

一种电力无线通信传感网中的动态速率漂移算法

张 雷，徐大可

（南京国电南自城乡电网自动化工程有限公司，江苏 南京 211100）

摘 要：在不降低通信可靠性前提下，为提高电力无线通信传感网的网络传输速率，提出了一种动态速率漂移算法，该算法通过网络节点间数据的传输时延以及信号质量作为基本参考，预先估计节点发送所使用的调制方式，并通过误码率来矫正所使用的调制方式，经过一段时间后，将达到稳定状态，此时，传感网形成了以中心节点为圆心的不同速率传输区域。该算法充分利用不同节点与中心节点的距离和信号质量，提高了空中资源利用效率，增大了网络容量。

关键词：传感网；动态速率漂移；传输时延；信号质量；误码率

0 引言

近年来，智能电网^[1]得到了国家政府部门、国家电网公司、南方电网公司等的高度重视，在政策与资金上给予大力扶持，使得智能电网相关技术与产品得到迅速发展，其中电力设备智能在线监测^[2]、资产管理与物联辅助系统等是其中很重要的一部内容，这也给无线通信传感网^[3]带了新的机遇和挑战。目前，无线通信传感网作为私有局域网已经应用于智能在线监测与物联辅助系统当中，一定程度减少施工布线的烦恼和降低了部分成本。但是传感网中基本都是采用一种低效率的调制方式，如QPSK或BPSK，通过牺牲网络传输速率来提高通信质量。因电力设备在安装后，基本上不需要再移动的特点，即很少需要移动通信，无线网络的所有节点的信道条件和传输时延基本上变化不大，因此所有网络节点都使用相同的调制方式进行数据传输并没有充分利用空口资源。本文通过提出一种动态漂移算法，该算法将节点传输时延和信号质量为依据，以误码率为矫正量，在网络达到稳定状态后，可以有效提高网络总传输速率，同时不降低传感网络的通信可靠性。

1 电力无线通信传感网

物联网和智能电网的发展推动了电力无线通信传感网的发展和应用。传感网是物联网^[4]的感知层技术，应用于智能电网的建设中，为各种电力系统及其相关设备状态信息与控制信息提供无线传输通道，其网络拓扑示意如图 1 所示。

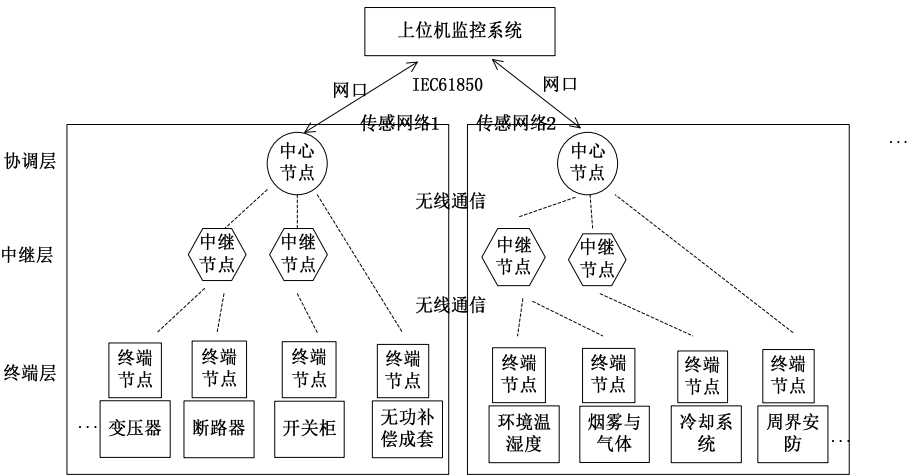


图 1 电力无线通信传感网拓扑图

在实际应用中，根据工程需要，将需要监控的设备与信息进行分类，并将其纳入到不同的传感网中，形成分布式传感网络，相邻网络间必须采用不同的信道来避免干扰。

传感网由三层组成，即协调层、中继层和终端层；每个独立的传感网中，协调层有且仅有唯一的一个节点，称中心节点，该节点负责网络的建立、维护和节点接入等功能，中继层是为了扩大网络覆盖范围，由若干中继节点组成，负责路由网络中传输的信息数据，终端层是网络的叶子结点，与感知设备、采集或控制装置结合，形成终端节点。

整个网络的数据传输过程中，中心节点负责与上位机的数据传输接口，终端节点负责与传感器或采集装置的接口。下行数据，由上位机监控系统通过网口将数据发送给中心节点，由中心节点通过中继节点将数据发送给目的终端节点；上行数据，由终端节点将状态信息采集后，通过中继节点将数据发给中心节点，然后再上发给上位机监控系统进行处理。

电力无线通信传感网络的数据传输能力和可靠性直接决定了其应用范围和应用价值。目前，绝大部分的传感网络的节点之间数据传输都采用一种低效率的调制方式进行传输，因此网络的数据传输速率也较低，这是在同等环境条件下，通过降低数据传输速率来换取误码率的降低和覆盖范围的增大。频率资源是稀缺资源，受国家管控，免许可频段少，先抛开频率以及带宽的因素的影响，调制方式固定，传输能力也基本定了。如常用于传感网物理层和介质访问控制层的IEEE802.15.4 协议^[5]，在 915MHz频率，调制方式采用BPSK时，数据传输速率为 40kb/s，在 2.4GHz频率时，调制方式采用O-QPSK，数据传输速率为 250kb/s。应用比较广泛的WirelessHART^[6]、ZigBee^[7]等传感网络技术其底层技术都是建立在IEEE802.15.4 协议上，数据传输能力也不会超过 250 kb/s。实际上，网络维护本身正常运转所需要的各种命令、消息与报文头都会增加开销，会大大降低传感网的空口资源利用效率，如ZigBee技术空口资源利用效率在[45%,65%]之间。

用式(1)描述空口资源实际承载负荷数据能力，用式(2)描述空口资源利用效率

$$v(\text{空口承载负荷数据}) = v(\text{空口资源}) - v(\text{空口开销}) \quad (1)$$

$$\eta = \frac{v(\text{空口承载负荷数据})}{v(\text{空口资源})} \quad (2)$$

其中 $v(\text{空口资源})$ 表示网络最大数据传输能力， $v(\text{空口开销})$ 表示用于维护网络正常运行所需要的开销。

从上述两个表达式可以看出，增加空口资源承载数据负荷能力和空口资源利用效率，有两种途径，要么增加网络最大数据传输能力，要么减少维护网络正常运行所需要的开销。第二种途径涉及网络协议的复杂性与完整性。本文提出的动态速率漂移算法是采用第一种途径，提高整个网络的最大数据传输能力。

2 动态速率漂移算法

2.1 传感网中的数据传输

在分布式传感网络的应用中，传感网络遵循的网络协议、频率、带宽都可能存在差异，但在实际部署时，同一传感网络中，上述因素都相同，本文的研究中针对同一传感网络，这并不影响其在分布式传感网中的应用。

因此，传感网采用了相同的符号速率，假定为 62.5ksymbol/s，那么不同的调制方式^[8]，其网络数据传输能力将会有很大的不同，如表 1 所示。

表 1 相同符号速率不同调制方式下数据传输率

调制方式	符号速率 (ksymbol/s)	数据传输率 (kb/s)
BPSK	62.5	62.5
QPSK	62.5	125
O-QPSK	62.5	250
16QAM	62.5	250

32QAM	62.5	500
64QAM	62.5	1000

一个符号上携带数据位信息越多，传输速率能力越强，但是也会更容易被噪声所干扰，其对信道质量的要求也越高。

2.2 基于传输时延和信号质量的动态速率漂移算法

该算法是对传感网通过降低调制方式来换取覆盖范围和传输可靠性的优化处理，在保证覆盖范围和传输可靠性的前提下，一定程度上提高网络的数据传输速率，预期理想效果为以网络中心节点为圆心的若干不同半径的同心圆，网络中的节点根据传输时延和信号质量分别落在不同的同心圆范围中，形成从内而外的动态速率不断降低的若干区域，如图 2 所示。

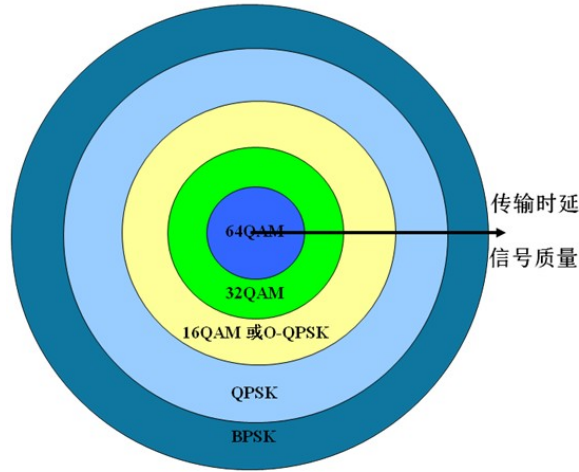


图 2 动态速率漂移算法理想效果图

信号质量用接收信号强度RSSI^[9]来表示；传输时延用节点发送数据在空中的传输时延 T_{delay} 来表示。节点间的距离D可以通过下面两个表达式估算。

$$T_{\text{delay}} = \frac{D}{c} \quad (3)$$

其中 c 为电磁波在空气中的传播速率。

$$RSSI = -(D1 + \varepsilon \lg(D)) \quad (4)$$

其中 $D1$ 在 1m 距离接受信号强度， ε 为信号路径损耗因子。

由上面两个表达式，可知RSSI和 T_{delay} 都是用来描述节点间距离的量，在不同的环境下，这两个参数所导致描述距离的精度有所差异，因此本文提出的算法综合考虑上述两个参数。

RSSI值可以通过节点从空口接收到的报文来获取，对物理层来说就是通过基带IQ数据来获取； T_{delay} 值可以通过记录发送报文时间、接受确认帧之间的时间间隔以及节点物理层处理一帧数据时间来获取。

取连续N帧数据（N为可配置的经验值）所得 T_{delay} 和RSSI求平均，使用如下表达式：

$$\overline{T_{\text{delay}}} = \frac{\sum_{k=1}^N T_{\text{delay}_k}}{N} \quad (5)$$

$$\overline{RSSI} = \frac{\sum_{k=1}^N RSSI_k}{N} \quad (6)$$

根据式(5)和式(6)可得出求值算法伪程序如下所示：

/* 初值 */

```

AVR_RSSI      = 0; /*RSSI 平均值*/
AVR_Tdelay    = 0; /*Tdelay 平均值*/
AVR_K_1_RSSI  = 0; /*前一帧 RSSI 平均值*/
AVR_K_1_Tdelay= 0; /*前一帧Tdelay平均值*/
RSSI[N]       = {0}; /*最近 N 帧 RSSI 值*/
Tdelay[N]     = {0}; /*最近N帧Tdelay值*/
index         = 0; /*当前帧保存位置*/

/* 求值算法 */
if (当前帧数 k <= N)
{
    AVR_RSSI = (AVR_K_1_RSSI * (k - 1) + RSSI_K) * 1.0 / (k + 1);
    /* RSSI_K 为当前帧获取的 RSSI 值，乘以 1.0 是为了保证浮点运算 */
    AVR_Tdelay = (AVR_K_1_Tdelay * (k - 1) + Tdelay_K) * 1.0 / (k + 1);
    /* Tdelay_K 为当前帧获取的 Tdelay 值 */
    RSSI[index] = RSSI_K;
    AVR_K_1_RSSI = RSSI_K;
    Tdelay [index] = Tdelay_K;
    AVR_K_1_Tdelay= Tdelay_K;
}
else
{
    RSSI[index] = RSSI_K;
    Tdelay [index] = Tdelay_K;
    Sum_RSSI = 0;
    Sum_Tdelay = 0;
    for(WORD16 wLoop=0; wLoop<N;)
    {
        Sum_RSSI += RSSI[wLoop];
        Sum_Tdelay += Tdelay [wLoop];
        wLoop++;
    }
    AVR_RSSI = Sum_RSSI * 1.0 / N;
    AVR_Tdelay = Sum_Tdelay * 1.0 / N;
}
index = index++ % N;

```

根据上述算法求出 \overline{RSSI} 和 $\overline{T_{delay}}$ 之后，将进一步地依据此值设计动态速率漂移算法，该算法的详细

描述如下：

首先设置不同调制方式时节点间传输时延时间区间，BPSK 传输时延区间最大，64QAM 传输时延区间最小，同时低密度星座图的调制方式，其传输时延区间包含高密度星座图的调制方式的传输时延区间，即满足

$$\begin{aligned} [T_{64QAMD}, T_{64QAMU}] &\subset \\ [T_{32QAMD}, T_{32QAMU}] &\subset \dots \subset \\ [T_{BPSKD}, T_{BPSKU}] \end{aligned}$$

其中 T_{XXD} 表示传输时延下限， T_{XXU} 表示传输时延上限，“XX”为各种调制方式。根据节点传输时延 $\overline{T_{delay}}$ 预先判断落在最小区间里面，然后再进入信号强度的相应区间进行判别。

其次，设置不同调制方式时节点接收信号强度 RSSI 的区间，BPSK 调制方式所在 RSSI 区间所需信号强度最低，64QAM 调制方式所在 RSSI 区间所需信号强度最高，不同区间仍然满足

$$\begin{aligned} [RSSI_{64QAMD}, RSSI_{64QAMU}] &\subset \\ [RSSI_{32QAMD}, RSSI_{32QAMU}] &\subset \dots \subset \\ [RSSI_{BPSKD}, RSSI_{BPSKU}] \end{aligned}$$

其中 $RSSIXXD$ 表示传输时延下限， $RSSIXXU$ 表示传输时延上限，“XX”为各种调制方式。根据节点接受信号强度 \overline{RSSI} 判断其是否确实落在与传输时延相对应的 RSSI 区间里面，如果是，则调制方式确定，否则落入下一层传输时延区间和接收信号强度区间进行再度判别，直到选择合适的调制方式。

最后，初次调制方式确认之后，后续调制方式的变化，将存在进入和退出门槛，即在区间下限之间存在浮动比例，进入时，当连续 N 帧信号强度稳定高于下限某个固定值上时，将提高调制方式，退出时，当连续 N 帧信号强度稳定低于下限某固定值时，将降低调制方式，如图 3 所示。

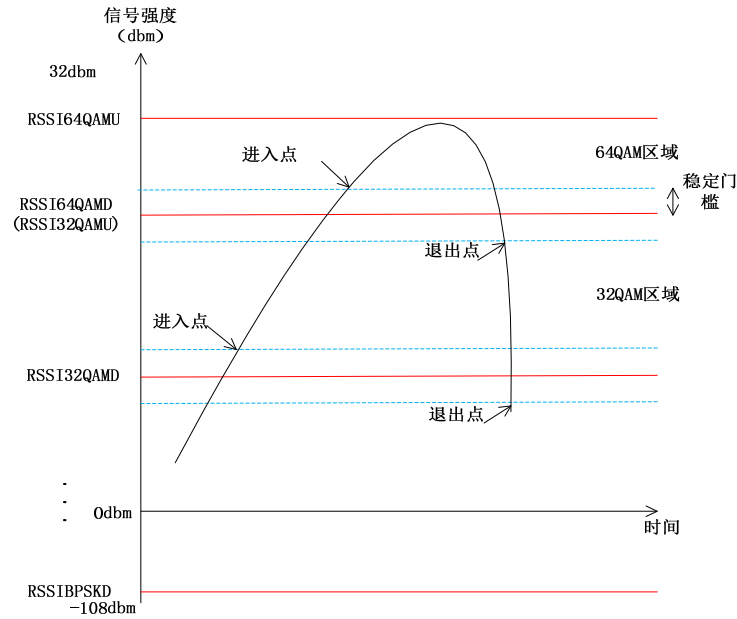


图 3 调制方式随信号强度稳定变化示意图

2.3 基于误码率的动态速率自适应调整

误码率^[10]直接反映了无线通信的通信质量，调制方式的不同，导致传输距离的不同，传输速率的不同，也会导致误码率的不同。相同条件下，BPSK 调制方式的误码率最低，64QAM 调制方式的误码率最高。当采用高密度星座图的调制方式时，如果误码率非常高，超过了容忍范围，则需要降低调制方式的处理。

在通过动态速率漂移算法后，将暂时确定了节点发送数据所使用的调制方式，但是其实际效果如何，需要通过误码率来反馈，如果其误码率很低，在实际能接受的范围内，则将继续采用该调制方式发送数

据，否则，将进行降低调制方式，直至误码率满足要求，如果误码率始终不满足要求，则需要通过部署中继节点来提高节点间传输的信号质量。降低调制方式，必须满足误码率的连续 N 帧超出容忍范围，防止抖动的影响。

2.4 自动重传[11]保证机制

电力系统中挂接在传感网中进行采集信息并传输的各设备基本处于不移动状态，因此，经过一段时间后，各终端节点发送数据的报文的调制方式都基本上得到稳定，尽管误码率很低，但仍然可能存在极少量的丢包。

该机制保证存在极少量的数据丢包时，节点通过将丢失的数据包重新进行传输，保证了数据完整地传输到达中心节点，整体满足了数据的完整性要求。

自动重传采用滑动窗口机制和报文自动重传定时器来实现，根据数据包的确认报文进行窗口的滑动，同时对超过自动重传定时器时间未收到确认包的报文进行实时重传。

3 实际效果分析

因电力设备所处环境各异,为简化实验复杂度,选择由 20 个终端节点和中心节点构成一个传感网络,该网络部署^[12]在稍未投入运行的 35kV变电站的户外的环境进行测试，正常情况下，节点发射功率为 3dbm，当开功率放大器时，可达 20dbm，对使用本算法和仅仅采用BPSK和 64QAM调制方式的效果进行对比分析。

首先对动态漂移算法进行测试，分以下三个场景进行节点布置，如表 2 所示。

表 2 测试场景中网络节点分布

调制方式	场景分布		
	场景 1	场景 2	场景 3
	节点分布		
BPSK	4	8	2
QPSK	4	4	2
O-QPSK	4	4	4
16QAM	4	2	4
32QAM	4	2	8
64QAM	4	2	8

所有终端节点都采用满帧数据发送，先大致根据距离部署节点，与场景不符合时，移动节点满足要求即可。测试主要统计网络传输速率和覆盖距离这两个性能指标，在中心节点上通过测试代码统计传输速率。

不采用动态速率漂移算法，固定调制方式为 BPSK 或 64QAM 的测试相对简单，只有将节点部署在网络覆盖范围内即可。

测试数据结果如表 3 所示。

表 3 测试结果数据统计

算法	场景	理论传输速率/(kb/s)	实际测试数据负荷传输速率/(kb/s)	覆盖距离
动态速率漂移算法	场景 1	387.5	232.3	不小于 100m
	场景 2	250	108.5	不小于 100m
	场景 3	568.75	411.2	不小于 100m
无	BPSK	62.5	26.6	不小于 100m
	64QAM	1000	834.9	0-10m

测试数据可能因为测试环境的不同而有所变化，但是其基本规律仍然是保持不变的，即落入高密度星座图的调制方式区域(如 64QAM)的节点越多，其网络传输速率越大，承载数据负荷能力越强，但是节点间需要满足足够的信号强度；落入低密度星座图的调制方式区域的节点越多，其网络传输速率越小，但是其覆盖范围越大，传输距离越远。根据测试数据可知，动态速率漂移算法是在保证覆盖范围不减少的情况下，对网络传输速率的提高，其提高的倍率在[0,16]之间。

4 结论

本文提出的动态速率漂移算法实际效果可描述为：通信节点间距离越近，信号强度越强，传输时延越短，发送数据采用的调制方式越高；通信节点间距离越远，信号强度越低，传输时延越长，发送数据采用的调制方式越低。在不降低网络数据传输可靠性和覆盖范围的前提下，一定程度上缓解了传感网的速率传输能力差的瓶颈，提高了整个网络的数据传输能力，在合理地网络规划和部署传感网后，可使网络实际数据负荷承载能力提高数倍。

参考文献：

- [1] 刘振亚. 智能电网技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [2] 王吕长, 李福祺, 高胜友. 电力设备的在线监测与故障诊断[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [3] Holger Karl, Andreas Willig. Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks[M]. Wiley-Interscience, 2007.
- [4] 国务院发展研究中心技术经济研究部. 物联网：影响未来[M].北京: 中国发展出版社,2011.
- [5] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) [S].2011.
- [6] IEC 62591: Industrial communication networks - Wireless communication network and communication profiles – Wireless HART™ [S].2010.
- [7] ZigBee SPECIFICATION [S].2008.
- [8] 李宗豪.基本通信原理[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2006.
- [9] K. Srinivasan, P. Levis. RSSI is Under Appreciated[J]. In Proceedings of the Third ACM Workshop on Embedded Networked Sensors, May 2006.
- [10] Jerry Zhao, Ramesh Govindan. Understanding packet delivery performance in dense wireless sensor networks[J]. Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems, 2003:1-13.
- [11] Zhenyuan Chen, Chao Zhang, Jun Zhang, Guo Wei. ARQ Protocols for Two-Way Relay Systems[J]. Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM), 2010 6th International Conference, 2010:1-4.
- [12] 曹峰, 刘丽萍, 王智.能量有效的无线传感器网络部署[J]. 信息与控制, 2006, 35(2): 147-153.

作者简介：

张 雷（1982-），男，江西人，硕士，从事物联网与全预装式智能变电站产品研发与设计，E-mail: guoguo_lei@163.com；
徐大可（1973-），男，江苏人，博士，从事智能电网技术产品研发与管理。