



基于电力线通信的网络拓扑结构重建技术

马旭¹, 杨昉¹, 宋健¹, 李建岐², 刘伟麟²

(1.清华大学电子工程系 北京 100084; 2.国网智能电网研究院 北京 102209)

摘要: 电力线通信在智能电网中起到了愈发重要的作用。除了传输信息以外,对电力线网络自身结构的感知也是电力线通信的重要功能之一。通过将电力线网络建模为一个树型网络,同时充分利用电力线通信“通过电网”的特性,恢复电力线网络拓扑结构的能力成为可能。利用电力线网络的信道模型,通过节点之间信号的收发实现了电力线网络拓扑结构的估计。先后利用了矩阵束方法和动态重建方法,仿真结果显示,两种方法可以高概率地正确恢复网络结构,并且高精度地对电力线网络拓扑结构的细节进行恢复。

关键词: 电力线通信; 拓扑结构; 重建

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015297

Network Topology Reconstruction Based on Power Line Communication

Ma Xu¹, Yang Fang¹, Song Jian¹, Li Jianqi², Liu Weilin²

(1.Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2.State Grid Smart Grid Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: Power line communication (PLC) is playing a more and more important role in the smart grid (SG). Apart from conveying information, to reconstruct the topology of the network is also very critical. By modeling the power line network as a tree structure and making full use of the property of “through the network” of PLC signal, it is possible to get the knowledge of the topology of network. The PLC channel model was considered and the topology of PLC network was reconstructed by taking advantage of the signal of the transmitter and receiver. The algorithm of matrix pencil and dynamic network reconstruction algorithm was performed. The simulation results show that both algorithms can reconstruct the network topology accurately with a high probability.

Key words: PLC, topology, reconstruction

收稿日期: 2015-06-24; 修回日期: 2015-10-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61401248, No.61471219), 国家电网公司科技项目“基于电力线通信的能源物联网关键技术研究”(No. [2015]160)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No. 61401248, No.61471219), The Science and Technology Project of State Grid Corporation of China “Research on the Key Technologies of Energy Internet of Things Based on Power Line Communications”(No. [2015]160)

论文引用格式: 马旭, 杨昉, 宋健等. 基于电力线通信的网络拓扑结构重建技术. 电信科学, 2015297

Ma X, Yang F, Song J, et al. Network topology reconstruction based on power line communication. Telecommunications Science, 2015297

1 引言

电力线通信(power line communication, PLC), 全称电力线载波通信, 指利用高压电力线(在电力载波领域通常指 35 kV 及以上电压等级)、中压电力线(指 10 kV 电压等级)或低压配电网(380 V/220 V 用户线)作为信息传输媒介进行语音或数据传输的一种特殊通信方式。在智能电网的背景下, PLC 不仅是一个通信的手段。由于 PLC 是一个“通过电网”的技术, 可以提供有关电线、负载、开关等原件的状态信息, PLC 信号自身的特性可以用来做电网监控, 也可以发送一个激励信号, 激励信号会在电力线中传播, 并在出现故障的位置反射。后者的方法分别有时域反射计(time domain reflectometry, TDR)和使用窄带 PLC 信号确定故障和阻抗失配的基于冲击响应的方法^[1,2]。在参考文献[3]中提出的另一个方法, 考虑了从智能电表接收到的 PLC 信号的强度, 作为预测线路故障的指示。也就是说, 电力线网络需要具有“感知”功能, 实现网络的预测和报警。

本文主要研究了电力线网络的拓扑结构感知问题。基于传输线模型/信道冲击响应关系以及网络结构等底层模型, 力图克服存在干扰、需要高精度信道估计、ToA 估计以及逐层扫描重建等问题, 最终获得拓扑重构的解决方案。

2 电力线网络系统模型

2.1 网络基本模型

首先考虑电力线网络的基本模型, 模型上的节点通过电力线互相连接, 可以将电力线网络模型抽象为一个树图模型。图 1 显示了一个典型拓扑及拓扑的树图。图 1(b) 显示的树拓扑结构可以方便地定量恢复拓扑结构。拓扑树用一组边和节点来描述, 包括叶子节点和分支节点, 特别强调了两个节点之间电力线的长度, 例如, 标号 d_{ij} 表示节点 i 和

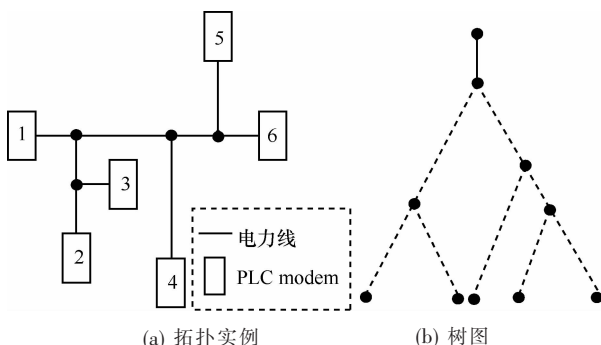


图 1 电力线网络拓扑实例及其树图

j 之间的路径距离, 这个距离的测量将成为工作的重点。

可以通过叶子节点之间的距离信息来恢复与图 1(b) 类似的拓扑结构。如果叶子节点间的距离都可被准确获得, 那么网格拓扑的重建就是可行的。为了测量外部顶点之间的距离, 节点会发射和接收 PLC 信号, 这些工作将在后文进行介绍。

2.2 信道模型

信号在电力线中传播由传播常数来决定:

$$\gamma(f) = \alpha(f) + j\beta(f) \quad (1)$$

其中, $\alpha(f)$ 和 $\beta(f)$ 分别是由频率 f 决定的衰减和传播常数。

在不连续处的传播由分支点上的反射和传输决定, 分别用反射参数 $\Gamma(f)$ 和传输系数 $T(f)$ 表示, 定义为:

$$\Gamma(f) = \frac{Z(f) - Z_0(f)}{Z(f) + Z_0(f)} \quad (2)$$

其中, $T(f) = 1 + \Gamma(f)$, $Z_0(f)$ 是传输线的特征阻抗, $Z(f)$ 是不连续处的阻抗值。

用 m 代表 PLC 信号的路径索引, $m=1$ 对应直射路径, $m>1$ 对应带有反射的信号路径。 d_m 表示第 m 条路径的距离。第 m 条路径的反射和传输参数序列可以分别表示为 $\Gamma_n^m(f), n=1, \dots, N_r(m)$ 和 $T_n^m(f), n=1, \dots, N_t(m)$, 其中 $N_r(m)$ 和 $N_t(m)$ 分别表示第 m 条路径反射和传输的数量。然后, 就可以将电力线信道的传输函数写为:

$$H(f) = \sum_{m=1}^{\infty} \left(\prod_{n=1}^{N_r(m)} \Gamma_n^m(f) \right) \left(\prod_{n=1}^{N_t(m)} T_n^m(f) \right) e^{-d_m \gamma(f)} = \sum_{m=1}^{\infty} A_m(f) e^{-d_m \gamma(f)} \quad (3)$$

在式(3)中为了简洁, 将第 m 条路径反射的反射参数和传输参数整合为 $A_m(f)$ 。

为了将参量 ToA 的估计方法公式化, 需要调用如下关于传播模型的假设。

首先, 线性假设, 即:

$$\alpha(f) = \alpha \cdot f, \beta(f) = \frac{2\pi}{v_p} f \quad (4)$$

这些近似与低损耗模型很相配, 也在小频率波动 ($f_{\min} \leq f \leq f_{\max}$) 范围内严格地符合要求。其次, 在频段中将参数 $A_m(f)$ 近似为常量用于测距, 这个近似对于小信号频段 $f_{\max} - f_{\min}$ 严格相符。再次, 将路径数截短为 N_p 。将这些近似应用于式(3), 得到:

$$H(f) = \sum_{m=1}^{N_p} A_m e^{-\alpha d_m f} e^{-j \frac{2\pi}{v_p} d_m f} \quad (5)$$



3 电力网络拓扑感知的方法

3.1 基于 ToA 的测距

基于式(5),提出新的基于模型的 ToA 估计方法。OFDM 传输应用广泛且被 PLC 标准化组织广泛采纳^[4],可以分别在频率点 $f_k = f_{\min} + k\Delta f, k=0, 1, \dots, N_f-1$ 测量时移传输函数 $H(f)e^{j2\pi(t_w - t_r)f}$ 的样本 $H_k = H(f_k)e^{j2\pi(t_w - t_r)f_k}$, 其中, $N_f = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{\Delta f} + 1$ 。旋转的部分产生于 OFDM 符号的传输时间 t_T 和接收端对于 OFDM 符号的观察窗开始的时间 t_w 之间的差异。第 m 条路径的信号传播时间 $t_m = d_m/v_p$, 样本可以写成:

$$H_k = \sum_{m=1}^{N_p} A_m e^{-\left(a + j\frac{2\pi}{v_p}\right)d_m f_{\min}} e^{-(ad_m + j2\pi(t_m + t_r - t_w))\Delta f k} = \sum_{m=1}^{N_p} B_m z_m^k \quad (6)$$

其中, 定义 $B_m = A_m e^{-\left(a + j\frac{2\pi}{v_p}\right)d_m f_{\min}}$ 以及复指数 $z_m = e^{-(ad_m + j2\pi(t_m + t_r - t_w))\Delta f}$ 。

发送信号的 ToA 是 $t_1 + t_T$, 因此, 基于式(6)估计 ToA 的问题就可以认为是一个叠加指数信号的参数估计问题。目前解决这一问题的很多方法已经被提出, 包括最大似然^[5]、基于线性预测方法^[6,7]、子空间方法^[8]以及矩阵束方法^[9]。下面给出了采用矩阵束方法的解决方案。

定义:

$$x(t) = [H_t, H_{t+1}, \dots, H_{N-L+t-1}]^T \quad (7)$$

构造矩阵:

$$X_0 = [x_{1-L}, x_{1-2}, \dots, x_0] \quad (8)$$

$$X_1 = [x_L, x_{L+1}, \dots, x_1] \quad (9)$$

其中, L 被称作矩阵束参数。

根据 H 的定义, 可以得到:

$$X_0 = Z_L B Z_R \quad (10)$$

$$X_1 = Z_L B Z Z_R \quad (11)$$

其中:

$$Z_L = \begin{pmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ z_1 & \cdots & z_M \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{N-L-1} & \cdots & z_M^{N-L-1} \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$B = \text{diag}\{b_1, b_2, \dots, b_M\} \quad (13)$$

$$Z_R = \begin{pmatrix} z_1^{L-1} & z_1^{L-2} & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_M^{L-1} & z_M^{L-2} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$Z = \text{diag}\{z_1, z_2, \dots, z_M\} \quad (15)$$

注意到: $X_1 - zX_0 = Z_L B (Z - zI_M) Z_R$, 其中, 未知变量为 z , 其他为已知量。当且仅当 z 为矩阵 Z 的特征值, 即 $z \in \{z_1, z_2, \dots, z_M\}$ 时, 矩阵 $X_1 - zX_0$ 发生降秩, 即当且仅当 z 为矩阵 Z 的特征值时, 存在向量 q , 使得 $(X_1 - zX_0)q = 0$, 也即 $X_1 q = zX_0$ 。两边同时乘以 X_0^+ , 可以得到:

$$X_0^+ X_1 q = z X_0^+ X_0 q = z q \quad (16)$$

这就是说, $\{z_i; i=1, 2, \dots, M\}$ 是矩阵 $X_0^+ X_1$ 的特征值, 因此, 可以通过构造矩阵 $X_0^+ X_1$ 进而求得其特征值来获得 $\{z_i; i=1, 2, \dots, M\}$ 的估计。同理, 也可以推出 $X_0^+ X_1$ 有 M 个取自于 $\{z_i; i=1, 2, \dots, M\}$ 的特征值和 $N-1-M$ 个零特征值, $X_0^+ X_1$ 有 M 个取自于 $\{z_i; i=1, 2, \dots, M\}$ 的特征值和 $1-M$ 个零特征值。

对于带噪声的信号, 定义 y_t, Y_0, Y_1 分别与 H_t, X_0, X_1 相对应。其中 Y_0 的伪逆 Y_0^+ 可以表示成:

$$Y_0^+ = \sum_{i=1, M} \left(\frac{1}{\sigma_{0i}} \right) v_{0i} u_{0i}^H = V_0 A^{-1} U_0^H \quad (17)$$

其中, $\{\sigma_{0i}; i=1, \dots, M\}$ 是矩阵 Y_0 最大的 M 个奇异值。 v_{0i} 和 u_{0i} 分别是相应的左右奇异向量。 $V_0 = \{v_{01}, \dots, v_{0M}\}; U_0 = \{u_{01}, \dots, u_{0M}\}; A = \text{diag}\{\sigma_{01}, \dots, \sigma_{0M}\}$ 。 Y_1^+ 也有类似的定义。

将 X_0, X_1 分别替换成 Y_0, Y_1 , 可以得到:

$$V_0 A^{-1} U_0^H Y_1 q_i = z q_i \quad (18)$$

将式(18)左乘 V_0^H 可以得到:

$$A^{-1} U_0^H Y_1 V_0 (V_0^H q_i) = z (V_0^H q_i) \quad (19)$$

因此, z 是矩阵 $A^{-1} U_0^H Y_1 V_0$ 的特征值, 可以通过计算矩阵 $A^{-1} U_0^H Y_1 V_0$ 的特征值来获得 z 的估计, 这与通过计算矩阵 $X_0^+ X_1$ 的特征值来获得 z 的估计是相同的。

3.2 网络逐层重建

应用了第 2.1 节中的树模型, 给出基于前一部分的测距算法进行网络拓扑的推断。推断的第一步是进行所有 PLC 调制解调器间距的测量。测量的距离都传输到一个集中的节点上, 如 PLC 网络上的主节点, 随后用这些距离作为输入运行一个树估计算法。为了实现动态添加或删除 PLC 网络中的节点, 提出了动态的树重建方法, 这种方法不但可以支持拓扑结构的动态改变, 还可以在节点数量较多的情况下远远超出传统的根邻接法的运算速度。

动态树重建算法的主要思路是将节点从无到有地加入节点列表中,因此从该方法的初衷来讲,可以满足当网络中出现新节点时的拓扑重建情况。而相比于传统的根邻接算法,节点列表中不仅可以出现普通的叶子节点,还可以出现连接多个其他节点的中间节点,也可以满足多叉树的情况,对于网络结构具有更高的顽健性。

该算法具体流程如下:预先设定一个根节点和一个包含两个叶子节点的叶子节点集合,叶子节点集合中存储有叶子节点相对于根节点的距离;预先设定一个输出树节点集合和输出树边集合,将电力线网络中除去根节点和两个叶子节点的其他节点组成一个待添加的节点集合;逐一将待添加的节点集合中的节点作为目标节点,并对所述目标节点进行如下操作。

(1)确定叶子节点集合中的叶子节点与目标节点向根节点延伸的交点。

(2)比较交点与根节点的距离和叶子节点集合中的叶子节点相对于根节点的距离,判断目标节点的父节点是否为根节点或叶子节点。

(3)若确定目标节点的父节点是根节点或叶子节点,则将目标节点添加到叶子节点集合中,同时更新输出树节点集合和输出树边集合,即将目标节点添加到输出树节点集合,将目标节点与目标节点的父节点组成的边添加到输出树边集合中。

(4)若确定目标节点的父节点不是根节点或叶子节点,则判断为以下 3 种情况之一:

- 目标节点非叶子节点;
- 目标节点是叶子节点,且其父节点为非根节点的已知节点;
- 目标节点是叶子节点,且其父节点非已知节点。

(5)若交点与目标节点重合,则判断目标节点非叶子节点,更新输出树节点集合和输出树边集合,即将目标节点添加到输出树节点集合;将目标节点与目标节点的父节点、目标节点与目标节点的子节点组成的两条边添加到输出树边集合,从输出树边集合中删除目标节点父节点和目标节点子节点组成的边。

(6)若交点为已知节点,则判断目标节点是叶子节点,且其父节点为非根节点的已知节点,将目标节点添加到叶子节点集合中,同时更新输出树节点集合和输出树边集合,即将目标节点添加到输出树节点集合,将目标节点及目标节点的父节点组成的边添加到输出树边集合中。

(7)若交点为未知节点,则判断目标节点是叶子节点,且其父节点非已知节点,将目标节点添加到叶子节点集合中,同时更新输出树节点集合和输出树边集合,即将目标节点和交点添加到输出树节点集合,将交点及其父节点、子节点组成的边添加到输出树边集合,从输出树边集合中删除其父节点和子节点组成的边。

需要指出的是,该方法对于每一个节点都需要多重判断,这也是考虑顽健性的同时,在一定程度上牺牲算法的效率,是该算法相比于传统根邻接法的不足之处。但一旦获得了关于网络拓扑的某些先验信息,比如网络是二叉树模型或者节点中不存在连接多个其他节点的中间节点,那么也可以在一定程度上减小算法的复杂程度。仅从两个算法表达的间接性上考虑,在节点数比较少的情况下,传统的根邻接法会稍稍优于动态树方法,但随着节点数目逐渐增加,动态树方法的优越性会逐渐体现出来,因为其算法复杂度 $O(n^2)$ 要明显优于根邻接法的复杂度 $O(n^3)$,这在节点数少时体现不出来,但节点数越大,优势越明显。

4 性能评估

4.1 基于 ToA 的测距方法比较

对于 ToA 测距的方法,给出矩阵束方法的性能。

首先给出一个典型的拥有 6 条径的电力线信道模型,见表 1。

表 1 一个典型的 6 径电力线信道模型

路径编号	长度 d/m	权重系数 g_i
1	200	0.54
2	221	0.275
3	242	-0.15
4	259	0.08
5	266	-0.03
6	530	-0.02

对获得的路径值进行取正值的筛选,路径值的最小值作为直射路径的估计,以此来考察在一定噪声水平下的直射路径估计情况。分别对 20 dB 和 10 dB 的噪声水平仿真 500 次,考察其估计直射路径的性能。结果如图 2 所示。

由图 2 可见,当信噪比为 20 dB 时,有 90% 以上的测量结果误差不超过 3 m,有大约 5% 的测量结果比较离谱,误差最大的可以达到 100 m 量级;当信噪比为 10 dB 时,

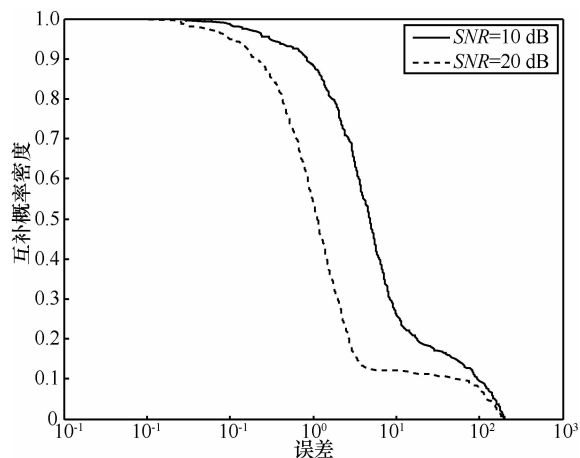


图2 信噪比为20 dB时的直射路径估计结果

有90%以上的测量结果误差可以控制在10 m的范围内,但同样也有超过100 m的误差存在。

从图2可以非常直观地看到,随着信噪比的降低,估计的性能在逐渐变弱,信噪比为10 dB时的测量精度明显低于20 dB时的测量精度,但同样也可以看到,即使是在10 dB的低信噪比情况下,也有很大的可能性获得比较精确的测量结果。

去除明显错误的测量点后,取其余正确测量点的均值,得到最终的ToA估计。当信噪比为20 dB时,估计结果为199.2;信噪比为10 dB时,估计结果为197.2。总体的结果误差在1%左右,这在电力线ToA估计上是可以接受的。总体的估计结果都偏小,这是因为在筛选数据时,无法彻底清除偏差非常大的数据的影响。

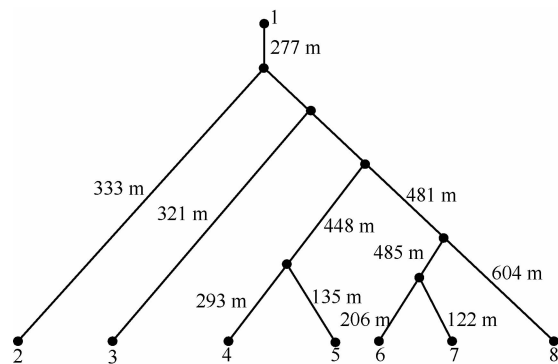
4.2 网络逐层重建方法比较

将ToA的测距结果作为输入,具体实施动态树重建算法。首先,给出原始的网络拓扑结构,如图3(a)所示,展示了有8个叶子节点的电力线网络,利用动态重建算法获得的重建拓扑网络如图3(b)所示。

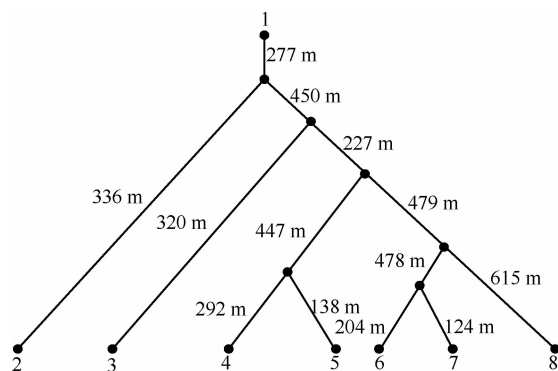
可见,使用动态重建法可以恢复出正确的网络拓扑结构。需要注意的是,正确的拓扑重建结果,指的是网络结构的正确性,而不包含节点间距的正确性。节点间距的正确性完全由ToA测距的性能决定,一旦在ToA测距中发生了严重错误,网络逐层重建注定会失败,这也是网络逐层重建所无法弥补的。但一旦通过某种方法获得了比较可信的节点间距数据,那么网络逐层重建方法则是非常可靠的。

5 结束语

本文通过对电力线网络及其信道模型的搭建,获得了



(a) 电力线网络



(b) 重建网络

图3 原始拓扑结构和动态重建法重构的拓扑结构

利用ToA进行网络拓扑结构感知的可能性。分别使用了矩阵束方法和动态重建方法对电力线网络的拓扑结构进行了恢复。仿真结果显示,两种方法可以互相辅助地实现网络拓扑的恢复,同时可以保证恢复的准确性和运算的低复杂度。

参考文献

- 1 Taylor V, Faulkner M. Line monitoring and fault location using spread spectrum on power line carrier. IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1996, 143(5): 427~434
- 2 Milioudis A N, Andreou G T, Labridis D P. Enhanced protection scheme for smart grids using power line communications techniques — Part II: location of high impedance fault position. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1631~1640
- 3 Rao R, Akella S, Guley G. Power line carrier (PLC) signal analysis of smart meters for outlier detection. Proceedings of IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Brussel, Belgique, 2011: 291~296
- 4 IEEE Std 1901TM-2010. IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications, 2010

- 5 Bresler Y, Macovski A. Exact maximum likelihood parameter estimation of superimposed exponential signals in noise. IEEE Transactions on Acoust, Speech, Signal Processing, 1986, 34(5): 1081~1089
- 6 Kumaresan R, Tufts D. Estimating the parameters of exponentially damped sinusoids and pole-zero modeling in noise. IEEE Transactions on Acoust, Speech, Signal Processing, 1982, 36(4): 833~840
- 7 Rahman M, Yu K B. Total least squares approach for frequency estimation using linear prediction. IEEE Transactions on Acoust, Speech, Signal Processing, 1987, 35(10): 1440~1454
- 8 Maravic I, Vetterli M. Sampling and reconstruction of signals with finite rate of innovation in the presence of noise. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(8): 2788~2805
- 9 Hua Y, Sarkar T. Matrix pencil method for estimating parameters of exponentially damped/undamped sinusoids in noise. IEEE Transactions on Acoust, Speech, Signal Processing, 1990, 38(5): 814~824

[作者简介]



马旭,男,清华大学博士生,主要研究方向为电力线通信、可见光通信以及无线通信的稀疏信号处理等。



杨昉,男,博士,清华大学副教授,IEEE 高级会员,主要研究方向为地面数字电视广播、电力线通信、宽带无线通信。在国内外期刊会议上发表论文 60 篇,其中 SCI 收录 21 篇,获得专利授权 26 项,合著专著 2 本。相关研究成果获得中国电子学会、中国人工智能学会、中国广播电视设备工业协会、北京市科技奖等多项奖励。



宋健,男,博士,清华大学教授、博士生导师,清华大学数字电视中心主任,国际电信联盟 6A 工作组副主席,IET Fellow,IEEE 高级会员,IEEE Transactions on Broadcasting 杂志副主编,IEEE BTS AdDom 委员兼北京分会主席,主要研究方向为数字电视传输技术和网络融合技术、无线通信、电力线通信系统、电子扫描天线等。在国内外期刊和会议上发表论文 200 多篇,完成电力线通信领域译著 1 本,合作编著数字电视中文专著 2 部,英文专著 1 部。获得中国发明专利授权 30 项,美国发明专利授权 2 项。曾获中国通信学会科学技术奖一等奖。



李建岐,男,国网智能电网研究院信息通信研究所副总工程师、教授级高级工程师,国家电网公司工程技术专家(优秀专家人才),国家电网公司信息通信领域领军人才入选专家,主要从事电力线通信、光纤通信、无线通信技术在电力系统自动化应用的研究及产品开发工作。获得 24 项实用新型专利授权,7 项发明专利授权,发表论文 40 余篇。发表专著 1 部(合著),译著 2 部(合著)。



刘伟麟,男,博士,中央组织部国家“千人计划”特聘专家,主要从事不同无线和移动通信技术(GSM、TETRA、DECT、HIPERLAN)的研究和开发工作,并代表公司参加了 TETRA 和 HIPERLAN 欧洲技术标准规范制定工作。曾在国际学术期刊和会议上发表论文 20 多篇,申请近 10 项国际专利。作为项目负责人带领 PLC 研发团队,承担了国家电网公司“千人计划”重大专项“新一代智能电力线载波通信关键技术研究”项目研究工作,开创了新一代智能电力线载波技术研究先河。