

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210220

基于 WSNs 的智能配电网通信数据传输带宽的优化分配策略

方如举¹, 葛瑜¹, 孙伟², 王建平²

(1. 许昌学院电气与机械工程学院, 河南 许昌 461000; 2. 合肥工业大学电气与自动化学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 智能配电网无线传感器通信网络中, IEEE802.15.4 协议采用 M/M/1/k 排队理论, 通信数据遵循先到先发, 无法为实时性和可靠性需求较高的电力数据分配合理的带宽资源。通过设置通信规则, 解决节点内不同优先级别数据排队问题。以通信延时和误码率作为约束条件、网络带宽利用率最大化为系统目标函数, 建立了多优先级别数据带宽资源的预测模型。通信网络根据带宽预测结果进行下一时刻不同优先级别数据带宽资源分配。最后, 对基于 40 个智能配电网无线传感器节点的通信网络性能进行方案测试, 验证了所提带宽资源分配方案的有效性。

关键词: 无线传感器网络; 带宽预测; 通信需求; 排队理论; 性能测试

Transmission bandwidth optimal allocation strategy of communication data for a smart distribution grid based on WSNs

FANG Ruju¹, GE Yu¹, SUN Wei², WANG Jianping²

(1. School of Electrical and Mechanical Engineering, Xuchang University, Xuchang 461000, China;
2. School of Electrical and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: It cannot allocate reasonable bandwidth resources for power data under higher demand in real-time and for reliability in WSNs of a smart distribution grid. This is because the IEEE802.15.4 protocol adopts M/M/1/k queuing theory and the communication data follows the 'first come first served' principle. By setting rules of communication, the queuing problem is solved for different priority communication data in a node. A bandwidth resource prediction model of multi priority data is established, where communication delay and BER are taken as a constraint condition and maximizing the utilization of network bandwidth is the objective function of the system. From the bandwidth prediction results, the communication network allocates the data bandwidth resources for different priority data at the next time. Finally, a case is tested, based on 40-node of WSNs applied in a smart distribution grid to verify the effectiveness of the proposed allocation scheme.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877060).

Key words: WSNs; bandwidth prediction; communication demand; queuing theory; performance test

0 引言

在智能电网中, 既要实现电能的双向流动, 又要实现通信信息上行和下行双向传递, 因此, 智能配电网的实现需要电气、通信以及控制等多个学科方面关键技术的支撑^[1-4]。保证电力数据以及相应的通信信息实时、可靠传输是实现配电网智能化管理最为关键的因素之一, 同时也是实现配电网各种智能化操作的前提和依据^[5-8]。无线传感器技术克服了数据点对点无线传输模式的局限性, 通过自组网和

自动中继实现低功耗、远距离、多路径选择的数据传输方式, 使其在智能配电网通信中获得广泛应用^[9-10]。智能配电网数据传输的容量、传输质量与数据自身所分配的链路带宽资源有着紧密联系^[11-14]。无线传感器网络节点间的带宽资源合理分配, 对提高智能配电网数据传输的整体效率起到重要作用^[15-16]。目前无线传感器网络中带宽资源采用平均分配策略, 不能针对配电网数据通信需求特征提供对应的服务, 无法满足电力数据传输的实时性和可靠性需求^[17-18]。

目前应用在智能配电网无线传感器网络带宽资源配置的方法是建立在弹性系数法和排队理论基础

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877060)

之上的带宽资源分配策略^[19-21]。文献[22-23]在排队理论基础, 提出一种低延迟动态带宽分配算法, 可以有效提高 Report 帧的实时性、减少节点队列排队长度、降低数据包的平均时延和提高上行信道利用率。为了保证数据传输效率的最大化, 文献[24]提出自适应带宽分配策略, 该算法在保证数据传输有效的前提下, 能够根据数据传输请求动态分配带宽资源。为了在频谱共享中减少主次系统之间干扰, 同时提高认知系统的信息传输速率, 文献[25]提出了一种基于功率和带宽分配的双向协作频谱共享协议。

文献[19-21]所提出的弹性系数和排队理论带宽资源分配方案, 对固定容量的带宽资源通信系统, 取得较好的通信效果, 而在配电网中, 数据的传输具有一定的随机性, 需要通信带宽能够根据不同时刻传输需求而作出动态调整。文献[22-23]虽然实现了带宽资源的动态分配, 在一定程度上提高了上行数据的通信效率, 但是智能配电网中的数据通信是双向的, 该方法应用在智能配电网通信系统中, 带宽分配的优势无法充分发挥出来。文献[24]仅仅在满足实时性需求的前提下, 根据传输请求分配带宽资源, 进而实现数据高效地传输, 而在智能配电网中, 数据传输的可靠性同样重要。文献[25]所提出的双向协作频谱共享协议虽然同时考虑传输功率和带宽分配的双重需求, 但是该方法满足不了数据传输的实时性和可靠性需求。总之, 上述文献均没有针对不同优先级别数据实际需求提供不同的带宽服务, 无法满足不同类型通信数据的实时性和可靠性需求。

针对智能配电网不同类型的电力数据对实时性和可靠性需求不同, 以及无线传感器网络带宽资源配置存在的缺点, 本文提出了一种多优先级别数据传输的无线传感器网络带宽资源高效分配策略; 在保证各种类型数据通信质量的前提下, 优化带宽资源分配策略, 提高数据传输的实时性和可靠性。

1 WSNs 链路带宽的配置算法

无线传感器网络采用 IEEE802.15.4 协议标准, 其通信能力受到带宽资源限制, 因此提高链路带宽资源有效配置, 对提高智能配电网数据传输的整体效能起到至关重要作用。

1.1 智能配电网电力数据的通信需求

智能配电网中, 不同的终端设备对通信速率要求不同, 因此, 在设计智能配电网无线传感器网络时, 需要考虑不同类型终端设备通信需求。表 1 为变电所、配电线路、变压器以及其他数据终端采集设备对通信速率的需求。

表 1 不同终端设备通信要求

Table 1 Communication requirements of different terminal units

设备名称	数据包的大小/B	通信速率/kbps	分布特征
变电站	90	1.2~9.6	泊松分布
变压器	90	0.01~0.3	泊松分布
配电线路	90	0.3~1.2	泊松分布
智能仪表	90	0.01~0.3	泊松分布
分布式电源	110	5	平均分布

1.2 智能配电网电力数据的通信性能指标

根据 IEC61850 系列标准和中国国家标准 GB/T 13729-2002 《远动终端设备》, 电力系统中不同类型数据实时性和可靠性的性能指标见表 2。

表 2 不同类型数据的性能指标

Table 2 Performance index for different types of data

数据类型	内容	技术指标
遥控(遥调)	保护、投停、保护定值设置	遥控完成时间 < 5 s 遥控正确率 ≥ 98%
遥信	开关状态事故、跳闸信号、终端状态信号、开关储能信号等	遥信完成时间 < 3 s 遥信动作正确率 ≥ 99%
遥测	电压、电流、功率、温度、频率、电能	越死传递时间 < 15 s 遥测合格率 ≥ 90%

从表 2 中可以看出, 不同类型的电力数据对数据传输的实时性和可靠性指标需求不同, 智能配电网无线传感器网络不同节点在同一时间段内传输的数据类型和数量可能完全不同, 如果从无线传感器网络数据采集节点到数据传输的终端节点全部按照平均分配带宽资源的方式, 整个通信系统数据传输的效率肯定不高。

1.3 智能配电网 WSNs 数据传输的带宽分配算法

假定单个无线传感器网络节点数目为 N , 节点数据产生率为 λ , 并发比例系数为 $k=1$, B_{basic} 代表无线传感器网络对应设备的基本带宽, φ_1 代表冗余系数, φ_2 代表容灾系数, 当前无线传感器网络节点需要分配的带宽可以表示为

$$B_{\text{elastic}} = \sum_{i=1}^N B_{\text{basic-}i} \cdot \lambda_i \cdot \varphi_1 \cdot \varphi_2 \quad (1)$$

假设当前时刻, 需要传输数据的无线传感器节点数目为 $M (M \leq N)$, 那么分配到当前单个传感器节点数据传输的链路带宽可以表示为

$$B_{\text{elastic}1} = \frac{B_{\text{elastic}}}{M} = \frac{\sum_{i=1}^N B_{\text{basic-}i} \cdot \lambda_i \cdot \varphi_1 \cdot \varphi_2}{M} \quad (2)$$

从式(2)可以看出, 当无线传感器网络中的数据产生率相同, 各条路由链路的节点数据队列长度相同, 数据对通信完成的实时性和可靠性的服务质量

需求相同时,这种链路带宽分配的策略能够满足系统通信需求。但是这种带宽资源分配方法不适合对实时性和可靠性需求较高的智能配电网无线传感器网络通信系统。主要原因:一方面智能配电网中遥信、遥控(遥调)以及遥测数据对通信的实时性和可靠性的需求不同;另一方面无线传感器网络中各个节点在不同时刻所承担的任务需求不同,引起各个节点中需要传输的数据类型以及数据队列的长度不同,因此各个节点对通信带宽的需求也不完全相同。因此,式(2)所提供的分配策略在智能配电网无线传感器网络通信系统中不是最优的带宽分配方案。

根据表2,遥信数据对通信的实时性和可靠性要求最高,可归为第一类;遥控和遥调数据对通信时间以及正确率要求完全一致,归结成第二类数据;遥测数据对通信实时性和可靠性要求级别最低,可以归为第三类。后续章节为叙述方便,遥信、遥调(遥控)以及遥测数据分别用高、中以及低优先级数据表示。

无线传感器网络节点分配的带宽,不仅与该节

$$\left\{ \begin{aligned} B_{\text{elastic-0}} &= \frac{(\lambda_0 + \mu_0) \cdot (t_1 + t_2) \cdot B_{\text{elastic}}}{(\lambda_0 + \mu_0) \cdot (t_1 + t_2) + (\lambda_1 + \mu_1) \cdot (t_0 + t_2) + (\lambda_2 + \mu_2) \cdot (t_0 + t_1)} \\ B_{\text{elastic-1}} &= \frac{(\lambda_1 + \mu_1) \cdot (t_0 + t_2) \cdot B_{\text{elastic}}}{(\lambda_0 + \mu_0) \cdot (t_1 + t_2) + (\lambda_1 + \mu_1) \cdot (t_0 + t_2) + (\lambda_2 + \mu_2) \cdot (t_0 + t_1)} \\ B_{\text{elastic-2}} &= \frac{(\lambda_2 + \mu_2) \cdot (t_0 + t_1) \cdot B_{\text{elastic}}}{(\lambda_0 + \mu_0) \cdot (t_1 + t_2) + (\lambda_1 + \mu_1) \cdot (t_0 + t_2) + (\lambda_2 + \mu_2) \cdot (t_0 + t_1)} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{aligned} B_{\text{elastic1-0}} &= \frac{(\lambda_0 + \mu_0) \cdot (t_1 + t_2) \cdot B_{\text{elastic}}}{[(\lambda_0 + \mu_0) \cdot (t_1 + t_2) + (\lambda_1 + \mu_1) \cdot (t_0 + t_2) + (\lambda_2 + \mu_2) \cdot (t_0 + t_1)] \cdot n_0} \\ B_{\text{elastic1-1}} &= \frac{(\lambda_1 + \mu_1) \cdot (t_0 + t_2) \cdot B_{\text{elastic}}}{[(\lambda_0 + \mu_0) \cdot (t_1 + t_2) + (\lambda_1 + \mu_1) \cdot (t_0 + t_2) + (\lambda_2 + \mu_2) \cdot (t_0 + t_1)] \cdot n_1} \\ B_{\text{elastic1-2}} &= \frac{(\lambda_2 + \mu_2) \cdot (t_0 + t_1) \cdot B_{\text{elastic}}}{[(\lambda_0 + \mu_0) \cdot (t_1 + t_2) + (\lambda_1 + \mu_1) \cdot (t_0 + t_2) + (\lambda_2 + \mu_2) \cdot (t_0 + t_1)] \cdot n_2} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

从式(4)可以看出,每个节点对通信带宽的需求,除了与所传输的数据类型有关,还与节点数据的产生率和转发率相关。可见,对于智能配电网无线传感器网络多优先级数据而言,按照这种方式分配带宽资源更加合理。

2 基于多优先级排队理论的智能配电网 WSNs 链路带宽的配置算法

由于配电网中不同优先级数据对数据传输的实时性和可靠性的需求不同,按照先进先出的排队理论,在无线传感器网络节点内部,先采集或先由其他节点转发到当前到节点内的数据应该具有优

先传输的特权。按照这种传输模式,无法满足配电网对实时性和可靠性需求较高的数据需要优先传输的需求,可能造成配电网一些需要紧急操作的动作无法在规定时间内完成,引起电网连锁反应,造成不必要的损失。因此,在带宽资源分配时需要考虑这一因素。

2.1 基于多优先级的智能配电网 WSNs 节点队列排队模型

针对智能配电网不同优先级数据对通信的实时性以及可靠性需求不同,设置相应传输遵循规则:当节点采集到或接收到由其他节点转发过来的高优先级数据时,放在节点队列的首端,当节点采集到或接收到由其他节点转发过来的低优先级数据

时, 放在节点队列的末端, 中等优先级别数据放在数据队列的中间; 同一优先级别数据按照剩余通信完成时间长短进行逆序排列, 依据这种规则建立智能配电网无线传感器网络基于三优先级别数据的节点内队列排队模型, 如图 1 所示。其中参数 λ_0 、 λ_1 、 λ_2 分别表示高、中、低三个级别的数据产生率; K_0 、 K_1 、 K_2 分别表示高、中、低三个级别的数据在无

线传感器节点内的队列上限值; λ_{E0} 、 λ_{E1} 、 λ_{E2} 分别为考虑丢失率后传输到当前节点高、中、低三个级别的数据到达率; L_{S0} 、 L_{S1} 、 L_{S2} 分别为当前节点缓冲队列中高、中、低三个级别的数据队列长度; T_{S0} 、 T_{S1} 、 T_{S2} 分别为当前节点缓冲队列中高、中、低三个级别的数据平均延时时间。

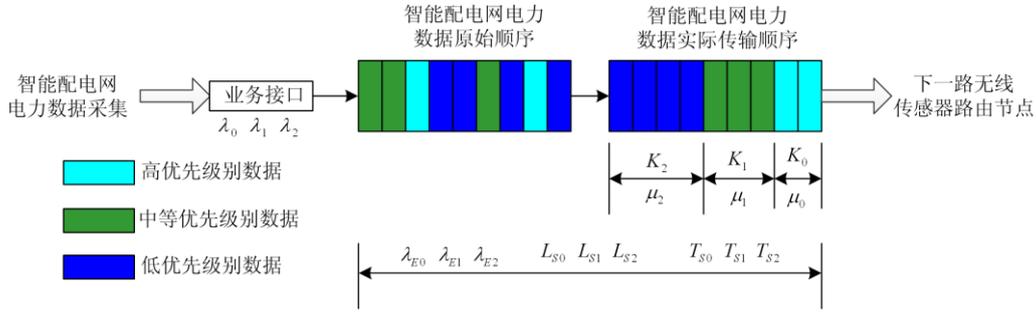


图 1 智能配电网 WSNs 节点队列排队模型

Fig. 1 WSNs node queue model of smart distribution grid

2.2 基于多优先级的智能配电网 WSNs 节点数据传输数学模型

M/M/1/k 排队理论遵循数据先到先排的原则: 先到的数据排在数据队列的前位, 后到的数据排在数据的末位, 先到的数据先被发送。

当某时刻智能配电网中仅仅存在一种优先级别数据时, 可以按照 M/M/1/k 排队理论提出的方法来计算通信网络数据传输的性能指标, 不会影响配电网数据的通信质量, 如式(5)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{loss}}(\mu) = \rho^k P_0 = \rho^k \frac{1-\rho}{1-\rho^k} \\ T_s(\mu) = \frac{L_s}{\lambda_e} \\ L_s = \sum_{n=1}^k n P_n = \frac{\rho}{1-\rho} - \frac{(k+1)\rho^{k+1}}{1-\rho^{k+1}} \\ \lambda_e = \lambda(1-P_{\text{loss}}(\mu)) \end{cases} \quad (5)$$

而实际配电网中的通信网络, 仅在某一个特定时刻可能会只存在一种优先级别数据, 而在绝大多数情况下, 通信网络中均会存在两种以上优先级别数据, 因此式(5)所提出的计算智能配电网无线传感器网络节点通信质量算法并不具有一般性。在衡量智能配电网无线传感器网络的通信质量时, 除了要考虑网络中数据种类, 还要考虑高优先级别数据对低优先级别数据的影响。

假定 $\rho_n = \lambda_n / \mu_n$ ($n=1,2,3$) 分别代表高、中以及低优先级别数据参数。智能配电网无线传感器网络

不同优先级别数据在传输过程中的丢失率可用式(6)表示。

$$\begin{cases} P_{\text{loss-0}}(\mu) = \rho_0^k \frac{1-\rho_0}{1-\rho_0^k} \\ P_{\text{loss-1}}(\mu) = \rho_1^k \frac{1-\rho_1}{1-\rho_1^k} \\ P_{\text{loss-2}}(\mu) = \rho_2^k \frac{1-\rho_2}{1-\rho_2^k} \end{cases} \quad (6)$$

式中, k 代表排在当前节点前面数据个数与数据传输过程中新产生的优先级别高于当前数据的数据个数之和。因此, 高优先级别数据传输延时时间仅仅与其在队列中的位置有关; 中等优先级别数据传输时间不仅与其在队列中的位置有关, 还与其在等待传输过程中, 新产生的高优先级别数据的数量有关; 低优先级别数据传输延时, 与其在队列中的位置, 以及在等待传输过程中新产生的高、中优先级别数据数量相关。不同优先级别数据在当前节点的延时时间可以表示为

$$\begin{cases} T_{\text{loss-0}}(\mu) = \frac{L_{S0}}{\lambda_{E0}} \\ T_{\text{loss-1}}(\mu) = \frac{L_{S0} + L_{S0}^0 + L_{S0}^1 + L_{S1}}{\lambda_{E1}} \\ L_{\text{loss-2}}(\mu) = \frac{L_{S0} + L_{S0}^0 + L_{S0}^1 + L_{S0}^2 + L_{S1} + L_{S1}^0 + L_{S1}^1 + L_{S2}}{\lambda_{E2}} \end{cases} \quad (7)$$

式中： L_{s0}^0 表示在高优先级别数据传输过程中，新产生的高优先级别数据的长度； L_{s0}^1 表示在中等优先级别数据传输过程中，新产生的高优先级别数据的长度； L_{s0}^2 表示在低优先级别数据传输过程中，新产生的高优先级别数据的长度； L_{s1}^0 表示在高优先级别数据传输过程中，新产生的中等优先级别数据的长度； L_{s1}^1 表示在中等优先级别数据传输过程中，新产生的中等优先级别数据的长度。WSNs 节点不同优先级别数据的原始队列长度可表示为

$$\begin{cases} L_{s0} = \sum_{n=1}^{K_0} nP_n = \frac{\rho_0}{1-\rho_0} - \frac{(K_0+1)}{1-\rho_0^{K_0+1}} \rho_0^{K_0+1} \\ L_{s1} = \sum_{n=1}^{K_1} nP_n = \frac{\rho_1}{1-\rho_1} - \frac{(K_1+1)}{1-\rho_1^{K_1+1}} \rho_1^{K_1+1} \\ L_{s2} = \sum_{n=1}^{K_2} nP_n = \frac{\rho_2}{1-\rho_2} - \frac{(K_2+1)}{1-\rho_2^{K_2+1}} \rho_2^{K_2+1} \end{cases} \quad (8)$$

不同优先级别数据在考虑丢失率的前提下到达率可以表示为

$$\begin{cases} \lambda_{E0} = \lambda_0(1-P_{\text{loss-0}}(\mu)) \\ \lambda_{E1} = \lambda_1(1-P_{\text{loss-1}}(\mu)) \\ \lambda_{E2} = \lambda_2(1-P_{\text{loss-2}}(\mu)) \end{cases} \quad (9)$$

不同优先级别数据的传输效率可以表示为

$$\begin{cases} \eta_0(\mu_0) = \frac{\lambda_{E0}}{\mu_0} \\ \eta_1(\mu_1) = \frac{\lambda_{E1}}{\mu_1} \\ \eta_2(\mu_2) = \frac{\lambda_{E2}}{\mu_2} \end{cases} \quad (10)$$

2.3 基于多优先级别数据通信需求的最优带宽分配方法

通过构建以无 WSNs 的服务质量(QoS)作为约束条件(数据传输的丢失率、延时时间)，以网络带宽利用率最大化为系统优化目标计算模型，实现对通信带宽资源的利用最优。

智能配电网中数据传输的实时性以及可靠性是衡量数据传输质量最为重要的指标，而智能配电网中三类数据类型通信指标需要独立衡量。根据前述公式 $\rho_n = \lambda_n / \mu_n$ ($n=0,1,2$) 以及式(6)可以得到相应的数据传输丢失率 $P_{\text{loss-0}}$ 、 $P_{\text{loss-1}}$ 、 $P_{\text{loss-2}}$ 。再根据式(9)算出考虑丢失率前提下的到达率 λ_{E0} 、 λ_{E1} 、 λ_{E2} 。考虑配电网对传输实时性和可靠性需求的约束条件：

$$\begin{cases} P_{\text{loss-}i} \leq C_{\text{loss-}i} \\ T_{\text{loss-}i} \leq C_{T-i} \end{cases} \quad (11)$$

当不等式组式(11)取等号时，就可以算出满足

约束条件的 λ_{E0} 、 λ_{E1} 、 λ_{E2} 、 μ_0 、 μ_1 及 μ_2 数值，此时系统的带宽利用率可以进一步表示为

$$\eta(\mu) = \frac{\lambda_{E0} + \lambda_{E1} + \lambda_{E2}}{\mu_0 + \mu_1 + \mu_2} \quad (12)$$

综合考虑上述因素，构建满足多优先级别数据通信需求的最优带宽利用率数学模型，可以进一步表示为

$$\begin{cases} \max \eta = \frac{\lambda_{E0} + \lambda_{E1} + \lambda_{E2}}{\mu_0 + \mu_1 + \mu_2} \\ P_{\text{loss-}i} \leq C_{\text{loss-}i} \\ T_{\text{loss-}i} \leq C_{T-i} \end{cases} \quad (13)$$

式中： C_{T-i} 代表通信数据的延时时间； $C_{\text{loss-}i}$ 代表通信数据传输的丢失率或误码率； $i=1,2,3$ 分别代表高、中以及低优先级别数据对应的关系量。通过模型式(13)可以得到不同优先级别数据的转发速率，最终获得最优带宽的预测值，从而按照预测结果分配带宽资源，具体的求解流程如图 2 所示。从图 2 可以看出，所提出的智能配电网无线传感器网络通信方法综合考虑数据的传输种类、每种通信数据数量，按需分配传输带宽资源，保证数据传输质量。

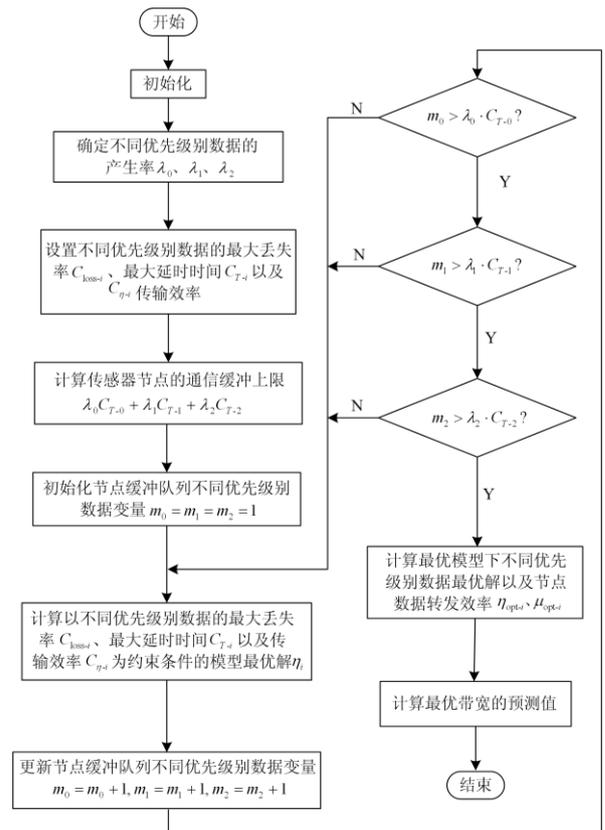


图 2 智能配电网 WSNs 最优带宽分配算法

Fig. 2 Optimal bandwidth allocation algorithm for WSNs in smart distribution grid

3 仿真测试分析

3.1 仿真环境与实验参数设置

针对配电网通信数据对实时性和可靠性的需求, 对所提出的满足多优先级数据通信需求的模型进行仿真测试, 验证了所提宽带分配模型的有效性。由于无线传感器网络通信采用 IEEE802.15.4 协议, 受到带宽资源的限制, 通信网络需要根据需求配置子网络的节点数目和协调器数目。

所搭建的无线传感器网络主要用来模拟城市配电网, 通信网络的元素(无线传感器节点)传输距离不大于 620 m, 每平方公里的传感器节点数目不少于 10 个; 传感器网络节点的容量不超过 100 个, 通信数据的产生规律服从泊松分布。

整个智能配电网共有 40 个电气设备需要采集数据, 依据网络元素传感器节点的分布规律以及传输带宽资源需求, 将 40 个电气设备平均分为 4 组, 每个电气设备均配置一个相应的无线传感器节点对其进行数据采集, 每一个无线传感器网络中的节点直接与其配置的通信协调器通信, 4 个无线传感器子网络之间物理隔断, 相互之间不存在数据传输, 具体的配置示意图如图 3 所示。对于 4 个子网络而言, 每个网络的拓扑结构基本相同, 数据传输的方式相同, 因此只要分析其中任何一个子网络的通信性能, 其他子网络的通信性能分析过程相似。任何一个子网络的传感器节点均通过协调器, 借助多串口接入装置直接与无线通信网关连接, 将采集的信息传输到配电网信息管理中心。

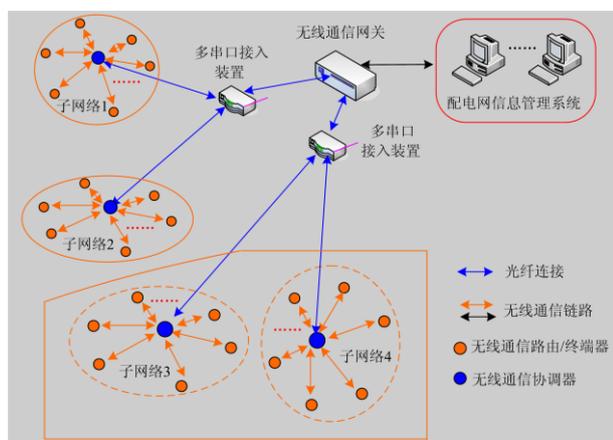


图 3 WSNs 配置示意图

Fig. 3 Configuration diagram of WSNs

测试的无线传感器网络采用 IEEE802.15.4 标准物理层所定义 2.4 GHz 信道和 250 kbps 网络带宽。

测试的无线传感器网络按照子网络 1 的配置进行。包括一个协调路由节点和 10 个无线传感器网络节点, 每个传感器节点均在其他传感器节点的通信范围之内。协调节点安排在整个通信网络的最远端, 保证通信距离足够长, 使得测试结果不受影响。

电力设备的通信速率按照表 1 的规定进行设置, 由于每个无线传感器网络的节点数目为 10 个, 因此每个节点中三种类型数据的通信速率不应该超过 25 kbps, 这样能够保证无线传感器网络不处于过饱和状态。高优先级别数据的产生率 $\lambda_0 = 5$ kbps, 中等优先级别数据的产生率 $\lambda_1 = 5$ kbps, 低优先级别数据的产生率 λ_2 从 1 kbps 逐步增加到 15 kbps, 模拟智能配电网无线传感器网络从不饱和状态过渡到饱和状态。

3.2 实验结果以及 WSN 性能分析

图 4 为在上述环境下的测试结果。其中图 4(a) 为单个传感器节点传输带宽的预测结果以及实际传输数据的对比。从仿真结果来看, 二者结果基本一致。图 4(b) 为节点内不同优先级别数据的传输延时时间, 从仿真结果来看, 高优先级别数据的延时时间最短, 而低优先级别数据的延时时间最长, 说明高优先级别数据得到优先传输。图 4(c) 为高、中、低三类优先级别数据在传输过程中的冲撞率, 高优先级别数据在传输过程中几乎不发生碰撞, 而低优先级别数据的冲撞率已经接近 2%, 在三类数据中最高。图 4(d) 为三类优先级别数据的有效吞吐率, 从图中可以看出, 高优先级别数据的有效吞吐率接近 100%, 而低优先级别数据的有效吞吐率为 96.5%, 这意味着部分低优先级别数据由于传输过程中发生碰撞或其他原因, 不能被有效地传输到路由节点。

本次仿真只是针对传感器节点经过一次跳变就传到路由节点, 而实际上传感器节点最大跳变次数一般不超过 5 次, 按照这种方式计算, 在网络饱和的情况下三类数据最大的延时时间约为 4.8 ms、5 ms 以及 5.7 ms, 5 个节点的跳变累计延时时间为 24 ms、25 ms 以及 28.5 ms, 均小于配电网对三类数据的要求, 实时性满足通信需求。数据传输的可靠性可以用传输的冲撞率来衡量, 从图 4(c) 可以看出, 高、中优先级别数据按照 5 次跳变来计算, 冲撞率的最终结果不超过 1% 和 2%, 也就是数据传输的成功率超过 99% 及 98%。而低优先级别数据一次跳变的冲撞率为 1.8%, 5 次跳变的累计约为 8.7%, 数据传输的成功率约为 91.3%, 高于配电网可靠性要求的 90%。

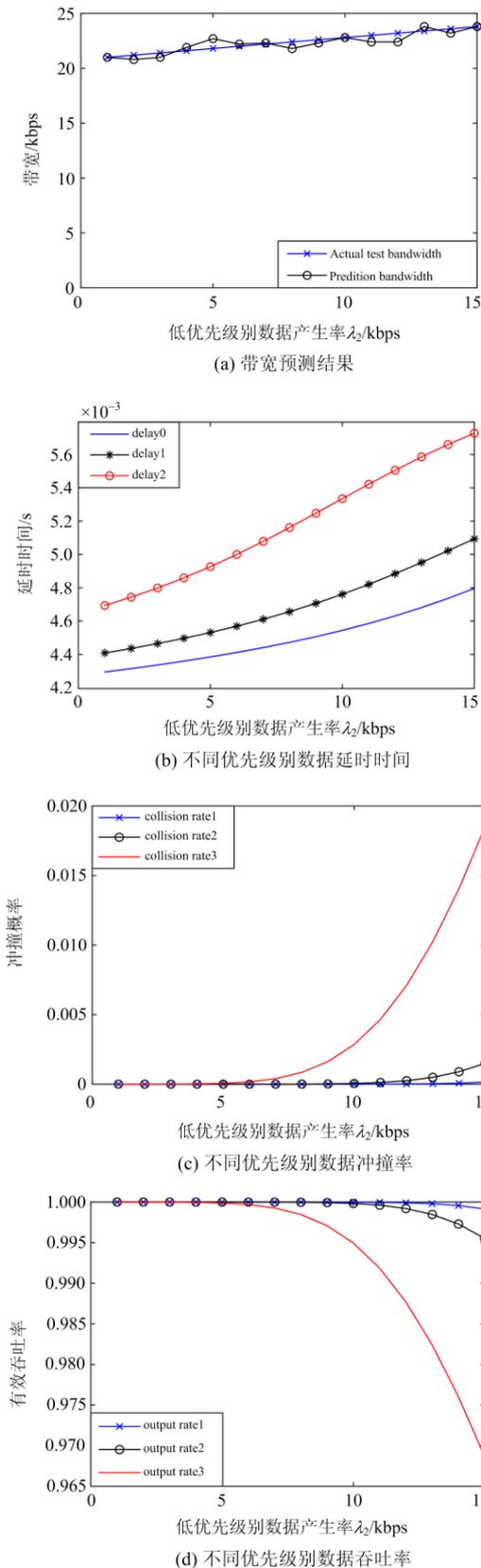


图4 仿真测试结果

Fig. 4 Simulation test results

4 总结

针对智能配电网无线传感器网络的通信需要和通信特征, 提出了一种对无线传感器节点通信带宽进行预测的分配方法, 网络根据当前节点通信带宽的预测结果, 对相应节点进行带宽资源配置, 提高无线传感器网络带宽资源利用率。所提出的带宽分配方法可行高效, 实现了对智能配电网通信数据进行分类传输的同时, 保证了通信质量。

参考文献

- [1] WANG Xin'an, SHI Di, WANG Jianhui, et al. Online identification and data recovery for PMU data manipulation attack[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 5889-5898.
- [2] TAN Yuhua, WANG Xin, ZHENG Yihui. A new modeling and solution method for optimal energy flow in electricity-gas integrated energy system[J]. International Journal of Energy Research, 2019, 43(9): 4322-4343.
- [3] ZHU Mengting, XU Chengsi, DONG Shufeng, et al. An integrated multi-energy flow calculation method for electricity-gas-thermal integrated energy systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 65-76. DOI: 10.1186/s41601-021-00182-2.
- [4] GOPAKUMAR P, MALLIKAJUMA B, REDDY J B, et al. Remote monitoring system for real time detection and classification of transmission line faults in a power grid using PMU measurements[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 159-168. DOI: 10.1186/s41601-018-0089-x.
- [5] 张东霞, 苗新, 刘丽平, 等. 智能电网大数据技术发展[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 2-12.
ZHANG Dongxia, MIAO Xin, LIU Liping, et al. Research on development strategy for smart grid big data[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 2-12.
- [6] ZHANG Peiling, ZHANG Hongxin, HUANG Liyu, et al. Multi-parameter identification of power line communication channel model based on matching pursuit[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2013, 67(8): 697-701.
- [7] 陈磊, 何慧雯, 王磊, 等. 基于限流器与断路器协调的混合直流输电系统故障隔离方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 119-127.
CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Fault isolation method of a hybrid HVDC system based on the coordination of a fault current limiter and a DC circuit breaker[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 119-127.
- [8] TANG Kunjie, DONG Shufeng, SHEN Jie, et al. A robust and efficient two-stage algorithm for power flow calculation of large-scale systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 5012-5022.
- [9] 王君洪, 陈跃东, 陈孟元. 基于马尔科夫链的模糊认知图在智能配电网 WSN 通信 QoS 优化研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(18): 70-78.

- WANG Junhong, CHEN Yuedong, CHEN Mengyuan. Research on fuzzy cognitive map based on Markov chain in QoS optimization of smart distribution power grid WSN communication[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(18): 70-78.
- [10] 何奉禄, 陈佳琦, 李钦豪, 等. 智能电网中的物联网技术应用与发展[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 58-69. HE Fenglu, CHEN Jiaqi, LI Qin hao, et al. Application and development of internet of things in smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 58-69.
- [11] 鲍兴川, 彭林. 基于 SDN 的配电网通信动态带宽分配算法[J]. 计算机应用与软件, 2018, 35(8): 219-225. BAO Xingchuan, PENG Lin. Dynamic bandwidth allocation algorithm for distribution network communication based on SDN[J]. Computer Applications and Software, 2018, 35(8): 219-225.
- [12] FANG Huifeng, GU Huaiming, FAN Guanghai, et al. The static and dynamic analysis of GaN-based blue light-emitting diodes used in visible light communication[J]. Journal of Optics, 2019, 48(4): 486-490.
- [13] YUAN Hui, WEI Xuekai, YANG Fuzheng, et al. Cooperative bargaining game based multiuser bandwidth allocation for dynamic adaptive streaming over HTTP[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2018, 20(1): 183-197.
- [14] 张伟晨, 熊永新, 李程昊, 等. 基于改进 VDCOL 的多馈入直流系统连续换相失败抑制及协调恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 63-72. ZHANG Weichen, XIONG Yongxin, LI Chenghao, et al. Continuous commutation failure suppression and coordinated recovery of multi-infeed DC system based on improved VDCOL[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 63-72.
- [15] 文樵奕. 基于认知无线电的 IoT 传感器网络资源分配算法研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2018. WEN Jinyi. Research on IOT sensor network resource allocation algorithm based on cognitive radio[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [16] 李欣悦, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 直流双极闭锁故障下送端系统暂态过电压计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 1-8. LI Xinyue, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Transient overvoltage calculation method of HVDC sending-end system under DC bipolar blocking[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 1-8.
- [17] CHANDAK S, BHOWMIK P, ROUT P K. Load shedding strategy coordinated with storage device and D-STATCOM to enhance the microgrid stability[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(3): 250-268. DOI: 10.1186/s416001-019-0138-0.
- [18] 孙伟, 陆伟, 李奇越, 等. 智能电网中无线传感器网络通信链路可靠性置信区间预测[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 29-34, 77. SUN Wei, LU Wei, LI Qiyue, et al. Reliability confidence interval prediction for communication link of wireless sensor network in smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 29-34, 77.
- [19] 赵子岩, 刘建明. 基于业务风险均衡度的电力通信网可靠性评估算法[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 209-213. ZHAO Ziyang, LIU Jianming. A new service risk balancing based method to evaluate reliability of electric power communication network[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 209-213.
- [20] 徐志强, 陆俊, 翟峰, 等. 智能配用电多业务汇聚的通信带宽预测[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 712-716. XU Zhiqiang, LU Jun, ZHAI Feng, et al. Communication bandwidth prediction of aggregation of multi-services for smart power distribution and utilization[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 712-716.
- [21] 方如举, 王建平, 孙伟. 智能配电网无线传感器通信网络的跨层协作控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(2): 128-136. FANG Ruju, WANG Jianping, SUN Wei. Cross layer cooperation control of wireless sensor communication network applied in smart distribution grid[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(2): 128-136.
- [22] 许川佩, 凌景, 胡聪. 动态带分复用的三维片上网络协同优化研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(12): 2821-2828. XU Chuanpei, LING Jing, HU Cong. Research on collaborative optimization of three dimensional network-on-chip based on dynamic bandwidth division multiplexing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(12): 2821-2828.
- [23] 李贵鑫, 孙卿, 张圣羽, 等. 光接入网中低延迟高能效动态带宽分配算法研究[J]. 聊城大学学报: 自然科学版, 2019, 32(5): 1-6. LI Guixin, SUN Qing, ZHANG Shengyu, et al. Research on dynamic bandwidth allocation algorithms with low delay and high energy efficiency in optical access networks[J]. Journal of Liaocheng University: Natural Science, 2019, 32(5): 1-6.
- [24] 姜晶. 面向大数据应用的自适应带宽分配策略[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(4): 128-132. JIANG Jing. Flexible bandwidth allocation-based data transmission for big data[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(4): 128-132.
- [25] 胡燕妃, 任梦梦, 翟旭平. 一种基于功率和带宽分配的双向协作频谱共享协议[J]. 电子测量技术, 2019, 42(13): 121-126. HU Yanfei, REN Mengmeng, ZHAI Xuping. Two-way cooperative spectrum access based on power and bandwidth allocation[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(13): 121-126.

收稿日期: 2021-03-04; 修回日期: 2021-06-07

作者简介:

方如举(1975—), 男, 教授, 研究生方向为智能电网通信与电气智能控制. E-mail: fangruju@163.com

(编辑 许威)