

文章编号:1000-582X(2013)02-051-05

无线 mesh 网络的动态品质优化分析

黄 东,田逢春,冶学亮,柏 崧,叶 蕾

(重庆大学 通信工程学院,重庆 400044)

摘 要:为获得全控型无线 mesh 网络的最优控制品质,首先分析影响全控型无线 mesh 网络控制品质的因素主要为网络时延,而为了获得较好的控制品质必须取得最小的网络时延,建立了最小网络时延的相关优化模型,并应用分支边界算法求解,最后通过相关数值计算和仿真分析,由仿真结果可知通过调节网络节点个数和数据流成功获得信道的概率以及任意节点获得信道后传输成功的概率降低网络时延,从而明显改善整个全控型无线 mesh 网络的控制品质。

关键词:无线 mesh 网络;时延;优化

中图分类号:TN925+.92

文献标志码:A

Analysis on the optimum dynamic quality of wireless mesh network

HUANG dong, TIAN Fengchun, ZHI Xueliang, BAI Song, YE Lei

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: In order to procure the optimum quality of control for full-controlled wireless mesh network, the primary influencing factor network time delay is analyzed. In order to get the optimum quality of control, the minimum network time delay should be acquired, and the algorithm of branch and bound is given to solve this problem. According to the numerical simulation, the quality of control for the whole network system with decreasing the delay time can be optimized by adjusting the number of nodes, the average transmission hop counts, and the probability of successful channel access and transmission for random nodes.

Key words: wireless mesh network; time delay; optimization

MN 应用发展系统随着通信技术的发展,无线 mesh 网络(wireless mesh network, WMN)在军事和民用领域有着广泛的应用。其具有灵活的网络结构,支持网络信道容量和覆盖范围的动态配置;自组织(self-organizing)、自生成(self-creating)和自管理(self-administering),支持网络容错能力;同时可提供多种通信业务带宽保证能力^[1]。

然而无线 mesh 网络面临无线资源的时变性、耦合性等技术难题,其存在时变性和不确定性的同

时,也提供了灵活的可调节性和可控制性。虽然无线 mesh 网络在不同层面上独立开展了相应的业务和网络传输层面的控制方法和技术,但缺乏跨层关联、其控制目标往往相互冲突,尤其是没有考虑到网络控制的能力和动态品质,为提高无线 mesh 网络的 QOS 保障能力,有必要通过无线 mesh 网络与网络控制系统(network control system, NCS)的无缝结合^[2],建立一种全控型无线 mesh 网络,实现无线 mesh 网络跨层面的统一控制。全控型无线 mesh 网

收稿日期:2012-08-12

基金项目:国家 863 资助项目(No. 2008AA01Z202);国家自然科学基金资助项目(No. 60872038);重庆大学“211 工程”三期创新人才培养技术建设项目(No. S-09102),中央高校基本科研业务费资助项目(No. CDJRC10160005)

作者简介:黄东(1981-),男,重庆大学博士,主要从事无线网络方向研究,(Tel)18680813660;(E-mail)chenyijia000011@163.com。

网络的节点由三种功能实体组成,分别为“业务承载”、“网络控制”和“测量与认知”。这些分布在网络节点中的功能实体组成“无线 mesh 网络”、“控制网络”和“测量/认知网络”。如图 1 所示,这 3 个功能网络建立了网络控制系统。其中,“无线 mesh 网络”是 NCS 的被控对象,而“控制网络”和“测量/认知网络”则分别是 NCS 的控制器网络和观测器网络。

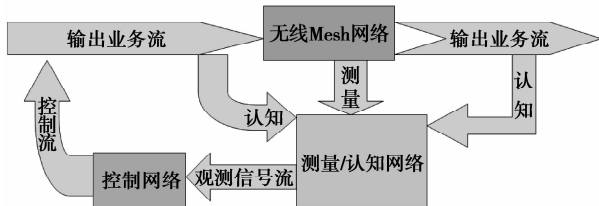


图 1 全控型无线 mesh 网络的功能实体网络关系

由于全控型无线 mesh 网络存在时间性、稳定性等问题,因此需保证无线 mesh 网络在相应条件下的动态控制品质,首先开展了无线 mesh 网络的建模研究,其次,分析了影响全控型无线 Mesh 网络的控制品质的主要因素——网络时间延迟,为获得最优的网络时延,通过对全控型无线 mesh 网络的时延进行优化建模,并通过相应的分支边界算法对其求解,最后通过仿真和实例对算法进行了验证,并分析了其相应条件下的控制品质。

1 全控型无线 mesh 网络控制品质影响因素分析

衡量单个无线 mesh 的控制品质,可以采用误差泛函积分评价指标来评判^[3]

$$IAE_i(e; \text{seq}[\tau_i(k)]) = L_i \sum_k |e(k)| \cdot T_i。 (1)$$

上式表示第 i 个网络回路在随机网络时延序列作用下产生的绝对误差累积值。它是以控制系统的瞬时误差函数 $e(k)$ 为泛函的积分评价,IAE 值越小,系统的控制品质亦即控制性能(被控对象受扰动后偏离平衡点的程度)越好。

由于单个回路的控制品质会因随机时延序列的不同而改变,因此单个回路的性能并不能代表整个无线 mesh 网络的控制性能,为反映系统整体的控制品质,可采用如下多路归一化控制品质性能指标^[3]

$$QOC(e; \text{seq}[\tau_i(k)]) = \frac{1}{\sum_{i=1}^N IAE_i(e; \text{seq}[\tau_i(k)])} - \frac{1}{\sum_{i=1}^N IAE_i(e; \max[\tau_i(k)])}$$

$$\frac{1}{\sum_{i=1}^N IAE_i(e; \min[\tau_i(k)])} - \frac{1}{\sum_{i=1}^N IAE_i(e; \max[\tau_i(k)])} (2)$$

其中 $\sum_{i=1}^N IAE_i(e; \max[\tau_i(k)])$ 和 $\sum_{i=1}^N IAE_i(e; \min[\tau_i(k)])$ 表示 N 个控制回路在各自的最大时延序列和最小时延序列作用下的绝对误差累积总和。通过分析可得此函数的取值范围为 $(0, 1)$, 并且网络时延 τ 越小, $QOC(e; \text{seq}[\tau_i(k)])$ 取值越大, 表明整个全控型无线 mesh 网络的控制品质越好。

2 无线 mesh 网络延迟优化

2.1 延迟优化分析

为保证全控型无线 mesh 网络的控制品质最佳,须使得获得最小的网络时延。通过构建用于分析时延的无线 mesh 网络系统拓扑模型^[4-5],从网络的链路中寻找数据流量、节点数以及其它相关因素与网络时延之间的关系,建立相关优化模型,从而解决无线 mesh 网络系统中时延的优化问题,进而使得全控型无线 mesh 网络的控制品质最佳。无线 mesh 网络节点间数据流如图 2 所示。

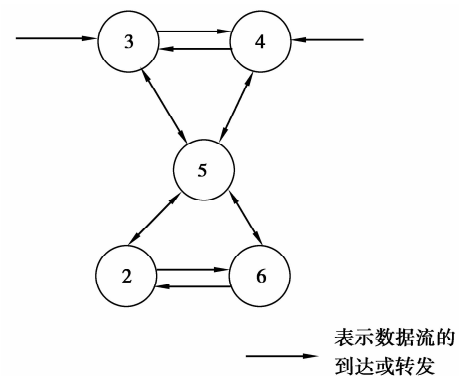


图 2 无线 mesh 网络节点间数据流示意图

无线 mesh 网络中的延迟主要由数据流在节点中的排队等待时间 D_q 和数据流到达队列头后竞争获得信道并被成功传送的时间 D_p 以及网络节点中用于接收或存储转发数据流的时间 D_s 3 个部分组成^[6]：

1) D_q : 数据在网络节点排队以等待传送所造成的时间延迟,在无线 mesh 网络中,由于同一个节点可能在某一时刻会有多个数据包信息等待着发送,如果按照一定的原则或者优先级定义的准则,那么某些数据包信息就必须在该节点的发送存储队列中等待,直到轮到其可以发送为止。节点中的队列等待时延 D_q 就是有上述原因造成的,它的大小主要取

决于网络中的传输协议和节点的数目。

由于在多级无线 mesh 网络中的各级回路的队列延迟具有相同分布,因此可采用各级回路中的延迟函数均值描述队列延迟,结合 erlang 公式和相关文献[7-8],在多级回路中采用 M/M/S 模型的服务模型,因此在保证网络 QoS 的条件下,在无线 mesh 网络回路中具有多个流时的最小延迟优化问题可表示为

$$\begin{aligned} \text{minimize } D_q &= \frac{1 + \frac{(1-y)(y)^s}{(s-1)!(s-y)}}{(s-y)} \frac{y}{\lambda}, \quad (3) \\ \text{s. t. } &0 \leq y \leq c, \end{aligned}$$

其中 c, s, λ 为常量, y 是变量表示网络中各级回路流

量的期望值, c 为链路容量, $y = \frac{\sum_{i=0}^R ix^i}{R+1}$, x^i 为第 i 级网络回路中的流量, $x^i \geq 0, i=1 \cdots R, R$ 为网络中回路的级数, s 为网络中节点个数, λ 为数据的到达速率。

2) D_p : 数据流在网络通道中传播所造成的时间延迟,在单个节点中,数据流在网络通道中传播所造成的时间延迟等同于数据包竞争获得信道并被成功传送的时间,由于无线 mesh 网络具有多跳特性,因此数据流在网络通道中传播所造成的时间延迟等同于数据流在单个节点中传播所造成的时间延迟的 η 次叠加,其中 η 为无线 mesh 网络的平均传输跳数。在单节点 k 中,数据包竞争获得信道并被成功传送的时间 D_p 由数据流获得信道的概率决定。考虑其统计特性,通过计算可得其均值为

$$\begin{aligned} E(D_p) &= \eta \sum_{j=0}^m ((T + jT_c)(1 - P_k q)^j) = \\ &\eta \frac{1 - (1 - P_k q)^{m+1}}{P_k q} T + \eta T_c (1 - P_k q + \\ &(m - mP_k q - 1)(1 - P_k q)^m). \quad (4) \end{aligned}$$

其中: T 是在第 j 次发送数据时被成功发送的时间; jT_c 为在第 j 次发送之前花费的时间。 q 为任意节点获得信道后传输成功的概率, $(1 - P_k q)^j$ 为数据帧第 i 次发送失败的概率, m 为最大重传次数,相应的在一个包含 s 个节点的网络中,其延迟均值为 $sE(D_p)$ 。

数据流获得信道的概率 P_k 是影响网络延迟的重要因子, P_k 随与之竞争信道的节点数增多而减小。只要某一路由节点的 P_k 很小,网络延迟将迅速增大^[9]。

3) D_c : 网络节点中用于计算需要传送的信息所造成的时间延迟,由于在网络中,各节点需对到来的

信息进行存储转发,因而需要占用相应的处理时间,然而计算处理芯片的运算速度较快,与其它原因造成的网络时延相比,节点的计算处理时延 D_c 一般较小,因此可忽略不计。

在无线 mesh 网络中数据传送所需的平均网络时延 D_L 可以用下式来描述

$$E(D_L) = E(D_q) + sE(D_p). \quad (5)$$

由式(2)可知,要提高整个全控型无线 mesh 网络的控制品质,须使 $E(D_L)$ 最小,有

$$\begin{aligned} \text{minimize } E(D_L) &= E(D_q) + sE(D_p) = \\ &\frac{(s-1)!(s-y) + (1-y)y^s}{(s-1)!(s-y)^2} \frac{y}{\lambda} + \\ &s\eta \left[\frac{1 - (1 - P_k q)^{m+1}}{P_k q} T + T_c (1 - P_k q + \right. \\ &\left. (m - mP_k q - 1)(1 - P_k q)^m) \right], \quad (6) \\ \text{s. t. } &0 \leq y \leq c, 0 < P_k < 1, 0 < q < 1, \end{aligned}$$

其中 $c, s, \lambda, m, T, T_c, \eta$ 为常量, c 链路容量, y, P_k, q 为变量。

2.2 优化算法分析

上述优化问题(6)是一个非线性分式规划问题,可采用分支边界算法^[10-11]求解。

因 $E(D_q)$ 和 $E(D_p)$ 是相互独立的,因此可先计算 $E(D_q)$ 的最小值, $E(D_p)$ 的最小值可用相同的办法求解, $\min E(D_q)$ 可由式(7)表示。

$$\begin{aligned} \min f(y) &= \frac{1}{s-y} + \frac{(y-1)^2}{(s-1)!(y-s)^2} \times \frac{-y}{\lambda(y-1)} \times y^s. \\ &\quad (7) \end{aligned}$$

$$\text{s. t. } y \in Y = \{y | 0 \leq y \leq c\},$$

$$\begin{aligned} \text{令, } \frac{y-1}{y-s} &= \exp(z_1), \frac{y}{y-1} = \exp(z_2), y = \exp(z_3), \\ \frac{1}{s-y} &= \exp(z_4). \end{aligned}$$

则,

$$\begin{aligned} f(z) &= \sum_{j=1}^T t_j \exp\left(\sum_{i=1}^m \alpha_{ij} z_i\right) + \sum_{j=T+1}^p t_j \exp\left(\sum_{i=1}^m \alpha_{ij} z_i\right) = \\ &\exp(z_4) + \frac{1}{(s-1)!} \exp(2z_1 + z_2 + sz_3). \end{aligned}$$

采用双层线性方法,得其逼近松弛线性规划为

$$\begin{aligned} \min LF(y) &= \sum_{j=1}^T LF_j^1(y) + \sum_{j=T+1}^p LF_j^2(y), \\ \text{s. t. } &y \in Y = \{y | 0 \leq y \leq c\}, \\ &y \in H. \end{aligned}$$

其中 y, c 为实数。

为保证上述优化问题的全局最优解,必须选择一个合适的分支策略,选择矩形对分策略,设矩形为

$$H = \{y \in R^n | y_\tau^l \leq y_\tau \leq y_\tau^u, \tau = 1, \dots, n\} \subseteq H^0, \text{ 令}$$

$j = \operatorname{argmin}\{y_\tau^u - y_\tau^l, \tau = 1, \dots, n\}$, γ_j 满足 $\gamma_j = \frac{1}{2}(y_j^l + y_j^u)$, 将矩形 \mathbf{H} 对分为 H^1 和 H^2 , 有:

$$H^1 = \{y \in R^n \mid y_\tau^l \leq y_\tau \leq y_\tau^u, \tau \neq j, y_j^l \leq y_j \leq \gamma_j\},$$

$$H^2 = \{y \in R^n \mid y_\tau^l \leq y_\tau \leq y_\tau^u, \tau \neq j, \gamma_j \leq y_j \leq y_j^u\}.$$

令 $\mathbf{UB}(\mathbf{H})$ 为上述优化问题在矩形 \mathbf{H} 上的最优值。

算法步骤如下

选取 $\epsilon \geq 0$, 确定问题在矩形 $\mathbf{H} = H^0$ 的最优解 y^0 和最优值 $\mathbf{UB}(H^0)$ 。令 $\mathbf{UB}^0 = \mathbf{UB}(H^0)$, $\mathbf{LB}_0 = g(y^0)$, 如果 $\mathbf{UB}_0 - \mathbf{LB}_0 \leq \epsilon$, 则停止, y^0 是最优解, 否则令 $\mathbf{Q}_0 = \{H^0\}$, $F = \phi$, $k = 1$, 转步骤 k 。

步骤 $k, k \geq 1$ 。

步骤 k_1 , 令 $\mathbf{LB}_k = \mathbf{LB}_{k-1}$, 使用上矩形对分规则将 \mathbf{H}^{k-1} 划分为 2 个子矩形 $\mathbf{UB}(\mathbf{H}^{k,t})$ 令 $F = F \cup \{\mathbf{H}^{k-1}\}$ 。

步骤 k_2 , 对于每个新的节点 $\mathbf{H}^{k,1}, \mathbf{H}^{k,2}$, 并根据当前矩形为每个线性约束函数 $\sum_{j=1}^n a_{ij} y_j$ ($i = 1, \dots, q$) 计算下界, $\sum_{a_{ij} > 0} a_{ij} y_j^l + \sum_{a_{ij} < 0} a_{ij} y_j^u$, 其中 y_j^l 为 y_j^u 当前矩形的上下界, 如果存在某个 $i \in \{1, \dots, q\}$, 使得 $\sum_{a_{ij} > 0} a_{ij} y_j^l + \sum_{a_{ij} < 0} a_{ij} y_j^u > b_i$, 那么将相应的节点放入 F 中, 如果 $\mathbf{H}^{k,1}, \mathbf{H}^{k,2}$ 都被放入 F 中, 则 $F = F \cup \{\mathbf{H}^{k,1}, \mathbf{H}^{k,2}\}$, 转步骤 k_6 。

步骤 k_3 , 对于子矩阵 $\mathbf{H}^{k,1}$ 和 $\mathbf{H}^{k,2}$, 修正上述优化问题在 $\mathbf{H} = \mathbf{H}^{k,t}$ 的最优值 $\mathbf{UB}(\mathbf{H}^{k,t})$ 并找出最优解 $y^{k,t}$, 其中 $t = 1$ 或 $t = 2$ 或 $t = 1, 2$ 。若可能, 修正下界 $\mathbf{LB}_k = \min\{\mathbf{LB}_k, g(y^{k,t})\}$, 并令 y^k 表示满足 $\mathbf{LB}_k = g(y^k)$ 的点。

步骤 k_4 , 如果 $\mathbf{LB}_k > \mathbf{UB}(\mathbf{H}^{k,t})$, 则令 $F = F \cup \{\mathbf{H}^{k,t}\}$ 。

步骤 k_5 , 令 $F = F \cup \{\mathbf{H} \in \mathbf{Q}_{k-1} \mid \mathbf{LB}_k > \mathbf{UB}(\mathbf{H})\}$ 。

步骤 k_6 , 令 $\mathbf{Q}_k = \{\mathbf{H} \mid \mathbf{H} \in (\mathbf{Q}_{k-1} \cup \{\mathbf{H}^{k,1}, \mathbf{H}^{k,2}\}), \mathbf{H} \notin F\}$ 。

步骤 k_7 , 令 $\mathbf{UB}_k = \min\{\mathbf{UB}(\mathbf{H}) \mid \mathbf{H} \in \mathbf{Q}_k\}$, 并令 $\mathbf{H}^k \in \mathbf{Q}_k$ 为满足 $\mathbf{UB}_k = \mathbf{UB}(\mathbf{H}^k)$ 的子矩阵, 若 $\mathbf{UB}_k - \mathbf{LB}_k \leq \epsilon$, 则停, y^k 为最优解, 否则, 令 $k = k + 1$, 转步骤 k 。

3 仿真与实例分析

下面分别在条件(1)和(2)下分析的全控型无线 mesh 网络的时延和系统的控制品质的变化情况, (1)节点数 $s = 20$, 链路容量 $c_l = 2.8$, 最大重传次数 9, $T = 0.168$ s, $T_c = 1.89$ s, $\eta = 10$ 和条件(2)节点数 $s = 50$, 链路容量 $c_l = 5.9$, 最大重传次数 11, $T =$

0.192 s, $T_c = 2.66$ s, $\eta = 20$, 令 $qP_k = \varphi$, 无约束条件下获得流量、概率乘积和无线 mesh 网络系统延迟之间的关系分别如图 3 和 4 所示:

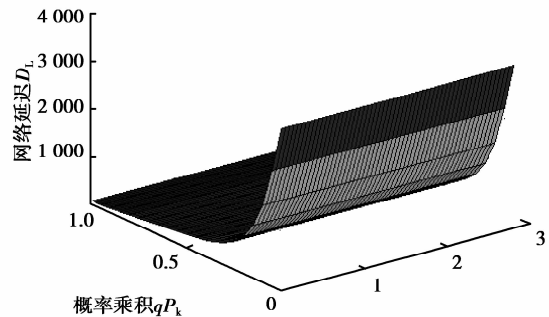


图 3 条件(1)下的流量、概率乘积和网络延迟之间的关系

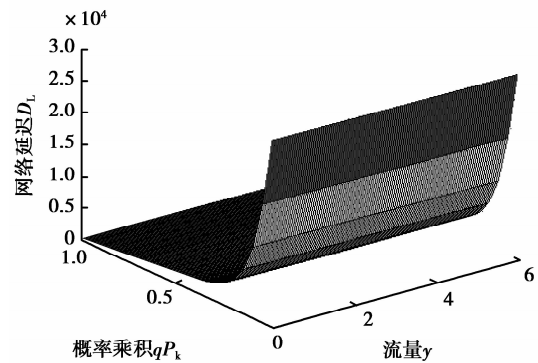


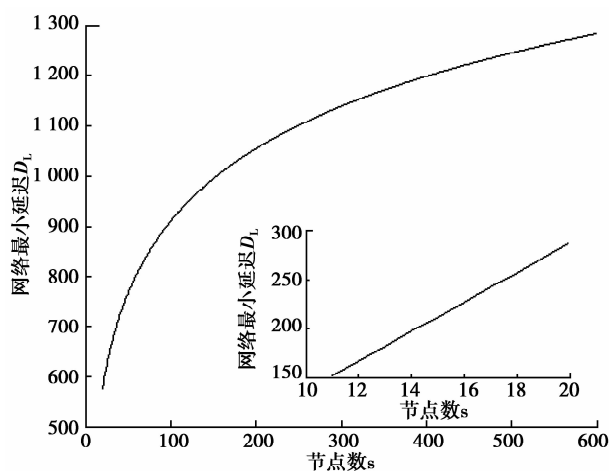
图 4 条件(2)下的流量、概率乘积和网络延迟之间的关系

由上述 2 图可知, 数据流成功获得信道的概率和任意节点获得信道后传输成功的概率在 $(0, 0.5)$ 区间内变化时, 整个网络时延变化较为明显, 随概率乘积的减小而显著增大, 当概率乘积接近于 0 时, 网络时延趋于无限大, 由(2)可知整个全控型无线 mesh 网络基本处于不可控状态, 而概率乘积在 $(0.5, 1)$ 内变化时, 网络时延变化较小, 整个全控型无线 mesh 网络的控制品质明显增强。从中可以看出, 当节点个数一定时, 流量的变化对网络时延的影响不太大, 而数据流成功获得信道的概率和任意节点 k 获得信道后传输成功的概率乘积 qP_k 在 $(0, 0.5)$ 区间内变化时, 对网络时延影响较大, 由(2)可知在此范围内整个全控型无线 mesh 网络的控制品质会随网络延迟的增大而降低。

采用前述算法, 取 $\epsilon = 10^{-5}$, 设最大重传次数 $m = 9$, $T = 0.189$ s, $T_c = 1.88$ s, $\eta = 10$, 其中 $0.6 \geq y \geq 0.1, 0.85 \geq P_k \geq 0.18, 0.88 \geq q \geq 0.21$, 节点个数 s ($s \geq 11$) 与最小网络延迟之间的关系可由表 1 所示。

表 1 不同节点数条件下的无线 mesh 网络最小延迟

序号	网络节点个数 s	最小网络延迟	序号	网络节点个数 s	最小网络延迟
1	11	159.63	6	16	239.34
2	12	179.26	7	17	249.79
3	13	189.62	8	18	269.35
4	14	209.38	9	19	279.83
5	15	219.59	10	20	299.51

图 5 节点数与网络最小延迟之间的关系
($s \leq 20$)和($s \leq 600$)

由图 5 可知,当全控型无线 mesh 网络具有较少节点个数时,最小网络延迟随节点数的增加而几乎线性增长,因而全控型无线 mesh 网络的控制品质明显降低,由此可知当网络节点个数较少时,整个网络系统的控制品质对节点数的变化较为敏感。

通过计算由图 5 所示,可知当无线 mesh 网络具有较多节点个数时,最小网络时延迅速增加,当节点数 $s \geq 500$ 时,网络最小延迟的增加量呈减缓趋势,因此全控型无线 mesh 网络的控制品质也缓慢减弱,由此可知当网络节点个数较多时,其个数的变化对整个系统的控制品质影响较小。

从上面的仿真实例可得出,网络流量对网络延迟的影响较小,而网络中节点数、平均传输跳数和数据流成功获得信道的概率和任意节点获得信道后传输成功的概率乘积对网络延时影响较大,从而会对整个全控型无线 mesh 网络的控制品质产生影响。

4 总 结

主要分析了影响全控型无线 mesh 网络的控制品质的主要因素,并通过建立相关优化模型和使用

优化算法以获得最小网络延迟,最后通过在相关条件下的仿真和数值计算对网络时延和整个系统的控制品质进行了分析,得到影响全控型无线 mesh 网络控制品质的主要因素为网络中节点个数和任意节点获得信道后传输成功的概率乘积。

参考文献:

- [1] Sulyman A I, Hassanein H S. WiMAX metro area mesh networks: technologies and challenges [M] // Misra S, Handbook of wireless mesh networks, London: Springer, 2008.
- [2] 谢林柏. 网络化控制系统中若干问题的研究[D]. 武汉: 华中科技大学博士学位论文, 2004.
- [3] Martí P, Yépez J, Velasco M, et al. Managing quality-of-control in network-based control systems by controller and message scheduling co-design[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(6): 1159-1167.
- [4] Bienstock D, Chopra S, Günlük O, et al. Minimum cost capacity installation for multi-commodity network flows[J]. Mathematical Programming, 1998, 81(2): 177-199.
- [5] Brunetta L, Conforti M, Fischetti M. A polyhedral approach to an integer multicommodity flow problem[J]. Discrete Applied Mathematics, 2000, 101(1/2/3): 13-36.
- [6] 马卫国. 具有时延和丢包的鲁棒网络控制系统研究 [D]. 大连: 大连理工大学博士学位论文, 2008.
- [7] Isazadeh A, Heydarian M. Optimal multicast multichannel routing in computer networks [J]. Computer Communications, 2008, 31(17): 4149-4161.
- [8] Mehdi J. Stochastic models in queueing theory[M]. 2nd ed. [S.l.]: Academic Press, 2002.
- [9] Pérez-Bellido A M, Salcedo-Sanz S, Ortiz-García E G, et al. A dandelion-encoded evolutionary algorithm for the delay-constrained capacitated minimum spanning tree problem[J]. Computer Communications, 2009, 32(1): 154-158.
- [10] Fontes D B, Hadjiconstantinou E, Christofides N. A branch-and-bound algorithm for concave network flow problems[J]. Journal of Global Optimization, 34(1): 127-155.
- [11] Haffner S, Monticelli A, Garcia A V, et al. Specialized branch-and-bound for transmission network expansion planning[J]. IEEE Proceedings of the Generation, Transmission and Distribution, 2001, 148(5): 482-488.