DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)02-0085-04.

面向信号稀疏表示的电力隧道通信自动化覆盖技术

汤 奕，王婷婷，焦 点，于红丽

(北京电力经济技术研究院有限公司,北京 100055)

摘 要: 在进行电力隧道通信网络自动化覆盖时,电力隧道内部电磁会影响通信信号质量,增加通信节点能量消耗,降低通信网络寿命,为此提出面向信号稀疏表示的电力隧道通信自动化覆盖技术。基于电力隧道通信影响因素分析结果对通信信号稀疏重构,增加通信信号质量,缩减通信节点消耗;然后通过信号重构结果,构建以全面覆盖为目标的隧道通信网络覆盖规划模型,最后采用蝙蝠算法展开求解,实现电力隧道的通信自动化覆盖。实验结果表明,利用该方法开展通信自动化覆盖时,覆盖效果较好、性能较高。

关键词: 信号稀疏表示;电力隧道;通信网络;自动化;覆盖方法

中图分类号:TP393.071 文献标识码:A 文章编号:1003-7241(2025)02-0085-04

Automatic Coverage Technology of Power Tunnel Communication Oriented to Signal Sparse Representation

TANG Yi, WANG Ting-ting, JIAO Dian, YU Hong-li

(Beijing Electric Power Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 100055 China)

Abstract: During the automatic coverage of power tunnel communication network, the electromagnetic field inside the power tunnel affects the quality of communication signals, increases the energy consumption of communication nodes, and reduces the life of the communication network. Therefore, the power tunnel communication automatic coverage technology oriented to signal sparse representation is proposed. Based on the analysis results of influencing factors of power tunnel communication, sparse reconstruction of communication signals can increase the quality of communication signals and reduce the consumption of communication nodes. Then, based on the signal reconstruction results, a tunnel communication network coverage planning model with full coverage as the goal is constructed. Finally, the bat algorithm is used to solve the problem to achieve the automatic coverage of power tunnel communication. The experimental results show that the coverage effect is good and the performance is high when using this method to carry out communication automation coverage.

Keywords: signal sparse representation; power tunnel; communication network; automation; coverage method

0 引言

电力系统是保证各个领域的基本设施,发挥着重要的地位[1-2]。网络技术不断发展,不仅为电网安全发展奠定了良好的基础,也为未来的智能发展发挥重要作用。在电力物联网中,电力隧道是关键的一部分,对其实施必要的通信覆盖,成为国内外学者亟待研究的问题。

任少睿等人使用无人机开展通信覆盖,过程中首先基于无人机的相对稀疏情况,建立信息素图[3];通过该图像限制无人机通信覆盖时的转弯半径,保证无人机的通信灵活性、降低通信时延;最后引入锚节点,建立信息素图为导向的通信交互模型,最大限度地完成通信全域覆盖。秦运慧等人针对通信覆盖天线中方位角与下倾角关联性,将四元数作为天线指向,利用粒子群算法对四元数域的最短路径实施更新;过程中由于四元数域乘法与交换律不符,所以需要通过小移动概念进一步优化四元数的粒子群算法;最后通过优化后的粒子群算法计算天线通信路径,实现通信的自动化覆盖[4]。Bhattacharya 等人提出电力隧道结中磁阻的表面声波诱导调制,施加在磁隧道结两端的表面声波降低了平均平行电阻和反平行电阻,后者的降低幅度远大于前者。将获取的波束分为固定点与有效扫描点两类,实现区域的通信覆盖[5]。

上述方法在通信覆盖时,由于未能在基于通信信号的稀疏性表示抑制通信信号噪声,提升信号通信质量,导致上述方法通信覆盖时的覆盖效果差。为解决上述通信自动化覆盖过程中存在的问题,提出面向信号稀疏表示的电力隧道通信自动化覆盖技术。该技术的创新点是提出信号稀疏表示,在此基础上重构通信信号,保证电力隧

*基金项目:国家电网公司依托工程基建新技术研究项目(SGBJSY00JJJS2200566)

收稿日期:2023-08-07

道的自动化覆盖效果。实验表明，所研究技术能够有效节省通信节点能量，延长通信网络生命周期，提升信号的通信质量，覆盖效果较好，能够完整地对整个目标区域实现覆盖。

1 面向信号稀疏的通信信号重构方法

电力隧道在开展通信时，由于隧道内部电磁环境复杂，导致信号与干扰信号时频重叠，降低通信质量影响覆盖效果，因此在电力隧道通信自动化覆盖前，根据电力隧道通信影响因素分析结果，开展通信信号重构，从而保证电力隧道的自动化覆盖效果。

基于上述分析结果可知通信信号会遭受来自隧道内部电磁影响，因此在通信覆盖前需要利用联合字典学习方法对信号实施稀疏分解重构，增加信号的通信质量，提升隧道通信效果。

1.1 建立联合学习字典

随机在通信网络中选取若干通信信号，将其作为待稀疏分解信号训练样本，组成初始字典，通过OPM算法确定字典稀疏系数值，建立字典目标函数，过程如下式所示：

$$\begin{cases} p_i = \arg\min\limits_{p} \left\| D_{k-1} \right\|_2^2 ; s.t. \left\| p \right\|_0 \le T_0 \\ \left\| P \right\|_F^2 = \left\| D - \sum_{j=1}^{k} l_j \times q_i \right\|_2^2 = \left\| W_K - l_K \times P_k \right\|_2^2 \end{cases} \tag{1}$$

式中，p_i表示字典稀疏系数，P_k表示稀疏矩阵，T_0表示稀疏性指标，$\min\limits_{p}\|D_{k-1}\|_2^2$表示最小稀疏函数，$D$表示建立的字典，s.t.表示约束条件，$l_K$表示字典的$K$列目标原子，$W_K$表示约束误差矩阵，$\|P\|_F^2$表示获取的目标函数，$q_i$表示待分解信号。

基于上述目标函数，建立具备不同特征的过完备子字典，通过联合算法创建联合字典[6]，开展信号稀疏分解重构。

设定通信信号的复合信号为$q=q_1+q_2$形式，以此建立联合字典，流程如下：

(1) 通过设定的复合信号，建立不同信号特征成分字典Z_α、Z_β，过程如下式所示：

$$\begin{cases} Z_\alpha = \left\{ \alpha_i, i \in \Gamma_1 \right\}, \Gamma_1 = 1,2,\cdots,m \\ Z_\beta = \left\{ \beta_j, j \in \Gamma_2 \right\}, \Gamma_2 = 1,2,\cdots,n \end{cases} \tag{2}$$

式中，Γ_1、Γ_2表示不同信号的特征集合，特征数量标记m、n，常数用i,j表述，α_i、β_j表示字典的原子数量。

(2) 建立联合字典

通过上述建立的信号特征成分字典，完成用于信号分解的联合字典的建立，表述成$D=\{Z_\alpha, Z_\beta\}=(\alpha_1\beta_1, \alpha_2\beta_2, \cdots, \alpha_i、\beta_j)$形式。

1.2 信号稀疏重构

结合建立的联合字典以及信号稀疏分解原理，建立信号在联合字典上的稀疏分解模型，过程如下式所示：

$$\min \left\| p \right\|_0 = D \times p \times q \tag{3}$$

式中，待分解信号标记q形式，信号稀疏标定成p，系数中的非零元素表述$\|p\|_0$形式。

隧道内部时频重叠通信信号的分解重构流程如下：

步骤一：在建立的联合字典中确定与待分解信号匹配的字典原子[7]；

步骤二：由于字典是根据信号特征成分建立的，因此需要根据OMP算法计算重叠信号的稀疏标定形式，完成信号稀疏分解，结果如下式所示：

$$q_{xs} = \sum_{i=1}^{m-1} \left\langle \alpha_i, R_i \right\rangle \alpha_i + \sum_{j=0}^{k-1} \left\langle \beta_j, R_i \right\rangle \beta_j \tag{4}$$

式中，R_1表示信号残差，q_{xs}表示稀疏结果；

步骤三：最后根据待分解信号的稀疏结果，获取信号稀疏表述形式，实现信号的重构，抑制隧道内部电磁带来的影响，提升通信质量。

2 电力隧道通信自动化覆盖

基于优化后的通信信号，建立电力隧道深度覆盖系统，并将电力传输频率设定在230 MHz，以此构建以全面覆盖为目标的隧道通信网络覆盖规划模型，通过蝙蝠算法对其展开求解，实现电力隧道的通信自动化覆盖。

2.1 建立覆盖规划模型

为了满足电力隧道内通讯专用网的要求，采用便携式无线装置构建了一种不同类型的蜂窝式网络，确保在复杂条件下对隧道内的通讯进行有效覆盖。

结合电力隧道内部实际情况对隧道内部通信重要程度实施区域划分，充分考量各个区域覆盖以及辐射量需求，建立适应度函数，实施区域的重要程度匹配。设定隧道内部业务终端数量为T_{cov}，隧道通信网络覆盖适应度值建立过程如下式所示：

$$G_{fgl} = \frac{T_{\cov}}{T_{all}} \times 100\% \tag{5}$$

式中，T_{all}表示隧道内部所有区域需要覆盖的终端总数量。基于上述适应度值计算结果可知，该值越趋近于100，说明隧道的通信覆盖效果越好。

由于电力隧道中通信接入点AP能耗消耗较低，所以接入点设备成本与功耗之间的适应度值如下式所示[8]：

$$G_{jsnh} = \frac{A_{P\,jrd}}{A_{P\max}} \times 100\% \tag{6}$$

式中，A_{Pjrd}表示通信覆盖时部署的接入点数量，A_{Pmax}表示安装时的最大接入点数量。

由于隧道通信时会产生大量辐射与电缆产生的电磁互相干扰[9-11]，因此需要根据通信辐射水平优化适应度函数，并结合上述建立的各项适应度函数，构建综合的目标

函数，过程如下式所示：

$$\begin{cases} G_{fs}=\dfrac{\zeta_{mid}}{\zeta_{\max-mid}}\times 100\% \\ G_{zh}=\sum_{i=1}^{G_{fgl},G_{jsnh},G_{fs}}\omega_i \end{cases} \tag{7}$$

式中，适应度函数的权值表述ω_i形式，即为隧道通信覆盖时覆盖率、设备成本以及辐射的重要程度。最后根据获取的适应度函数，完成通信覆盖规划模型的建立[12-13]。假设$Q_{AP_{\max}}$表示通信接入点的AP发射最大功率值，模型表述形式如下式所示：

$$\begin{cases} \max G_{zh}=\sum_{i=1}^{G_{fgl},G_{jsnh},G_{fs}}\omega_i G_i \\ s.t.\dfrac{Q_{AP_{\max}}-Q_{AP_{\min}}}{Q_{AP_{\min}}}\le 1\% \end{cases} \tag{8}$$

式中，$Q_{AP_{\min}}$表示最小功率值，s.t.表示约束条件。

2.2 模型求解

电力隧道通信覆盖规划模型建立完成后，通过蝙蝠算法对模型展开求解，实现电力隧道的通信自动化覆盖。

蝙蝠算法是以群体智能为基础，求解最优化问题的启发式搜索算法。该算法采用迭代方式将一系列的随机问题作为初值，寻找最优解，并利用最优解附近的随机飞行生成新的解，从而增强了局部的搜索能力。假定蝙蝠遇到目标后，超声波反射给其他蝙蝠，其他蝙蝠通过接收的声波计算二者之间距离。设定蝙蝠移动速度为V_i，当前位置标定X_{i0}，寻优时的振动频率标定h，响度标记O_0，波长描述成η，以此获取蝙蝠寻优时的数学表述形式，结果如下式所示：

$$\begin{cases} h_i=h_{\min}+\left(h_{\max}-h_{\min}\right)\iota \\ V_i^t=V_i^{t-1}+\left(X_i^{t-1}-X^*\right)h_i \\ X_i^t=X_i^{t-1}+V_i^t \end{cases} \tag{9}$$

式中，模型寻优范围[0,1]内的随机向量描述ι形式，蝙蝠i在t时刻的位置标记X_i^t，移动速度描述V_i^t，当前时刻模型最优解标记X^*。根据上述获取的蝙蝠寻优问题表示形式，对蝙蝠实施交叉、变异处理。假设s_i^{t+1}表示靠近目标后发射速率，基于处理结果对更新蝙蝠位置等参数，通过更新结果，获取模型最优解，实现电力隧道的自动化覆盖，结果如下式所示：

$$\begin{cases} X_{new}(i)=X_{old}+\mu O^t \\ O_i^{t+1}=\sigma O_i^t,\sigma\in[0,1] \\ s_i^{t+1}=s_i^0\left(1-e^{-\varsigma t}\right),\varsigma>0 \\ f(x)=X_{new}(i)\dfrac{O_i^{t+1}}{s_i^{t+1}} \end{cases} \tag{10}$$

式中，μ、σ表示寻优范围，O^t表示蝙蝠当前时刻平均响应度，O_i^t表示降低响应，$f(x)$表示模型最优解。

最后通过计算出的模型最优解，完成电力隧道最佳通信覆盖规划方案，实现电力隧道的自动化覆盖。

3 实验结果及分析

为了验证面向信号稀疏表示的电力隧道通信自动化覆盖技术的整体有效性，设计实验同时进行分析。为保障实验的公平性，在相同实验背景下，分别将所提面向信号稀疏表示的电力隧道通信自动化覆盖技术设置为方法1、使用无人机开展通信覆盖方法设置为方法2、利用粒子群算法的移动通信网络覆盖技术设置为方法3，利用三种方法进行测试。

为了更好地验证所提方法在隧道通信覆盖时的有效性以及稳定性，结合Matlab7平台，设置通道区域范围为25 m×50 m，传感器节点数目为400个，探测范围为5 m，通信带宽为1 bps，采样周期为10 s，以此为基础开展上述3种覆盖算法的覆盖性能测试，隧道通信网络初始化结构如图1所示。

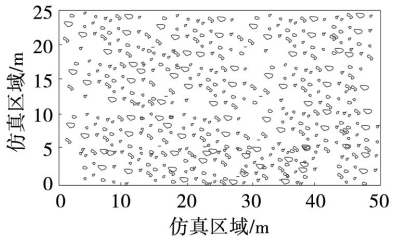


图1 隧道通信网络初始化结构图

(1) 通信能耗测试

开展通信覆盖时，将方法1与方法2、方法3对比，测试通信覆盖后，不同方法的通信能量消耗，测试结果如图2所示。

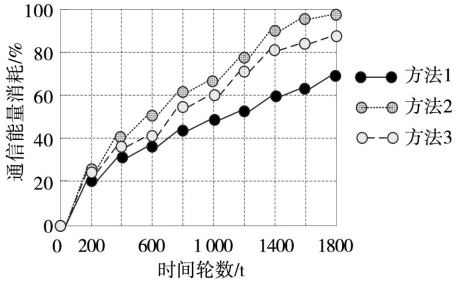


图2 不同方法的通信能量消耗测试结果

分析图2可知，三种覆盖方法在运算前期，通信能量消耗较为接近，并无明显差别。但是随着时间的不断推进，方法1的通信能量消耗要低于方法2、方法3，这是因为方法2主要靠传感器节点的能耗的大量消耗，来完成对目标区域的覆盖；而方法3通过不断感知通信信息确定其他覆盖节点，从而消耗了大量的能量。上述3种覆盖方法在时间轮数1 400时，测试出的能耗分别为60.81%、80.43%、90.18%；整个时间轮数周期内，方法1测试结果要平均低

于24.5%，且所提算法能够在后续时间趋近稳定，有效节省通信节点能量，延长通信网络生命周期。

(2) 覆盖效果测试

在进行电力隧道通信覆盖时，认定覆盖率为99%时目标区域完全覆盖，实验数据为1 800次仿真数据平均值，以此测试方法1与方法2、方法3的通信覆盖程度，得到结果如图3所示。

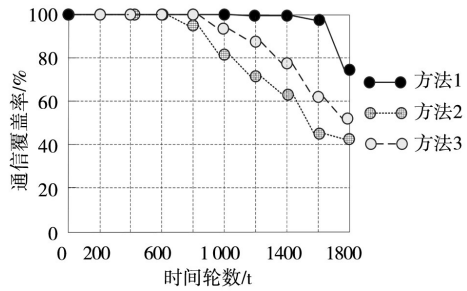
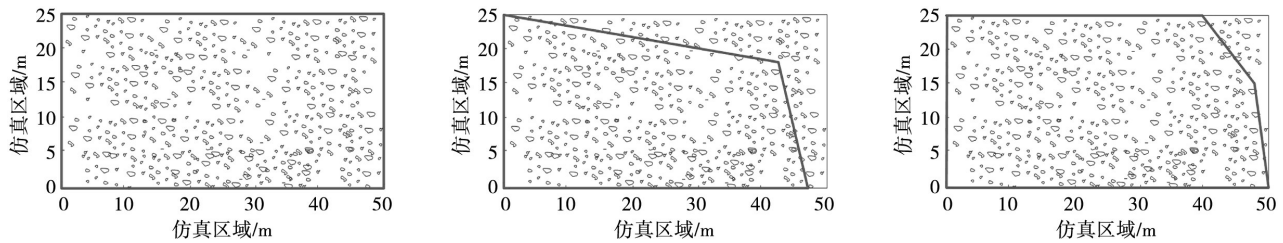


图3 不同方法的通信覆盖效率测试结果

在测试初期，三种覆盖方法测试出的覆盖率相当。但是随着时间的推移，三种覆盖方法测试出的覆盖率均出现了下降趋势。方法2在完成首次覆盖后，通信节点消耗能量与其他节点大致相近，这时消耗的是通信网络整体节点能量，但是随着时间的不断增加，整个网络覆盖率会快速下降；方法3则通过节点的不间断覆盖，增加了目标区域的整体覆盖时间，但是这样会急速地消耗通信节点能量，从而影响通信网络生命周期。方法1由于在通信覆盖前，对通信信号实施了稀疏重构，提升了信号的通信质量，因此该方法在通信覆盖时，覆盖效果优秀。

基于上述覆盖效率测试结果，对三种方法进行实际应用，测试三种方法的覆盖效果，测试结果如图4所示。

分析图4可知，利用方法1与方法2、方法3开展电力隧道通信覆盖时，方法1测试出覆盖效果较好，能够完整地对整个目标区域实现覆盖，而其余两种方法测试结果低于方法1，证明面向信号稀疏表示的电力隧道通信自动化覆盖技术在通信覆盖时，覆盖性能好。



(a) 方法1 (b) 方法2 (c) 方法3

图4 不同方法的覆盖效果测试结果

4 结束语

电力隧道建设数量逐渐增加，电力隧道的通信覆盖变得尤为重要，文章提出面向信号稀疏表示的电力隧道通信自动化覆盖技术。该方法基于隧道内部影响因素分析结果，对通信信号稀疏重构，增加通信信号质量；并根据信号的稀疏重构结果建立电力隧道的通信覆盖规划模型，通过模型求解结果，取得最佳解，实现电力隧道的通信自动化覆盖。

参考文献：

[1] 张建华，王宏伟，陈培新，等.杭州地铁4号线盾构下穿电力隧道直接切桩沉降分析[J].工程力学，2022，39(1)：144-152.

[2] 白雪杰，郭雷岗，姜丽鸽.物联网技术在智能电网中的应用研究[J].物联网技术，2022，12(3)：83-85，88.

[3] 任少睿，陆忠梅，石远明，等.一种基于信息素图的无人机高效通信覆盖方法[J].航空学报，2022，43(2)：337-351.

[4] 秦运慧，皇甫伟，隆克平.面向移动通信网络覆盖的四元数域粒子群优化算法[J].北京邮电大学学报，2020，43(4)：21-26.

[5] Bhattacharya D，Sheng P，Abeed M A，et al.Surface acoustic wave induced modulation of tunneling magnetoresis-tance in magnetic tunnel junctions[J].Journal of Applied Physics，2021，130(3)：1-6.

[6] 冯克涛，李晓毅，曲晨，等.基于DEM的民航地空VHF通信有效覆盖仿真研究[J].系统工程与电子技术，2022，44(2)：684-695.

[7] 黄昊，马耀宇.泄漏同轴电缆在电力隧道应急通信中的应用研究[J].电工技术，2021，4(11)：15-24.

[8] 苟杨，田野，徐忠林，等.基于Mesh技术的电力隧道应急抢险可视化通讯网络构建及应用研究[J].现代隧道技术，2021，58(1)：566-574.

[9] 刘碧琦，李云鹏，白亮，等.有线通信技术在电力隧道监控系统中的应用[J].现代工业经济和信息化，2021，11(11)：111-113.

[10] 常荣，杨传旭.基于图像识别技术的变电站二次保护状态检测方法[J].自动化技术与应用，2024，43(12)：175-177，182.

[11] 仝柯，朱良宽，王璟瑀，等.多策略融合改进北方苍鹰算法的森林冠层图像分割[J].森林工程，2024，40(5)：124-133.

[12] 彭建军.基于电力载波通信的道路照明智能控制系统设计[J].电工技术，2021，9(8)：104-108.

[13] 张士荣，郭强.混沌算法下电力滤波器定频滞环电流控制[J].计算机仿真，2021，38(9)：124-128.

作者简介：汤奕(1990-)，男，硕士，高级工程师，研究方向：电力系统通信的规划、设计研究。