

面向输电场景的分层混合通信系统研究

姚继明

(全球能源互联网研究院 南京 210003)

摘 要 基于输电线路状态监测的通信特点和应用需求,分析电力光载无线通信系统的局限性,提出光载无线和无线多跳相结合的分层混合组网架构。考虑到输电场景的链式组网特点,为保证通信网络的可靠性,并防止网络单点失效带来的网络中断问题,提出 3 种多跳链路维护方法,对输电场景的通信系统建设具有一定借鉴意义。

关键词 输电,电力通信,光载无线,多跳,链路维护

中图分类号 TN925 文献标识码 A

Research on Hierarchical Hybrid Communication System for Power Transmission

YAO Ji-ming

(Global Energy Interconnection Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract Based on the communication feature and application requirement of state monitoring of transmission line, the limitations of power radio over fiber (RoF) communication system was analyzed, and the hierarchical hybrid network architecture combining RoF and wireless multi-hop was put forward. Considering the characteristics of the chain network of transmission scene, in order to ensure the reliability of communication network and prevent the interrupt problem of network by single point failure, three kinds of multi-hop link maintenance methods which have certain reference significance for the construction of power transmission communication system were proposed.

Keywords Power transmission, Electric communication, RoF, Multi-hop, Link maintenance

1 引言

目前,国家电网公司各省市电力公司在主城区范围内已建成以光通信为主的电力通信传输网,城区光纤骨干网覆盖 35KV 至 220KV 变电站,部分发达地区已经覆盖 10KV 变电所。依靠光纤的可靠通信方式高质量地满足了城区电力业务的传输需求。但是,对于偏远地区的应用场景,比如输电线路,受地理环境、经济成本、通信特征等因素限制,虽然开展了多种通信方式的研究和试点^[1,2],但目前并没有形成有效的通信系统来支撑输电线路状态监测业务。

现有应用于输电线路状态监测的试点工程的通信方式主要有租用公网^[3]、EPON+WiFi^[4]、McWill^[5]等技术,不同的通信系统在不同的发展阶段都在一定程度上支撑了输电环节的业务传输,但不同的通信系统有不同的应用局限性。租用公网的方式存在租用费用高、信号覆盖有盲区、管理维护不便等问题,EPON+WiFi 在早期的输电线路状态监测中应用较多,但存在建网成本高、传输距离不远等问题,而 McWill 采用宏基站的方式,覆盖范围在几公里内,也不适合输电场景的应用。

不同于传统的公网通信,电力通信呈现自身业务特点。主要表现在:以固定业务类型居多,而公网主要以移动业务为主,电力系统的无线承载的业务主要是辅助类业务,呈现数据流量小、分布范围广等低密度、广覆盖的特点,而公网业务包

括语音、数据、视频等多种业务类型,数据流量大、业务密度高,另外,电力业务呈现上行业务数据大、下行业务数据小的特点,而公网呈现的是下行业务数据大、上行业务数据小的特点。因此,针对电力系统的业务应用,通信系统需要进行特殊的优化和设计以满足应用的需要,输电场景的通信特点更为特殊,这也是本文研究的重点。

应用于输电线路状态监测的通信系统不同于传统的蜂窝式覆盖系统,呈现线性部署、链式通信、覆盖范围远、业务种类多、业务数据量小、数据周期传输等特点,因此,需要研究一种面向输电场景的链型通信专网来满足输电线路设施的状态监测传输需求。目前,电力光载无线通信系统是比较适用于输电线路的解决方案^[6-8],本文所提的电力光载无线通信系统是中心单元(base band unit, BBU)+远端单元(radio remote unit, RRU)的分布式架构,可充分利用输电线路上的电力光缆资源和电力专用无线频段,但系统受级联 RRU 数量的限制,覆盖范围在百公里内,对于更长距离的输电线路应用比较受限,基于此背景,本文提出采用电力光载无线通信技术与多跳无线通信技术相结合的分层多跳混合组网通信系统来支撑输电线路状态监测的业务数据传输,实现多跳链路的维护,从而延伸通信覆盖距离和提高系统抗节点失效的能力。

2 分层混合组网通信系统

2.1 系统模型

整套系统包括中心单元 BBU、远端单元 RRU、无线多跳

本文受国家电网公司科技项目:面向电力移动互联应用的 4G 多业务承载关键技术研究(SGRJXTKJ[2015]349 号)资助。

姚继明(1987—),男,硕士,工程师,主要研究方向为电力系统通信,E-mail: yaojiming622@163.com。

单元、无线终端。BBU 和 RRU 两者之间通过输电线路上部署的 OPGW 光缆中的光纤进行连接,无线多跳单元利用电力无线专用频段通过无线多跳方式将数据发送到 RRU 处进行汇聚,无线多跳单元与 RRU 之间链式组网链路采用多跳链路维护方法,RRU 所关联的无线终端通过电力无线专用频段与 RRU 进行连接,无线多跳单元连接无线终端并汇聚底层的各类输电线路状态监测数据,如图 1 所示。

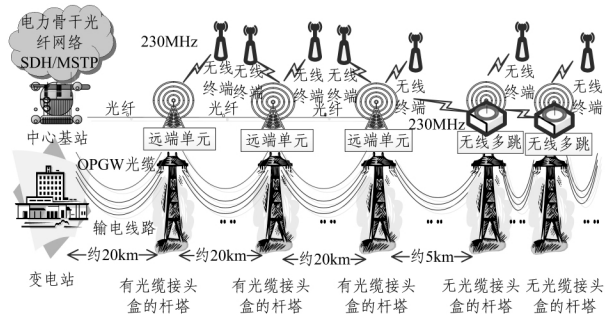


图1 分层多跳混合组网通信系统架构

系统分为两层:第一层为骨干传输层,即光缆侧传输,指 BBU 和 RRU 之间的光纤传输链路;第二层为汇聚接入层,即无线侧传输,指 RRU 与无线终端以及 RRU 与多跳单元之间的无线链路。该层实现底层输电线路状态感知数据接入,包括两部分汇聚接入:RRU 所关联的无线终端的数据汇聚以及无线多跳单元转发数据给 RRU 的数据汇聚。利用 RRU 和多个无线多跳单元将底层状态监测数据传输至位于变电站的中心基站 BBU,传输距离可达 100~300 公里。

2.2 多跳单元功率控制

正常使用情况下,考虑到输电线路状态监测数据的周期性传输特点,各多跳单元对采集的感知数据进行缓存,到达自己的传输周期时进行转发传输。而且,为降低多跳单元之间的无线干扰,多跳单元面向不同的通信对象采用不同的功率控制方法,当多跳单元与其覆盖范围内的各类传感器装置进行通信时,多跳单元控制发射功率,只覆盖其关联的无线传感装置范围,以免对相邻的多跳单元覆盖范围的无线传感装置造成干扰,多跳单元收集覆盖范围内的各类输电线路状态感知数据,并缓存在本地;当多跳单元进入自己的传输周期时,停止底层感知数据的汇聚,提高发射功率,扩大覆盖范围,与同条链路中的相邻多跳单元建立多跳连接通信,通过多跳方式传输给就近的 RRU,如图 2 所示。

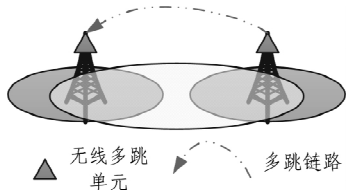


图2 多跳单元面向不同通信对象的功率控制示意图

这种面向不同通信对象的功率控制方法可以利用更多的频点来进行通信,如果数据转发和数据汇聚同时进行,为避免干扰,比较高效的做法是为不同终端分配不同的频点进行通信,需占用更多的频谱资源。另外,基于输电线路的链式特点,各多跳单元所使用的天线可采用双向定向天线以增大发射增益。

2.3 多跳链路分组设计

为提高无线链路的鲁棒性,减少无线多跳跳数,将无线多跳链路部分分为两条链路,当其中某条链路中的多跳节点出现故障时,可以利用另外一条链路作为备份链路,保障数据传输;同时,分为两条链路,可以利用周期传输,比如在周期 T_1 时间内,链路 1 传输,链路 2 不传输,有利于降低多跳节点设备的能耗。在系统初始化过程中,首先需对每个多跳单元进行链路分组,对于每一组的工作周期进行预分配,在周期性的输电监测数据传输阶段,每条链路根据分配的周期开始依次进行状态监测数据的传输。这里认为每个杆塔上的多跳设备都具备了可以覆盖同条链路相邻多跳单元的通信覆盖范围,并且在此过程中,由于预配置了各个多跳单元的唤醒周期,因此将杆塔上多跳节点之间的激活过程与监控数据转发的过程进行结合,更有利于节能。同时,为保证故障链路的及时修复,不同链路间的相邻节点之间也支持静态监听,以便及时唤醒接入。

如图 3 所示,对多跳单元进行分组,分为奇数组和偶数组,具体编号规则以多跳单元设备的部署位置进行编号。不以杆塔进行编号,因为部分杆塔没有部署多跳单元,只有各类感知装置,将多跳设备编号为 1,3,5 的节点编为奇数组,称为链路 1,编号为 2,4,6 的节点编为偶数组,称为链路 2。同一组中的节点组成同一条链路,节点之间通过无线方式利用电力专用频段进行多跳连接。

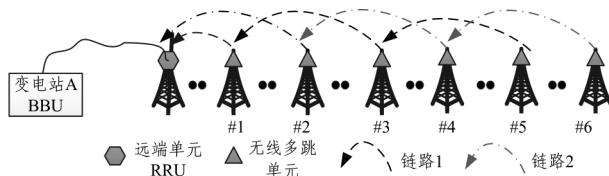


图3 无线多跳传输链路示意图

3 多跳链路维护方法

在输电场景应用中,无线多跳通信终端之间只能采用链式组网模式,该模式的缺点在于链路中有多跳节点出现故障,会导致多跳中断,整个链路无法继续通信。针对输电线路链式组网较为脆弱的问题,本文提出 3 种多跳链路维护方法,该方法主要解决链式通信网络的可靠性,防止网络单点失效带来的网络中断问题。

3.1 基于闭环功率控制的线性链路维护方法

该方法的主要实现思想是:链路中的多跳单元出现故障,其上一跳多跳单元发现故障,并将故障信息通过上行方式告知中心基站 BBU;BBU 下发功率放大命令,通过下行方式告知故障点的上一跳多跳单元;该单元获取指令后,提高发射功率,跳过故障点,与故障点的下一跳多跳单元建立连接,隔离故障,该种模式保持原有链路不变。具体如图 4 所示, #3 无线多跳单元节点出现故障,造成与之同一链路的 #5 无线多跳单元无法与其建立连接并传输数据, #1 没有在传输周期内检测到杆塔 #3 的数据传输,就会判断杆塔 #3 的多跳单元处于故障状态,发起链路维护机制,将 #3 中断信息告知主站 BBU,由主站下发功率放大命令, #1 多跳单元根据接收的指令调整发射功率,使 #5 能够监测到来自 #1 的请求连接信号,与 #1 建立多跳连接,据此建立了新的链路。

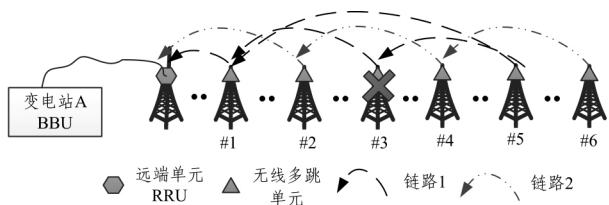


图4 基于闭环功率控制的线性链路维护方法示意图

3.2 基于跨链路的线性链路维护方法

该方法的主要实现思想是：故障多跳单元的下一跳单元无法与故障多跳单元建立连接，该下一跳单元与相邻的备份链路中的多跳单元进行连接，利用该备份链路中的多跳单元之间的通信跨过故障多跳单元，跨过故障多跳单元之后再跨回到原来的链路中。具体如图5所示，采用跨链路的线性链路维护方法，也即跨链路的多跳传输，因为#3出现故障，导致#5与#3无法连接，#1与#3也无法连接，#5判断#3故障，开始检测覆盖范围内的其他节点，直至检测到#4，发送传输协商信息给#4，#4接收信息并允许，然后由#4转发数据给#2，并告知#2传输的是其他链路的数据，#2得知这一情况后，寻找就近的原链路节点，如图中的传输数据给#1，余下流程与正常工作状态一致。这样做的目的是尽可能利用原有链路节点，保持链路节点的能量均衡，同时，降低路由的复杂性，否则需要不停建立路由链路，造成网络更新复杂且不利于节能。

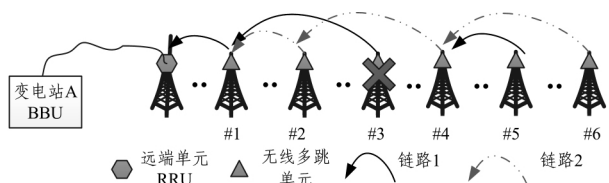


图5 基于跨链路的线性链路维护方法

在上述启动备份链路的过程中，使用链路2作为链路1的备份传输线路。但是对于链路1上的其他杆塔来说，如链路1中的杆塔#1上的传感器监测数据仍然有收集的需要。因此，传输线路需要从链路2切换到原来的链路1。通过链路的切换，可以实现在传输过程中避让出现故障的杆塔，以保障传输线路的可靠性和持续性。

为了实现从备份链路切换回原链路，需要在传输指标中添加传输标识。本文定义传输标识由4部分组成：跨链路接入请求、目标链路、故障节点编号和故障隔离指示符，每部分分别用一位数来标识。对于跨链路接入请求，“1”表示存在跨链路接入需求，“0”表示不存在跨链路接入需求；对于目标链路，“1”表示链路1，“2”表示链路2；对于故障节点编号，直接用故障点的设备编号来标识，最大支持编号为9，这是考虑到实际应用中基本不超过10跳，因为太多跳数的链路存在稳定性不高、延时大等不利因素，实际应用价值不大；对于故障隔离指示符，“1”表示故障未消除，“0”表示故障已经修复。

为进一步说明，图5示出链路1中的杆塔#5运行在预分配的传输周期中，因为#3故障，无法建立多跳连接，#5和#4进行协商连接并发送传输标识1131给#4。其中第1位的标识符数字1表示#5的跨链路接入请求；第2位的标识符数字显示了目标链路是链路1，#4据此知道链路1中出现节点故障，本次传输是临时转发；第3位显示故障的多跳单元是#3；第4位的1显示故障还未消除。#4获取传输标识符

后，发现不是本链路的传输请求，因此做好临时转发的准备，按照不是本链路的数据应就近转发目标链路的原则，#4应该将数据转发给#3，但通过标识符发现#3故障，就去连接#2，同时发送0130给#2；#2收到后，知道目标链路是链路1，故障也已隔离，且故障节点是#3，就可以与链路1中的#1建立链路，并发送1130；#1收到后，识别是自身链路的传输数据，且#3出现故障，而且故障已经隔离，就可以沿着原来链路1继续发送，不再使用链路2继续发送，链路2的传输过程自动终止，而且后续下发指令时，#1发送数据给#5时，按照相反的路径传输，直接跳过故障点。

3.3 基于双向回传的链路维护方法

该方法的主要实现思想是：故障多跳单元的后续多跳链路部分利用反向传输链路进行传输，同时，故障多跳单元的前向多跳链路部分利用原来的传输链路进行传输。该方法适用于同条输电线路两侧都有变电站且双向同时部署电力光载无线系统的场景，输电线路上的状态监测数据可以采取双向传输的方式回传，这样也有利于防止一端链路出现重要节点故障而导致整个链路瘫痪的情况。如图6所示，#3发生故障，导致#5无法建立多跳链路，#5开始执行反转传输机制，也即反方向传输，汇聚#3右侧的感知数据，#5与右侧的RRU建立多跳连接，最终接入到变电站内的BBU，故障点左侧的多跳单元还是按照原来的链路传输。

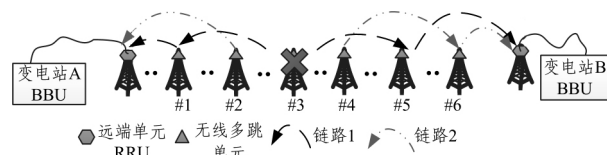


图6 基于双向回传的链路维护方法

3.4 方法优点

本文提出的光载无线和无线多跳的分层混合组网系统充分利用了光纤传输和无线传输技术的优势。骨干传输层利用电力OPGW光纤传输，具有抗干扰能力强、资源充分利用、建设周期短等优点，本地汇聚层采用无线多跳技术，具有协议简单、组网灵活、组网成本低等优点。

利用提出的多跳链路维护方法可实现输电场景下链式组网的可靠性水平的提高，适用于多种不同的应用场景，具有使用灵活、协议简单、快速恢复等优点，有效解决了链状无线通信网络的传输瓶颈问题，适用于输电线路的状态监测通信的远距离无线传输。

结束语 光纤无线融合的通信方式是目前主流通信方式，基于电力现有的光纤资源、无线资源，电力光载无线技术在电力系统有着很大的应用前景。但是，面对电力系统不同场景的应用需求，还需要对通信系统不断进行优化和改善。本文将光载无线和无线多跳技术进行了混合组网应用，并在浙江嘉兴的输电线路进行了试点应用，其能够满足输电场景下的应用需求。由于本文提出的多跳链路维护方法只能解决单点失效的问题，如何解决多点同时失效问题是下一步的研究重点。

参考文献

- [1] 孙凤杰,赵孟丹,刘威,等. 架空输电线路在线监测技术研究[J]. 南方电网技术,2012,6(4):17-22

- [2] 陈北海,赵萌. 输电线路状态监测通信传输网络技术的研究[J]. 电力系统通信,2012,33(5):47-51
- [3] 卞峰,李荣,连艳,等. 基于 3G 通信的输电线路状态监测系统主机研制[J]. 智能电网,2015,3(10):943-946
- [4] 王玮,张浩,郭经红. 基于 EPON 的输电线路状态监测数据传输系统[J]. 电力系统通信,2011,32(7):20-23
- [5] 王峰,李丹. 基于以太网和 McWiLL 的输电线路在线监测系统

- 设计[J]. 电力信息与通信技术,2015,13(1):86-89
- [6] 柯贤文,张伟,张志谦,等. 光载无线通信技术及其应用分析[J]. 通信技术,2011,44(4):45-47
- [7] 许盛,曾强,易浩勇,等. 电力光载无线宽带接入技术研究[J]. 光通信技术,2011,35(11):21-24
- [8] 姚继明,郑泽寰,梁云,等. 光载无线技术在智能电网中的应用模式研究[J]. 中国电力,2014,47(1):129-132

(上接第 263 页)

VS2012 上对概率路由协议和基于时隙滑动窗口机制的概率路由协议进行实现,从平均数据到达率和平均数据时间延迟两个性能指标进行分析,最后得出:基于时隙滑动窗口机制的概率路由协议能够更好地提高数据到达率,减少网络时延,从而提高了网络的可靠性。

参 考 文 献

- [1] 霍宏伟. 医疗护理无线传感器网络系统[D]. 北京交通大学,2010
- [2] Braem B, Latre B, Blondia C, et al. Analyzing and Improving Reliability in Multi-Hop Body Sensor Networks[J]. International Journal on Advances in Internet Technology, 2009, 2(1): 151-161
- [3] 丰慧. 无线体域网中可靠高效数据传输策略研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014
- [4] Oliveira C, Makowiak M, Correia L M. Challenges for Body Area Networks Concerning Radio Aspects[C]//11th European Wireless Conference on Sustainable Wireless Technologies, 2011: 1-5
- [5] de Silva N B, Yap K K, Motani M, et al. Link layer behavior of body area networks at 2.4 ghz[C]//15th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, 2009: 241-252
- [6] Chebbo H, Abedi S, Lamahewa T A, et al. Reliable body area networks using relays: restricted tree topology[C]//International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), 2012: 82-88
- [7] 刘艳丽. 基于人体环境的无线体域网网络结构研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008
- [8] Braem B, Latre B, Moerman I, et al. The wireless autonomous spanning tree protocol for multihop wireless body area networks [C]//Proc of the Mobile and Ubiquitous Systems, Networking & Services, San Jose, 2006: 1-8
- [9] Braem L B, Moerman I, Blondia C, et al. A low-delay protocol for multihop wireless body area networks[C]//2007 4th Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking & Services, Philadelphia, PA, USA, 2007
- [10] Bahanfar S, Darougaran L, Kousha H, et al. Reliable Communication in Wireless Body Sensor Network for Health Monitoring [J]. International Journal of Computer Science Issues, 2011, 8(5): 366-372
- [11] Hassan S, Asadi B, Vajdanparast Y, et al. Improving Reliability of Routing in Wireless Body Area Sensor Networks Using Genetic Algorithm[C]//IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering, 2011: 590-593
- [12] Liang X, Li X, Shen Q, et al. Exploiting Prediction to Enable Secure and Reliable Routing in Wireless Body Area Networks[C]//The 31st IEEE International Conference on Computer Commu-

- nications (INFOCOM), Orlando, United States, 2012: 388-396
- [13] Quwaider M, Biswas S. Probabilistic routing in on-body sensor networks with postural disconnections[C]//Proceedings of the 7th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access, 2009: 149-158
- [14] Zhao W, Ammar M, Zegura E. A message ferrying approach for data delivery in sparse mobile ad hoc networks[C]//Proceeding of ACM MobiHoc, 2004: 187-198
- [15] Tariq M, Ammar M, Zegura E. Message ferry route design for sparse ad hoc networks with mobile nodes[C]//Proceeding of ACM MobiHoc, 2006: 37-48
- [16] Zhao W, Ammar M, Zegura E. Controlling the mobility of multiple data transport ferries in a delay-tolerant network[C]//Proceeding of INFOCOM, 2005: 1407-1418
- [17] Grossglauser M, Tse D. Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002, 10(4): 477-486
- [18] Vahdat, Becker D. Epidemic routing for partially connected ad hoc networks[R]. CS-2000-06, Duke University, 2000
- [19] Jones E, Li L, Ward P. Practical routing in delay-tolerant networks[C]//Proceeding of the ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking, 2005: 237-243
- [20] Erramilli V, Crovella M, Chaintreau A, et al. Delegation forwarding[C]//Proceedings of the 9th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc'08). New York: ACM Press, 2008: 251-260
- [21] Musolesi M, Hailes S, Mascolo C. Adaptive routing for intermittently connected mobile ad hoc networks[C]//Proceeding of the 6th IEEE International Symposium on World of Wireless Mobile and Multimedia Networks, WoWMoM, 2005: 183-189
- [22] 王博, 黄传河, 杨文忠. 时延容忍网络中基于效用转发的自适应机会路由算法[J]. 通信学报, 2010, 31(10): 36-47
- [23] Jones E, Li L, Ward P. Practical routing in delay-tolerant networks[C]//Proceeding of the ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking, 2005: 237-243
- [24] 刘杰彦. 延迟容忍网络路由协议研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2006
- [25] 卢莲英. 延迟容忍网络路由算法研究[D]. 中国海洋大学, 2010
- [26] 杨炎. 延迟容忍网络路由算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012
- [27] 刘耀. 延迟容忍网络中路由与缓存管理算法[D]. 中南大学, 2012
- [28] Lindgren A, Doria A, Schelén O. Probabilistic routing in intermittently connected networks[J]. SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev., 2003, 7(3): 19-27