

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.05.008

引用格式:张永忠,冯穗力.无线 mesh 网的跨层设计及其应用[J].电讯技术,2016,56(5):517-524. [ZHANG Yongzhong, FENG Suili. Cross-layer design for wireless mesh network and its application[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(5):517-524.]

无线 mesh 网的跨层设计及其应用*

张永忠**1,2, 冯穗力¹

(1. 华南理工大学 电子与信息学院, 广州 510006 ; 2. 中国电子科技集团公司第七研究所, 广州 510310)

摘要:根据无线 mesh 网跨层设计的基本原理,分析了跨层设计系统中各模块的功能和各种需要考虑的因素。提出一种综合了无线 mesh 网高效的状态信息交换方法和先进路由算法的跨层设计实现方案,可根据网络当前链路状态、拥塞情况和能量等因素,合理选择传输路径。同时还给出了该方法在电网高压输电监控系统中的应用实例。仿真和实验表明所提方案在实际应用时在强壮性、吞吐量和时延等方面都有良好的性能。

关键词:无线 mesh 网;跨层设计;资源调度管理;能量均衡;高压输电监控系统

中图分类号:TN925.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2016)05-0517-08

Cross-layer Design for Wireless Mesh Network and Its Application

ZHANG Yongzhong^{1,2}, FENG Suili¹

(1. School of Electronic and Information, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. The 7th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation (CETC), Guangzhou 510310, China)

Abstract: According to the basic principles of cross-layer design for wireless mesh network, the functions of major modules and the various factors to be taken into account in the system are analyzed. An implementation scheme of cross-layer design is proposed, in which the efficient method for network state information exchange and advanced routing algorithm are employed. With the method a reasonable transmission route can be determined by the factors including current link states, congestion and energy of the network. A example of the scheme application in a high voltage transmission monitoring system is presented. The simulation and experiment show that the scheme has good performance in robustness, throughput and delay.

Key words: wireless mesh network; cross-layer design; resource scheduling management; energy balance; high voltage transmission monitoring system

1 引言

无线 mesh 网面临的挑战通常包括无线传输链路容易受到各种干扰的影响、节点移动导致网络拓扑结构动态变化、节点能量受限等。极端情况下,需要同时考虑上述各种不利因素^[1]。无线 mesh 网的调度管理和资源优化配置等很大程度上归结为选路问题。目前无线 mesh 网的路由协议主要有两类:一

是先应式路由协议,主要包括节点序列距离矢量协议(Destination Sequenced Distance Vector Routing, DSDV)^[2]、无线路由协议(Wireless Routing Protocol, WRP)^[3]和优化链路状态路由协议(Optimized Link State Routing, OLSR)等;二是反应式路由协议,主要包括无线自组网按需距离向量路由协议(Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing, AODV)、动态源路

* 收稿日期:2015-11-16;修回日期:2016-04-11 Received date:2015-11-16;Revised date:2016-04-11

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2012AA050801)

Foundation Item: The National High-tech R&D Program of China(863 Program)(2012AA050801)

** 通信作者:zyzans@vip.sina.com Corresponding author:zyzans@vip.sina.com

由协议 (Dynamic Source Routing, DSR) 等。前者能够根据网络状态变化适时调整路由表, 转发响应快, 但开销较大; 后者无需定期发送路由交互信息, 开销较小, 但每次连接需要寻路, 时延较大。为了优化网络资源利用, 减少开销及时延, 人们提出了跨层设计的概念, 通过不断收集网络传输需求和运行的状态信息, 合理选择传输路径, 实现网络资源的优化利用。

本文系统地分析了无线 mesh 网跨层设计基本原理和方法, 针对无线 mesh 在电网高压输电线路监控系统中的应用需求, 提出一种结合跨层设计和能量均衡的资源调度方法和路由策略, 给出了仿真结果和工程应用的示例。

2 无线 mesh 网跨层优化设计系统建模

无线 mesh 网的跨层优化设计本质上是一个最优化建模与计算问题, 其基本思路是首先确定反映优化目标的效用函数, 效用函数视不同的优化目标而异, 如可以是系统吞吐量最大、平均时延最小或能耗最低等, 也可以是一个体现若干个优化目标的联合优化函数。网络资源可以被看成是由各种要素, 包括频谱带宽、功率、节点数、节点能量、节点处理能力和缓冲空间大小等组成的一个集合。若用 s 表示网络中某个端到端的数据流, x_s 表示相应的速率; R_{es} 表示一个单位数据流 s 需要使用某一个资源 e 的数量, C_e 表示某一个资源 e 拥有的总的有限容量, $U_s(x_s)$ 表示所设定的效用函数, 跨层设计方法的优化问题可以表达为如下一般形式^[4-5]的优化问题:

$$\begin{cases} \max \sum_{s \in S} U_s(x_s) & \text{s. t. : } \sum_{s \in S} R_{es} \cdot x_s \leq C_e, \\ x_s \geq 0, \forall e \in E. \end{cases} \quad (1)$$

根据具体建模后优化问题的具体表达式, 可以进一步分为凸问题和非凸问题。凸问题一定有最优解, 主要考虑的是如何降低计算复杂度。非凸问题的求解较为复杂, 目前仍有不少研究是关于如何求解非凸问题的。某些非凸问题可以通过变换, 变为某种限定条件下凸问题来求解, 还有一些则可通过拉格朗日对偶转化来求这些问题的次优解。大量的研究集中在如何采用智能计算方法, 如模拟退火算法、遗传算法、蚁群算法等来求解非凸问题^[4-7]。

采用跨层设计的无线 mesh 网优化过程是动态循环的, 主要包括三个阶段: 一是网络状态信息获取, 收集包括拓扑结构变化、信道特性、拥塞和能量情况等状态信息, 并将信息汇聚到控制中心或者交换到网络中进行分布式控制的各个节点; 二是优化计算, 根据优化目标和当前网络状态及相应的约束条件, 计算得到新的资源配置调整结果, 如新的路由表等; 三是控制信息发布与配置, 对于采用集中控制方式的 mesh 网络, 需要将控制信息发布到各个需要调整工作参数的节点; 对于采用分布式控制的 mesh 网络, 各节点可直接计算得到结果, 并对节点工作参数进行新的配置。对于一个典型的分布式控制的无线 mesh 网跨层设计系统, 每个节点上的功能模块和相互间的关系如图 1 所示。每个节点定期或不定期地获取网络中各个节点在各层中的状态信息并存放到节点的网络状态信息库中, 策略库中可预设网络运行的各种参数, 如节点是否是使用再生能源供电、选用何种路由策略、优化过程考虑什么约束条件等。为降低系统运行时的计算复杂度, 在应用时可以根据具体情况对系统优化问题进行简化。

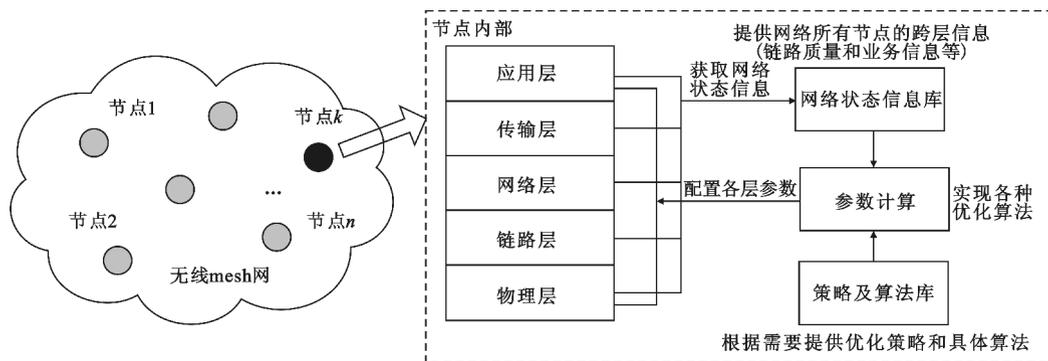


图 1 无线 mesh 网跨层设计功能模块

Fig. 1 The cross-layer design function block for wireless mesh network

在采用跨层设计的无线 mesh 网中, 要保证系统的高效运行, 最关键的是要保证在各个节点间能够及时有效地获取自身的状态信息和交换其他节点

的状态信息。无线 mesh 网的物理层和链路层可以采用面向连接的工作机制, 如 IEEE 802.16 mesh 的工作模式; 也可以采用非面向连接的工作机制, 如

IEEE 802.11 mesh 的工作模式。在我们设计路由协议 CLWRP (Cross-layer Wireless Routing Protocol) 中,节点间主要通过 HELLO 和拓扑控制 (Topology Control, TC) 两种消息来交换网络状态信息,其中 HELLO 消息用于建立节点的邻居表,通过周期性广播和侦听 HELLO 消息,获取两跳拓扑内所有邻居节点和二跳邻居节点的信息。HELLO 分组只在一跳的范围广播,不被转发。TC 消息则用于交换全网络中的部分或者全部节点的全层状态信息。

每个节点所包含的具体功能模块和相互之间关系如图 2 所示。当有报文到达时,根据不同的报文类型做相应的操作:

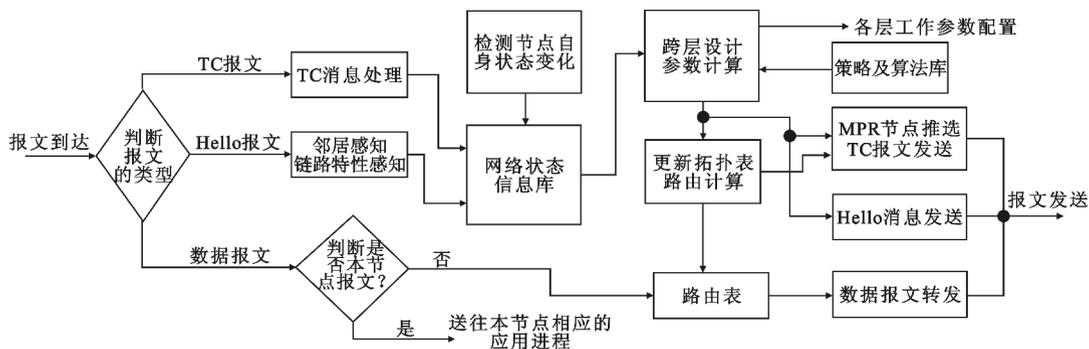


图 2 功能模块间的关系
Fig. 2 The relationship among function blocks

跨层设计的参数根据当前网络状态信息库中的信息和策略及算法库预设的方法来决定。参数更新的间隔则主要由网络的状态变化情况而定,一般情况下可以周期性更新,遇到网络较大的状态变化时,如链路故障或拥塞时,则可立刻发送更新的信息。获得新的跨层设计参数后,可对本节点相应层的工作参数进行调整;对于网络层来说,主要涉及拓扑结构的调整和路由表更新;同时本节点的状态或参数变化情况也通过 TC 消息方式通告网络中的其他节点。CLWRP 路由协议中 TC 报文的交换方式,采用了 OLSR 路由中多点中继的机制和自适应朦胧视觉的发布策略,由此可以最大限度地节省传递 TC 消息的开销。

3 跨层设计与能量均衡

3.1 CLWRP 的跨层设计与综合路由策略

CLWRP 路由协议采用的跨层设计方法,综合采用了如下 3 种技术:

(1) OLSR 中的多点中继 (Multi-Point Relay,

(1) 普通数据报文,进一步确定是否发送到本节点的报文,若是,则送到相应的应用进程;若不是,则进行转发。

(2) HELLO 报文,则可据此判断邻居节点和相应链路的工作状况,由此可维系网络节点间可达的拓扑结构;

(3) TC 报文,则从中可以得到网络的状态信息,如节点的端口数及端口的连接状态、可用的射频信道以及信道特性、节点的拥塞情况,还可以包括应用层所需传输的类型和业务量以及相关节点能量储备等,节点自身状态则可以从不同功能的层中直接获取。

MPR) 技术

每个发送 TC 消息的源节点,如图 3 所示的节点 A,会将 TC 消息发往所有的一跳节点,但对二跳节点不再采用传统洪泛方式,只有被节点 A 选中为 MPR 节点的一跳节点才会转发 TC 消息,MPR 节点选取原则是其能够连接最多的下一跳节点(如图中 H、I、J 和 K),MPR 机制可节省大量的传输资源。

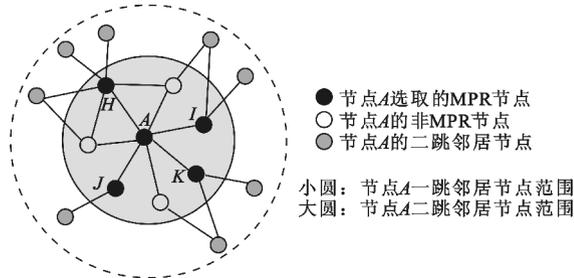


图 3 多点中继示意图
Fig. 3 The multi-point relay diagram

(2) 自适应朦胧视觉 (Adaptive Hazy Sighted Link State, A-HSLS) 技术

A-HSLS 算法是一种仿生鱼眼的方法。鱼眼对

于其附近的视觉是清晰的,而对于远处则是模糊的,鱼通常关注其周围的情况。A-HSLS 算法将 TC 消息进行分类,不同类别的 TC 消息发布的范围不同。当节点的位置瞬间有变化时,或者其邻居节点探测到其变化时,会及时通过 TC 消息告知周围节点。但这些频繁发送 TC 消息并不是每次都扩散到全网,发布到全网的 TC 消息相对周期较大。这样既可以使拓扑的变化最终传遍全网中的各个节点,同时也不会使得 TC 消息报文占据过多传输资源。合理选择 A-HSLS 算法中不同类别的 TC 消息发布范围可保证无线 mesh 网在网络状态频繁变化的环境下仍能高效工作。

图 4 给出了一个示例,当节点 D 的位置发生移动时,附近的节点首先感知其变化,感知到变化后的相邻节点会立刻修改到该节点的路由,因为这些突变产生的 TC 消息发布范围较小,因此变化后的拓扑信息逐步才会扩散到全网。在此期间,若节点 S 有报文要发送给节点 D ,当其未察觉节点 D 的位置已经发生变化时,依然会选择原来的传输路径 $S-A-B-C-D$;因为靠近 D 的节点会首先知道 D 位置的变化,例如此时节点 B 已经发现了 D 的移动,会自动修改路由,使得最终的路径为 $S-A-B-E-D$ 。A-HSLS 算法很好的利用了实际系统中任何一个节点短时间内都不可能发生大的位置突变的特点,所采用的网络张贴信息发布策略大大减少了无线 mesh 网在动态环境下的路由信息传输开销。

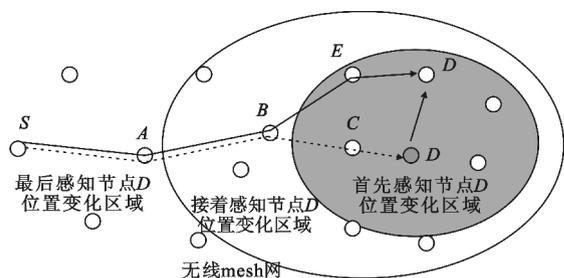


图 4 A-HSLS 算法工作示意图

Fig. 4 The adaptive hazy sighted link state algorithm diagram

(3) 跨层设计技术

在 CLWRP 路由协议中,通过跨层设计各层的功能模块,可周期性地获取自身和通过 TC 消息得到网络中其他节点的状态信息,这些数据汇聚到节点中的网络状况数据库后,便可进行各层工作参数的计算。其中,最关键的路由选择度量值的计算公式可以抽象表示为

$$m = f(n_{\text{Hop}}, R_{\text{LData}}, Q_{\text{Size}}, P_{\text{PError}}, E_{\text{Power}}, \dots) \quad (1)$$

式中: m 是路径选择的综合判据; n_{Hop} 是路径跳数; R_{LData} 是路径可达速率; Q_{Size} 是路径上节点队列长度; P_{PError} 是误包率; E_{Power} 是路径上节点储能大小。在必要的时候,选路时还可考虑所传输数据的业务类型。在实际系统中,跨层设计需要考虑优化的指标和选路时考虑的因素视不同情况而定。例如,某节点属车载设备,能耗不是重要的因素,在参数中可去掉 E_{Power} 项。 $f(\cdot)$ 是一个多元的函数,函数的形式和各变量参数对路由选择影响的大小会因不同的需求而异。理论上最佳的路径要通过最优化的方法确定,为易于工程应用, $f(\cdot)$ 可以采用加权和函数形式,此时式(1)可以选择以 m 最小作为选路的依据:

$$m = \omega_1 \cdot n_{\text{Hop}} + \omega_2 \cdot R_{\text{LData}}^{-1} + \omega_3 \cdot Q_{\text{Size}} + \omega_4 \cdot P_{\text{PError}} + \omega_5 \cdot E_{\text{Power}}^{-1} + \dots \quad (2)$$

式中: ω_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$, n 是参数的个数), 且有 $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$ 。

每个加权系数有特定的量纲,将每个所考虑的参数转换为没有量纲的度量值。通过改变权重因子可以调整不同参数对路由判据的影响。

式(1)也可以以某种算法的形式实现,给定传输要求后,对需要考虑的因素或条件逐一分析,以寻求合理的传输路径。例如,可以先按照经典的 Dijkstra 路由算法计算得到的跳数最小的路径,然后判断路径上瓶颈链路的可用带宽 R_{LData} 、误包率 P_{PError} 是否满足要求、是否有节点拥塞以及节点上的能量是否充足等,如果不满足要求,再考虑下一跳数较小的路由,直到找到合适的路径。

3.2 能量均衡与节点工作状态控制

能量均衡问题可作为跨层设计优化的一个子问题。有许多无线 mesh 网的应用场合,如本文后面讨论的其在电网输电监控系统中应用的场景,因为采用再生能源(如太阳能或风能)供电,能量的供给不是很稳定,需要考虑信道的大尺度衰落特性和系统能量均衡问题。因为节点位置一般固定在高压输电塔上,节点间的信道特性主要受大尺度衰落的影响,此时接收信噪比特性可以表示为

$$\gamma_i = \frac{G_0 P_{t_i}}{N_0 d_i^k} \quad (3)$$

式中: d_i 表示链路 i 所对应的发送端与接收端间的距离; k 是衰减因子; G_0 表示天线增益; P_{t_i} 是发送功率; N_0 是噪声功率。可见此时节点间的距离是影响传输性能的主要因素。链路 i 的权值可定义为

$$w_i = \sqrt{d_i^k} \quad (4)$$

作为判决依据的源节点到目的节点之间的路径 p 权值的和则为

$$W_p = \sum_{i \in p} w_i = \sum_{i \in p} \sqrt{d_i^k} \quad (5)$$

根据分析^[6],采用节点发射功率受限和剩余能量最大化的联合优化模型时,可得到节点之间链路权值为

$$w_i = \sqrt{d_i^k / E_i} \quad (6)$$

式中: E_i 是链路 i 的发送节点所剩余的能量。由此得到源节点到目的节点之间的路径 p 的权值计算公式为

$$W_p = \sum_{i \in p} w_i = \sum_{i \in p} \sqrt{d_i^k / E_i} \quad (7)$$

进一步地,可以根据确定最短路径的 Dijkstra 定理来选择能效最高的最佳传输路径。

在实际系统中为避免频繁的操作,只有当剩余能量的变化达到一定的程度时,才会触发产生状态变化的信息。图 5 给出了一种节点剩余能量分级的方法,把剩余能量多少分为若干等级。每下降一个等级或上升一个等级时,才会触发路由 TC 消息的更新过程。因为在采用再生能源时,充电和耗电同时进行,剩余能量的大小变化可能会产生抖动,为避免由于抖动导致频繁地发布 TC 消息,可采用所谓余量滞后机制。当能量的增大变化超过一个等级,触发产生 TC 消息的发布后,只有当能量的减少达到预先设定的滞后变化量 ε 时,才会触发产生 TC 消息。 ε 主要根据经验值确定,仿真和实验中采用的是最大能量值的 3%。

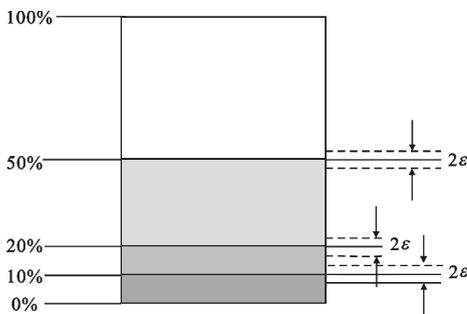


图 5 能量等级与滞后变化量

Fig. 5 The energy grade and delay of variable quantity

为保证节点有效工作,设置了如下不同储能等级,采取了在不同等级下允许传输不同类型业务数据的控制策略。

(1) 正常状态:节点的剩余能量大于 50% 视为处于正常状态,此时可以响应控制中心获取各类信息的要求,传输包括视频、图片和文本数据等业务

数据。

(2) 控制能耗状态:节点的剩余能量小于 50%、大于 20% 处于控制能耗状态。此时节点响应控制中心要求图片和文本数据的要求,但拒绝大数据量的传输视频信号的要求。

(3) 告警状态:节点的剩余能量小于 20%、大于 10% 时则进入告警状态。处于告警状态的节点可以响应控制中心传输重要数据的要求,拒绝类似视频和图片等较大数据量业务传输要求。

(4) 休眠状态:节点的剩余能量小于 10% 自动进入休眠状态。处于休眠状态的节点仍可接收中心的控制信息、交换 TC 消息等,但一般不响应其他的请求。

依剩余能量分级的方法使得节点可根据自身的状况自动调整工作状态,在保证系统不崩溃的情况下最大限度的发挥系统效能。在应用过程中,上述有关不同工作状态的门限也可以在控制中心根据需要进行必要调整。

3.3 跨层设计与能量均衡的方法在电网高压输电监控系统中的应用

无线 mesh 网在电网高压输电监控系统中的应用的情形如图 6 所示,网络呈现某种带状的结构。每经过若干个太阳能供电的无线节点,设置一个连接骨干网的网关(Gateway, GW)节点。为保证系统的强壮性,避免因某个节点失效导致系统崩溃,在硬件设计时保证每个节点的无线信号覆盖范围可达至少两个节点。因为大多数非网关的节点都是采用太阳能供电,因此设计时主要目标就是要在最恶劣的天气情况下也能保证基本业务数据的传输。因为节点间的位置固定,相互间的距离是已知的。每个节点会周期地交换 TC 消息,此外一旦储能变化达到一个不同的等级,会触发向全网发布一个相应的 TC 消息,因此每个节点都可以知道节点间的距离和较快地了解各节点的储能情况。对于每个节点来说,有报文需要发送或者转发时,可根据式(6)确定各链路的权值,同时根据权值和的大小来决定传递的路径,包括采用跨越一个节点还是两个节点以及选择带状结构中左侧网关或是右侧网关。本系统设计中还增加了通过控制中心来实现系统选路和配置的工作方式。此时无线 mesh 网中每个节点将原来仅在节点间交换的 TC 消息转发到控制中心,由控制中心来决定传输的业务、路由方式和传输资源的分配,使得系统很容易过渡到未来的软件定义网络(Software Definition Network, SDN)的工作模式。

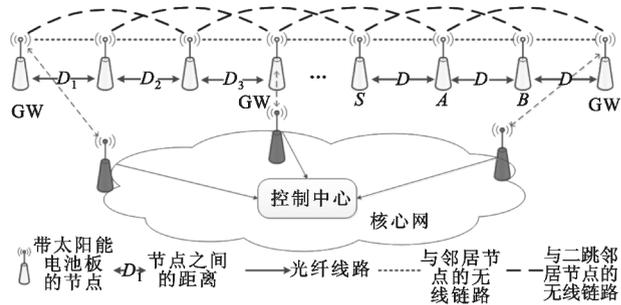


图6 无线 mesh 网在电网高压输电监控系统中的应用
 Fig. 6 The wireless mesh network application in high voltage transmission monitoring system

4 仿真与实验结果分析

4.1 性能仿真及结果分析

网络仿真软件的平台为 NS2, 仿真范围 $1\ 500\text{ m} \times 1\ 500\text{ m}$, 通信距离 250 m , 链路层和物理层为 IEEE 802.11 mesh, 仿真时间 150 s 。拓扑结构如图 7 所示, 其中节点用数字编号, 节点外的大圈表示相应节点无线信号可有效工作的范围。

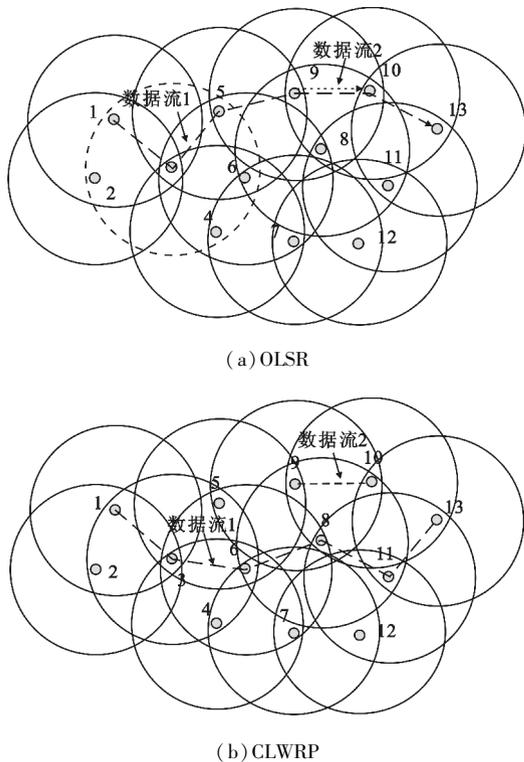


图7 无线 mesh 网仿真拓扑结构
 Fig. 7 The simulation topology structure of wireless mesh network

仿真主要比较 CLWRP 路由算法和简单的根据跳数选路的 OLSR 路由算法的性能, 仿真过程中设计了两个数据流: 数据流 1 的源节点和目的节点分别为节点 1 和节点 13; 数据流 2 的源节点和目的节

点分别为节点 9 和节点 10。图 7(a) 是根据 OLSR 算法选路得到的传输路径, 因为仅仅根据跳数来选路, 两个数据流的传输路径分别为 1-3-5-9-10-13 和 9-10, 在节点 9 和节点 10 的路径间出现重叠, 但简单的 OLSR 路由算法无法判断该段路径上出现瓶颈路径。图 7(b) 是采用 CLWRP 路由算法在网络状况发生变化后重新选路的结果, 由于在跨层设计中引入了节点链路层中的队列长度作为选路的参数之一, 因此可以发现节点 9 到节点 10 间出现瓶颈路径, 通过重新选路可使数据流 1 成功地避开该路径。

仿真所得的吞吐量特性如图 8 所示, 在 50 s 之前, 仅有数据流 1, CLWRP 路由算法选择路径 1-3-5-9-10-13 发送报文, 此时与采用 OLSR 算法选择的路径一样。 50 s 之前两条曲线是重叠的; 50 s 之后, 数据流 2 产生, 网络在路径 9-10 之间出现瓶颈, CLWRP 通过跨层模块获取到节点 9 到节点 10 上的链路状态信息后, 重新计算路由, 使数据流 1 经由 1-3-6-8-11-13 传输, 而数据流 2 保持原来的路径不变, 此时系统的吞吐量得到了显著提高。图 9 给出了相应的报文的时延特性, 随着瓶颈路径的出现, 时延开始增大, 但采用 CLWRP 路由算法从第 20 000 个报文开始, 通过跨层设计调整路由, 使得时延回归到较低的水平。

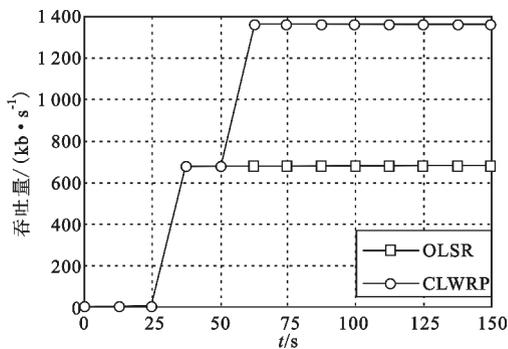


图8 吞吐量特性
 Fig. 8 The throughput characteristic

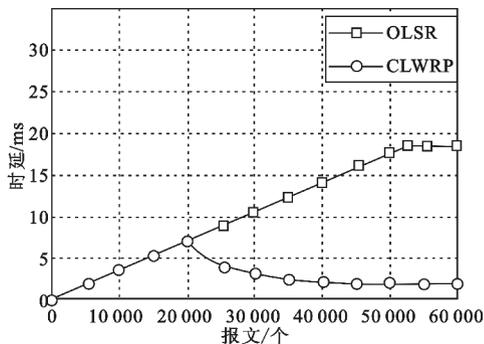


图9 时延特性
 Fig. 9 The delay time characteristic

4.2 基于剩余能量的跨层设计仿真结果分析

在分析基于剩余能量的系统性能时,考虑应用于高压输电线路监控系统的场景,如图 10 所示,此时无线 mesh 网呈现带状的结构,其中节点 1, 2, …, 10 是安装在高压输电线路塔架上的节点,由太阳能电池供电;节点 3 和 8 是作为无线 mesh 网进出口的两个网关节点,可分别通过一跳连接到有线骨干网的网关节点 A 和节点 B。每个无线 mesh 网的节点有两级的发射功率,可分别覆盖一跳或两跳的节点,例如节点 8 的一跳信号可以覆盖相邻的 7 和 9,两跳信号可以覆盖节点 6、7、9 和 10。

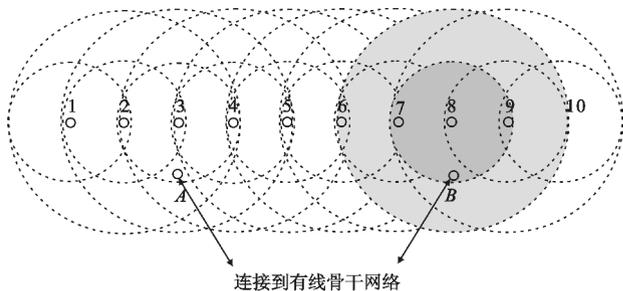


图 10 带状结构的无线 mesh 网

Fig. 10 The wireless mesh network ribbon structure

假定每个节点射频信号发送为每个节点能耗的主要因素。正常工作情况下,每个节点总是采用一跳的传输方式。其中节点 1、2、4 和 5 选择节点 3 为连接到控制中心的有线骨干网络的网关节点;节点 6、7、9 和 10 选择节点 8 为网关节点。但网络中节点的能耗是不均衡的,因为网关节点和靠近网关的节点需要更多地转发报文,因此能耗较大。此时除了在网关节点上配置强大的再生能源外,还可以根据能量均衡的策略调整,使得距离网关较远的节点更多地启用两跳的发射模式,使得能耗可以得到更好的均衡。图 11 给出了没有考虑剩余能量和考虑剩余能量进行选路以及没有充电和有充电工作模式下,可能成为瓶颈节点 7 或 9 上能量消耗的特性,当采用考虑剩余能量的选路策略时,其能耗有较显著的降低,因此能够保证网络系统更稳定可靠地运行。

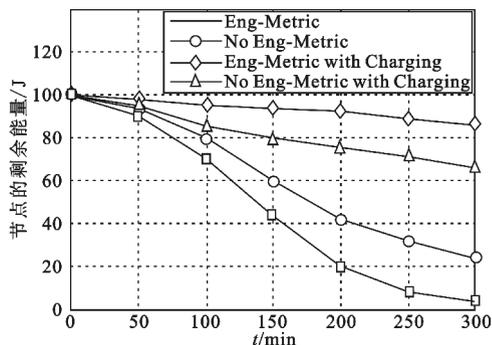
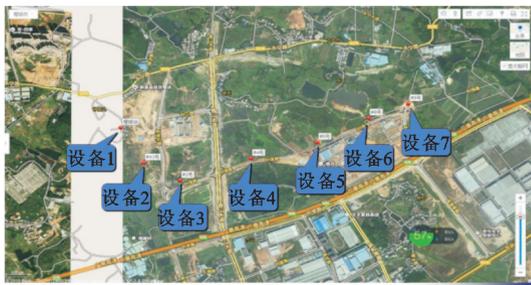


图 11 能量变化特性

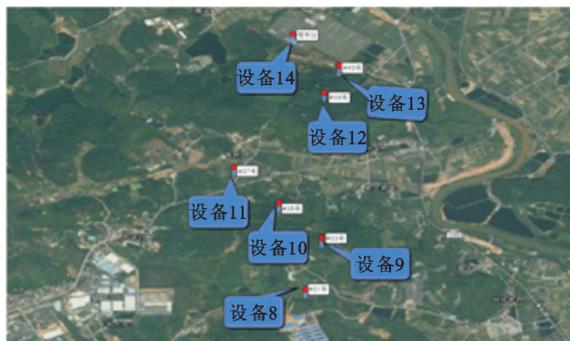
Fig. 11 The energy variable characteristic

4.3 系统的实验验证

本文所提出的跨层设计方法应用到了南方电网某示范工程上,该工程的两段线路如图 12 所示。图中无线 mesh 设备不仅作为视频摄像头和各类传感器的接入点,同时也可作为视频数据和传感器数据的转发节点。在开阔的区域上,单跳 4.5 km;单跳 1 km 可达 40 Mb/s;单跳 PING 时延小于 1 ms,经过 6 跳 PING 时延大约为 2 ms。网关汇聚节点一般选取变电站取电,子节点太阳能电池容量约为 200 A·h。综合实验表明系统在不同的天气状况下可稳定运行,获取的监控数据可及时汇集到控制中心,达到了系统的设计要求。



(a) 线路 1



(b) 线路 2

图 12 系统示范工程组网示意图

Fig. 12 The network diagram of system demonstration project

5 结束语

本文介绍了无线 mesh 网跨层设计的基本原理,重点研究了跨层设计的方法在实际系统中具体如何应用。文中提出的方法综合了现有无线 mesh 网路由算法的主要优点,考虑了实际系统中可能出现的各种主要因素和问题,因此所揭示的原理和方法具有较好的一般性。与现有的工作相比,本文提出的网络跨层信息交互与原有路由信息交换结合实现的方法,可更好地降低网络的开销;同时将跨层设计实现网络资源优化调度利用问题,归结为综合各种因素的度量值计算和传输路径选择,使得其在工程应用中更容易实现,因此具有很好的实际意义。文中通过仿真实验说明了这些方法的优点,并在实际的电网高压输电无线监控系统的应用中验证了其有效性。有关本课题下一步将研究网络规模较大时,网络状态信息交互时延变化对网络性能的影响以及在跨层设计时如何引入网络空间安全等问题。

参考文献:

- [1] HOSSAIN E, LEUNG K K. 无线 Mesh 网络架构与协议 [M]. 易燕, 李强, 刘波, 等, 译. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- HOSSAIN E, LEUNG K K. Wireless Mesh Network Architecture and Protocol [M]. Translated by YI Yan, LI Qiang, LIU Bo, et al. Beijing: Machine Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [2] PERKINS C E, WATSON T J. Highly dynamic destination sequenced distance vector routing (DSDV) for mobile computers [C]//Proceedings of ACM SIGCOMM_94 Conference on Communications Architectures. London: IEEE, 1994: 234-244.
- [3] GARCIA-LUNES-ACEVES J, MURTHY S. A path-finding algorithm for loop-free routing [J]. IEEE ACM Transactions on Networking, 1997, 5(1): 148-160.

- [4] FENG W, FENG S, DING Y, et al. Prediction-based cross-layer resource allocation for wireless multi-hop networks with outdated CSI [J]. IEICE Transactions on Communications, 2014, 97(4): 746-754.
- [5] FENG W, FENG S, DING Y, et al. A new interference-aware routing metric for wireless mesh networks [C]//Proceedings of 2013 IEEE 8th International Conference on Communications and Networking in China. Guilin: IEEE, 2013: 479-482.
- [6] DING Z G, LEUNG K K. Cross-layer routing using cooperative transmission in vehicular ad-hoc networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(3): 571-581.
- [7] 郭科, 陈聆, 魏友华. 最优化方法及其应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- GUO Ke, CHEN Ling, WEI Youhua. The optimization method and its application [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007. (in Chinese)

作者简介:



张永忠(1970—),男,安徽寿县人,2003年获硕士学位,现为研究员、博士研究生,主要研究方向为通信系统与智能感知技术;

ZHANG Yongzhong was born in Shouxian, Anhui Province, in 1970. He received the M. S. degree in 2003. He is now a senior engineer of

professor and currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns communication system and intelligence sensing.

Email: zyzanis@vip. sina. com

冯穗力(1955—),男,广东梅州人,教授、博士生导师,主要研究方向为信息网络理论与技术。

FENG Suili was born in Meizhou, Guangdong Province, in 1955. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns information network theory and technology.