = \frac{d_i}{V_p} \quad (2)$$

$$V_p = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = 150 \text{ m}/\mu\text{s} \quad (3)$$

为了使模型与实际效果更为贴近需对模型进行简化,以便之后的工作顺利展开,简化后可得:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i \cdot e^{-(a_0+a_1 f^k) \cdot d_i} \cdot e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (4)$$

通过对模型的研究分析可以发现,信道路径数量的增加,导致其传送环境愈发恶劣,信号衰减程度也随之增加。总体而言,低压电力线信道为一个具有频率选择性衰落的多径传输信道,电力载波信号的衰减与频率呈正比关系,随着电力载波频率的上升,信号的衰减程度也随之加剧。

3 低压电力线噪声特性研究

低压电力线屏蔽性差,载波通信的信号易受噪声干扰影响。低压电力线信道上的噪声分为5类:有色背景噪声、窄带噪声、异步与工频的周期性脉冲噪声、同步与工频的周期性脉冲噪声、随机脉冲噪声^[7]。

有色背景噪声的功率谱密度较低变化缓慢,是一个平稳随机过程,可以用一组高斯白噪声经过自回归来模拟,模型如图3所示。

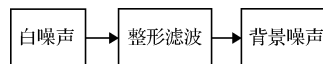


图3 有色背景噪声模型

窄带噪声主要来自城市中短波广播,波形的幅值通常在-40~85 dB之间,可以通过 N 个正弦信号的叠加来模拟窄带噪声,如式(5)所示。

$$N_{\text{narrow}}(t) = \sum_{i=1}^N A_i(t) \cdot \sin n(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (5)$$

式中: $A_i(t)$ 、 f_i 、 φ_i 分别为波形的幅值,频率和相位,波形的相位在 $0 \sim 2\pi$ 之间。

脉冲噪声的形式同正弦波以及衰减正弦波叠加之后的形式基本类似。可利用呈指数规律衰减的正弦信号代表单体脉冲,具体表达式如式(6)所示。

$$N_{imp} = Ae^{-t/\tau} \sin(2\pi ft + \varphi) \quad (6)$$

与工频同步的周期脉冲噪声,脉冲的重复频率为工频的整数倍,具有时变性强、持续时间短等特点。

与工频异步的周期脉冲噪声,功率谱线呈离散状态,脉冲重复频率范围为 50~200 Hz,同背景噪声相比脉冲干扰所形成的幅度差别达到 10~40 dB。

随机脉冲噪声,持续时间短,幅度大。可通过采用马尔可夫模型,将噪声状况的 m 个状态 $Z_i = (i=1, 2, \dots, m)$ 分为 A、B 两种情况, A 中 i 的取值为 $i=1, 2, \dots, n$ 。B 中 i 的取值范围为 $i=n+1, n+2, \dots, m$ 。则输出的函数表示为:

$$\Phi(k) = \Phi(Z(k) = z_i) = \begin{cases} 0, & i \in A \\ 1, & i \in B \end{cases} \quad (7)$$

A 表示无脉冲状况, B 表示有脉冲状况。实际应用中将转移状态引入当中实现整合,利用 A、B 建设呈独立状态的转移状态矩阵,同时借助矩阵状况的转化以表示用以模拟随机噪声的模型。

4 电力线载波通信可靠性的提高方式

4.1 调制方式

为提高城市路灯监控系统中电力线载波通信数据传输的可靠性,必须对电力线信道特性分析研究。高效可靠

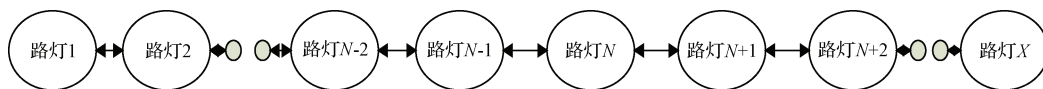


图4 单灯接力式中继

4.3 蚁群算法

将蚁群算法引入电力载波通信网络路由中,利用蚁群算法的寻优特性^[10],不断优化从源节点到目的节点搜索数据帧的路由路径,最终找到一条最优路径并存储到路由表中。蚁群算法流程如图5所示,具体实现步骤如下:

1) 令迭代次数为 n , 每次迭代的数量为 m , 信息启发因子 α , 期望启发因子 β , 初始化信息素表、禁忌表, 令初始时刻 $\Delta\tau_{ij}^k(0) = 0$, 起始路灯节点 S 和目标路灯节点 E 。

2) 当 $q \leq q_0$ 时, 根据式(8)选择下一个路灯节点; 否则, 根据式(9)搜索下一路灯节点, 并修改禁忌表。

$$u = \begin{cases} \arg \max_{s \in allowed_k} \{ [\tau_{is}(t)]^\alpha [\eta_{is}(t)]^\beta \}, & q \leq q_0 \\ \text{按式(9)搜索下一节点}, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{s \in allowed_k} [\tau_{is}(t)]^\alpha [\eta_{is}(t)]^\beta}, & j \in allowed_k \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (9)$$

的调制编码技术是高速电力载波通信的关键,国外对电力载波通信中的各种调制技术应用进行了大量的研究和测试^[8]。现在主流的调制技术主要有针对窄带通信所采用的 ASK、PSK、FSK 和扩频技术,以及针对宽带开发的 OFDM 技术。通过采用 OFDM 技术大大提高了低压电力载波通信技术的抗干扰能力,从而提高城市路灯监控系统通信的可靠性,但是载波信号在电力线上传输过程中产生的信号衰减问题仍然难以克服并且传输距离受限,这就需要采用路由中继来弥补这方面的不足,以扩大电力载波信号的传输范围。

4.2 路由中继策略

城市路灯监控系统中电力线载波通信信道是一个具有频率选择性衰落的多径传输信道,载波通信距离在 200~1 000 m,通过采用单灯接力式中继方案可以达到远距离通信从而实现路灯的单灯控制^[9]。中继方案如图4所示,每个路灯相当于1个中继,城市路灯之间的距离一般在 30~50 m 左右。单灯接力式中继方案虽解决了传输距离的问题,可以实现对一个变压器处路灯集中器下所有路灯的数据采集与控制,但每盏灯都承担信号中继会导致通信速度较慢,特别当线路中某一路灯节损坏将导致整条线路通信中断。为此通过采用蚁群算法使通信网络实现自动中继路由不仅有效地扩展电力线通信距离,而且减少了通信时间提高电力线通信的可靠性。

式中: u 表示在路灯节点 i 搜索的下一个节点; $q \in (0, 1)$, $q_0 (0 < q_0 < 1)$ 是状态转移因子; $allowed_k$ 表示在当前节点处可选择的下一节点; $p_{ij}^k(t)$ 表示在 t 时刻蚂蚁 k 由节点 i 转移到节点 j 的概率; $\tau_{ij}(t)$ 表示 t 时刻时路径 (i, j) 之间信息素浓度; $\eta_{ij}(t)$ 取节点 i 和 j 之间距离的倒数。

3) 如果 k 未到达目标节点, 返回 2)。

4) 当找到目标节点或没有可选节点时, 蚂蚁搜索过程将结束。找到目标节点时计算路径长度, 与当前最优路径长度作比较, 如果其小于则替换, 大于则仍采用当前最优路径。如果没有可选节点, 则启动下一只蚂蚁继续搜索, 假如没有完成搜索返回 2), 否则, 进行 5)。

5) 当一次迭代中的所有蚂蚁完成搜索后, 选择当前最优路径, 通过式(10)对信息素进行更新, 接着判断迭代次数是否到达 n 次, 如果没有, 则转 2) 否则转至 6)。

$$\begin{aligned} \tau(i, j) &= (1 - \rho) \times \tau(i, j) + \Delta\tau(i, j) \\ \Delta\tau(i, j) &= \begin{cases} \frac{Q}{L_{best}}, & (i, j) \in \text{本次迭代最优路径} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

$\rho(0 < \rho < 1)$ 表示信息素的挥发因子, $\Delta\tau(i, j)$ 表示路径中 i 和 j 上信息素的增量, Q 为信息素增加强度系数, L_{best} 为迭代的最优路径长度。

6) 完成 n 次迭代, 在找到最优收敛路径后, 更新路灯集中器的路由表。

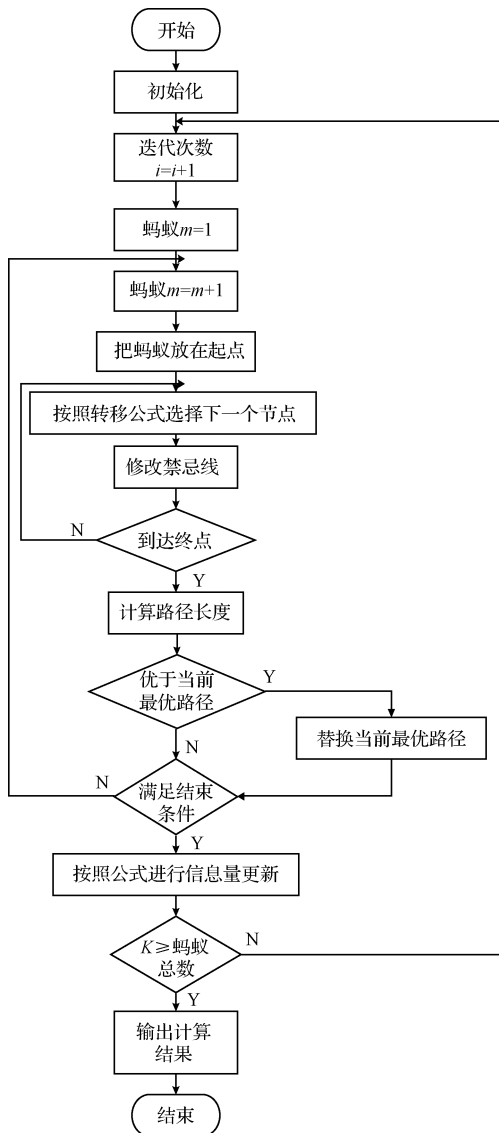


图5 蚁群算法流程

5 实验验证

在低压电力载波通信实验中, 其中主动载波模块通过 RS232 与计算机的串口连接, 被动载波模块与低压电力线通信, 每次发送固定的数据, 然后主控方的载波模块将被动方的载波模块发送的数据通过 RS232 接口送给计算机, 同时将每次数据通信时所计算所得到的平均信道参数也送至计算机。电力载波通信实验如图 6 所示, 其通信效果和信道参数测试结果如表 1 所示。

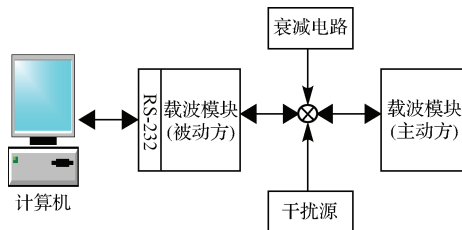


图6 电力载波实验方法

表1 测试结果

测试次数	信道环境	平均信道参数
100	短距离直接通信	F2H
100	加入衰减	63H
100	加入干扰	B6H
100	衰减前加入干扰	31H
20	衰减后加入干扰	通信成功

6 结论

首先对路灯监控系统各部分作以简单介绍, 路灯单灯智能控制的难点在电力载波通信上, 应用低压电力载波通信技术可以减少成本但具有一定的复杂性, 针对电力线信道特性进行分析与建模, 为提高电力载波通信的可靠性和实时性通过采用 OFDM 技术和蚁群算法的路由中继方案, 并通过实验验证低压电力线作为通信介质具有一定的可靠性, 使的电力载波通信在城市路灯监控中具有良好的市场应用前景。

参考文献

- [1] WANG ZH, CAO M, LI CH, et al. Design and application research of WPLC cross zone area data acquisition system[J]. Journal of Computers, 2013, 25(7): 186-191.
- [2] 王卫国. 宽带电力载波通信在配网的应用[J]. 农村电工, 2013, 23(11): 162-167.
- [3] 徐超群, 高明煜. 低压电力载波通信技术在城市路灯远程智能监控中的应用[J]. 电讯技术, 2006, 34(6): 69-73.
- [4] 唐桂忠, 张广明, 赵亚琴, 等. 城市路灯饰灯远程智能监控系统的设计与实现[J]. 测控技术, 2004, 23(8): 36-37.
- [5] 陈兵, 蒋艳彬. 单灯控制器的设计与实现[J]. 仪器仪表用户, 2013, 29(4): 320-325.
- [6] 王修岩, 王锦林, 林家泉, 等. 助航灯光系统电力载波通信特性仿真研究[J]. 中国民航大学学报, 2012, 21(2): 189-196.
- [7] 史革, 王玉梅, 李平, 等. 采用余弦调制滤波器组泄漏检信号处理研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(12): 2850-2856.
- [8] 力智, 胡学龙. 单载波与多载波调制系统中调制识别算法研究[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(11): 73-75.

- [9] 刘木清,周小丽.照明自动控制技术[J].电器时代,2008,12(1):111-112.
- [10] 严中毅,李凯.测量仪器与现代微电子、计算机和软件技术的融合[J].电子测量与仪器学报,2015,29(5):632-637.

作者简介

汪坤,1990年出生,在读硕士研究生,主要研究方向

为控制理论与控制工程。

E-mail:963931778@qq.com

毕雪芹,副教授,硕士生导师,主要研究方向为电源与变频技术、动态测试与智能系统、测控技术与传感器。

张立广,副教授,硕士生导师,主要研究方向为计算机控制系统、综合自动化系统、智能控制系统。

(上接第41页)

参考文献

- [1] 刘伟.高速信号非理想传输的信号完整性研究[D].湖南:国防科技大学,2013.
- [2] 李庆和.射频同轴电缆特性阻抗的辨析[J].光纤与电缆及其应用技术,2017(1):1-4.
- [3] 赵志超.高速差分传输线模型的分析与设计[D].西安:西安电子科技大学,2012.
- [4] 蔡先军.信号完整性分析在高速信号处理机中的应用研究[D].黑龙江:哈尔滨工业大学,2010.
- [5] JOEL P D.微波器件测量手册[M].北京:电子工业出版社,2014.
- [6] 金晶晶.基于等效伪差分的特性阻抗测试技术与实现[D].成都:电子科技大学,2012.
- [7] 刘丽,张晓辉.矢量网络分析仪时域功能及应用[J].

中国测试,2012,38(2):49-51.

- [8] 艾慧,谭阳红,何怡刚,等.自动调谐系统阻抗匹配网络解析法[J].电子测量与仪器学报,2016,30(2):283-290.
- [9] 江岩,吕朋尧.基于矢量网络分析仪的材料反射率测试方法研究[J].国外电子测量技术,2013(32):19-22.
- [10] 朱江森,曲玲玲,缪京元,等.基于TDR的特性阻抗测量的数据处理[J].电子测量技术,2015,38(12):116-120.

作者简介

刘丹,大学本科,高级工程师,主要研究方向为微波测试仪器与测试技术。

E-mail:349030719@qq.com