

文章编号: 1001-0920(2001)0S-0713-05

一种基于多目标优化的交互式多跳 分组无线网 QoS 路由算法

米志超, 郑少仁, 倪明放

(南京通信工程学院 交换技术与 ATM 研究中心, 江苏 南京 210016)

摘要: 多跳分组无线网络是由一组具有路由和转发功能的移动节点组成的动态多跳的临时性自治系统,多用于军事战术系统。针对军事系统中一些特定业务对多个目标的同时性能要求以及战术网络环境的特点,选取带宽作为约束条件,把时延和丢失率作为 QoS 优化目标,建立了 QoS 路由选择的多目标整数优化模型,并给出了求解模型的交互式算法。实例计算结果表明了算法的可行性。

关键词: 多跳分组无线网; QoS 路由算法; 多目标整数优化; 交互式

中图分类号: TN 915.0

文献标识码: A

An Interactive QoS Routing Algorithm Based on Multi-object Optimization for Multihop Wireless Network

MI Zhi-chao, ZHENG Shao-ren, NI Ming-fang

(PLA R&D Center of Switching Technology and ATM, Nanjing

Institute of Communications Engineering, Nanjing 210016, China)

Abstract: Multihop wireless network is a multihop temporary self-organizing network, which is composed of a group of wireless mobile nodes with ability of route and transfer. It is applied mostly in military tactic system. According to multi-object optimization and the character of tactical network, an interactive QoS routing algorithm based on multi-object programming is presented, which optimizes delay and loss rate based on the constraint of bandwidth. An example proves the feasibility of the algorithm.

Key words: multihop wireless network; QoS routing algorithm; multi-object integer programming; interactive

1 引言

多跳分组无线网(又称 Ad Hoc 网络)是由一组具有路由和转发功能的移动节点组成的动态多跳的临时性自治系统,是一种无中心的无线网络。与有中

心的网络相比,节点的通信不需要经过固定基站的转接。当两个节点无法直接通信时,可以借助其它节点的转发来完成。因此网络部署快速,机动性高,抗毁能力强。目前多跳分组无线网主要用于军事战术通信和一些抢险、勘探等应急系统中。在战术环境

收稿日期: 2001-03-20

基金项目: 国家“863”计划项目(863-300-02-04-99)

作者简介: 米志超(1974—),男,河南鹿邑人,博士生,从事移动网络计算、交换技术和路由协议等研究;郑少仁(1939—),男,安徽绩溪人,教授,博士生导师,从事宽带网交换技术和智能网等研究。

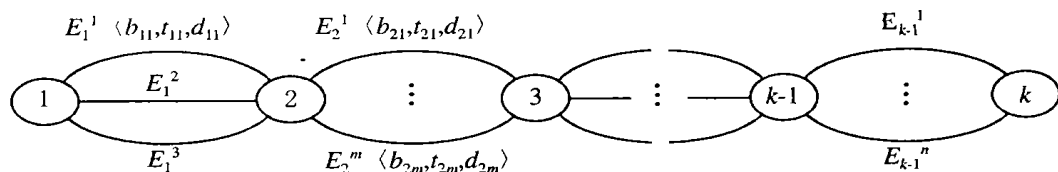


图1 多跳无线分组网络模型图

下,系统对于某些应用有着特别的要求,例如对战情警报等信息网络必须迅速、准确地传送。同时考虑到无线信道速率较低等特点,网络还必须首先满足业务带宽的需求。

通常在 QoS 路由选择时,主要考虑 3 种计算参数: 1) 可加性参数,如时延、时延抖动、跳数; 2) 可乘性参数,如数据丢失率; 3) 取小参数,如带宽。文献 [1] 指出,当路由选择的目标包含两个或两个以上的可加性参数,或者包括可加性参数和/或可乘性参数的组合时,该路由选择将是 NP-完全问题。基于多目标最优化模型可以更准确地反映军事战术网络中的 QoS 路由选择问题,但目前提出的一些多跳分组无线网 QoS 路由选择算法仅仅考虑了单目标计算参数的情况;文献 [2] 给出了满足时延约束条件下最小耗费 QoS 路由算法以及满足带宽约束条件下最小耗费 QoS 路由算法;文献 [3] 则给出了满足带宽要求下的 QoS 路由算法。这些算法不能满足军事战术网络中某些业务对多个目标(如时延和丢失率)的同时要求。

在多目标优化问题中,绝大部分情况下很难找到同时使多个目标达到最优值的解。在军事系统中,战场环境瞬息万变,决策者有时很难给出合乎实际的具体 QoS 要求,因此,要求路由算法应根据决策者的偏好以及当前网络的实际情况来求得满意的路径。

本文提出一种基于多目标优化的交互式多跳分组无线网 QoS 路由算法。每次交互时,决策者根据偏好对当前的有效解提出修正意向,算法则根据这些意向确定下次计算的目标空间。如果决策者的偏好合乎实际,算法就能够求解出一个改进的有效解;否则决策者调整其偏好继续交互过程,或在已求出的有效解中选择一个作为满意解。

2 网络模型

目前大规模的多跳分组无线网络大都是基于分簇结构的。每个簇由簇首节点、网关节点和簇内普通节点组成,不同簇节点间的通信必须通过网关节

点的转发完成,簇内节点间路由则由簇首协作完成^[4]。本文中的路由算法主要考虑不同簇间节点的选路问题。

把多跳分组无线网络抽象成一个加权无向图 $G(V, E^*)$,如图 1 所示。集合 V 的元素称为节点,其中首、末节点分别代表多跳分组无线网络中的源节点和目的节点,其它节点则代表网络中的网关节点;集合 E^* 的元素称为边,用 E_i 表示节点 i 到节点 $i+1$ 的边集,其中 $i, i+1 \in V$,两节点之间可能存在多条边,用 E_i^j 表示节点 i 到节点 $i+1$ 的第 j 条边,其权值序列 b_{ij}, t_{ij}, d_{ij} 表示从节点 i 经过第 j 条边到节点 $i+1$ 的带宽、时延和数据包丢失率。

引入变量

$$E_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{节点 } i \text{ 到节点 } i+1 \text{ 的第 } j \text{ 条边} \\ & \text{被选为目的节点的路由} \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

$$i = 1, 2, \dots, k-1; \quad j = 1, 2, \dots, n_i$$

定义 1 路由 $p = 1 \ 2 \ \dots \ k-1 \ k$ 的带宽 $\text{bandwidth}(E^i)$, 时延 $\text{delay}(E^i)$ 和丢失率 $\text{lose}(E^i)$ 分别定义如下

$$\text{bandwidth}(P) = \min \left\{ b_i = \prod_{j=1}^{n_i} b_{ij} E_{ij} \mid i = 1, 2, \dots, k-1 \right\}$$

$$\text{delay}(P) = \prod_{i=1}^{k-1} \prod_{j=1}^{n_i} t_{ij} E_{ij}$$

$$\text{lose}(P) = 1 - \prod_{i=1}^{k-1} \left(1 - \prod_{j=1}^{n_i} d_{ij} E_{ij} \right)$$

3 多目标整数优化模型(MOIP)

通过建立以下的多目标整数优化模型来求解满足带宽要求且具有最小时延和最小丢失率的通信路由。设 B_0 是业务所需的最小信道带宽。

$$\min F = [F_1(e), F_2(e)] =$$

$$\left[\prod_{i=1}^{k-1} \prod_{j=1}^{n_i} b_{ij} E_{ij}, 1 - \prod_{i=1}^{k-1} \left(1 - \prod_{j=1}^{n_i} d_{ij} E_{ij} \right) \right] \quad (1)$$

式(1)必须满足带宽约束,即 $\text{bandwidth}(P) \geq B_0$

$\text{bandwidth}(E_{ij}) =$

$$\min \left\{ b_i = \sum_{j=1}^{n_i} b_{ij} E_{ij} \mid i = 1, 2, \dots, k-1 \right\} \quad B_0$$

还需要满足条件

$$\sum_{j=1}^{n_i} E_{ij} = 1, \quad E_{ij} \in (0, 1) \\ i = 1, 2, \dots, k-1; \quad j = 1, 2, \dots, n_i$$

以保证任意两个相邻节点间仅有一条边被选中。

设 E 是满足约束条件的 E_{ij} 构成的集合。在介绍路由算法之前, 首先引入几个定义和定理:

定义 2 称 e^* 是问题 (1) 的有效解, 如果不存在 E 中的 e , 使得不等式 $F_1(e^*) < F_1(e), F_2(e^*) < F_2(e)$ 成立。

定义 3 设 MOIP 的两个目标函数 F_1 和 F_2 分别在约束条件下的最优解为 e_1^* 和 e_2^* , 此时目标函数 F_1 和 F_2 的最优值为 F_1^*, F_2^* , 则称 $F^* = (F_1^*, F_2^*)$ 是 MOIP 的理想点。如果 $e_1^* = e_2^*$, 则令 $e^* = e_1^*, e^*$ 就是 MOIP 的绝对最优解。

需要注意的是, MOIP 的绝对最优解不一定存在, 但有效解总是存在的。

定理 1^[5] 多目标整数优化(MOIP)的非劣解是存在的。

设 $d_{\min} = \min(\text{delay}(e_1)), d_{\max} = \max(\text{delay}(e_1^*));$
 $l_{\min} = \min(\text{lose}(e_2)), l_{\max} = \max(\text{lose}(e_2^*))$ 。取 $r^k = (r_1^k, r_2^k)$, 且 $d_{\min} < r_1^k < d_{\max}, l_{\min} < r_2^k < l_{\max}$ 。

记 $S_k = \{e \mid e \in E \text{ 且 } F_1(e) < r_1^k, F_2(e) < r_2^k\}$, 压缩 MOIP 的目标空间, 得到多目标优化问题

$$\min F(e) = [F_1(e), F_2(e)] \\ \text{s. t. } e \in S_k \subset E \quad (2)$$

定理 2 如果 e 是问题 (2) 的有效解, 则它也是问题 (1) 的有效解。

根据定义 2, 结论显然成立, 但其逆不成立。因此利用问题 (2) 压缩目标空间, 可以有效避免某些目标函数取值过高的有效解。考虑如下单目标优化问题

$$\min \left[\frac{1}{r_1^k - d_{\min}} F_1(e) + \frac{1}{r_2^k - l_{\min}} F_2(e) \right] \\ \text{s. t. } e \in S_k \subset E \quad (3)$$

这是一个单目标的非线性整数规划问题, 一些较为有效的求解方法可以参见文献 [5, 6]。

定理 3 如果 e^* 是问题 (3) 的最优解, 则它也是问题 (1) 的有效解。

证明 由定理 1 可知, 只要证明 e^* 是问题 (2)

的有效解即可。用反证法证明。若 e^* 不是问题 (2) 的有效解, 则存在 $e \in S_k$, 使得 $F_1(e) < F_1(e^*), F_2(e) < F_2(e^*)$, 因为 $(r_1^k - d_{\min})^{-1} > 0, (r_2^k - l_{\min})^{-1} > 0$, 则

$$\left[\frac{F_1(e)}{r_1^k - d_{\min}} + \frac{F_2(e)}{r_2^k - l_{\min}} \right] < \left[\frac{F_1(e^*)}{r_1^k - d_{\min}} + \frac{F_2(e^*)}{r_2^k - l_{\min}} \right]$$

成立, 这与 e^* 是问题 (3) 的最优解矛盾。(证毕)

4 交互式 QoS 路由算法

在多目标优化问题中, 大都难以找到同时使得多个目标达到最优值的解。交互式路由算法则能根据决策者的偏好压缩目标空间, 让每个目标尽量达到决策者的要求, 快速找到满意的 QoS 路由。

算法输入参数: 调整精度 $\epsilon_1, \epsilon_2 (\epsilon_1 > 0, \epsilon_2 > 0)$ —— 表示每次调整目标时的最小压缩空间。

算法步骤:

Step1: 求理想点, 即在单独条件下分别计算时延和数据丢失率的极值。

$$d_{\min} = \min(\text{delay}(e_1)), \quad d_{\max} = \max(\text{delay}(e_1^*)) \\ l_{\min} = \min(\text{lose}(e_2)), \quad l_{\max} = \max(\text{lose}(e_2^*))$$

如果 $e_1 = e_2$, 即理想点存在, 得到绝对最优解, 算法结束; 否则转 Step2。

Step2: 求解问题

$$\min \left[\frac{1}{d_{\max} - d_{\min}} \text{delay}(e) + \frac{1}{l_{\max} - l_{\min}} \text{lose}(e) \right] \\ \text{s. t. } e \in E$$

的任一最优解 e^0 (其中 E 是满足带宽约束条件的解集合)。置 $k = 0$, 且有

$$r_1^0 = \begin{cases} \text{delay}(e^0), & \text{时延参数需要调整} \\ d_{\max}, & \text{时延参数不需要调整} \end{cases} \\ r_2^0 = \begin{cases} \text{lose}(e^0), & \text{丢失率参数需要调整} \\ l_{\max}, & \text{丢失率参数不需要调整} \end{cases}$$

Step3: 设 $S_k = \{e \in E \mid \text{delay}(e) < r_1^k, \text{lose}(e) < r_2^k\}$, 表示决策者满意的有效解集合。如果决策者的偏好能够实现, 则 S_k 非空。

Step4: 如果下述优化问题

$$\min \left[\frac{1}{r_1^k - d_{\min}} \text{delay}(e) + \frac{1}{r_2^k - l_{\min}} \text{lose}(e) \right] \\ \text{s. t. } e \in S_k$$

是可行的, 求出其最优解 e^k ; 否则转 Step6。

Step5: 如果决策者满意, 则停止交互过程, 结束算法; 否则转 Step7。

Step6: 如果决策者愿意调整 QoS 需求(即调整

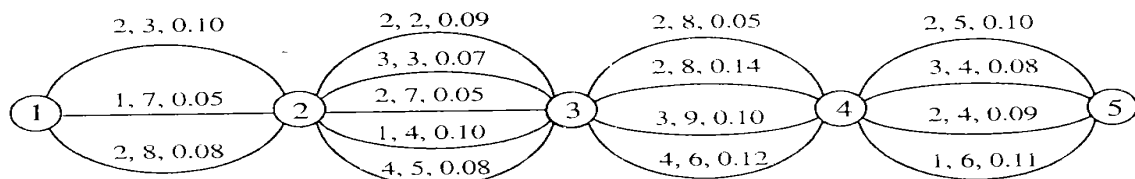


图2 抽象的网络模型实例

表1 实例计算结果

k	时延	丢失率	需调整参数	r_1^k	r_2^k	E_{ij}
0	18	0.268 5	时延	17	0.366 1	$E_{11} = E_{22} = E_{31} = E_{42} = 1$
1	16	0.322 4	丢失率	17	0.312 4	$E_{11} = E_{22} = E_{34} = E_{42} = 1$
2	17	0.284 2	/	/	/	$E_{11} = E_{21} = E_{31} = E_{42} = 1$

时延或丢失率的要求),置

$$r_1^{k+1} = \begin{cases} r_1^k + \epsilon_1, & \text{时延参数需要调整} \\ r_1^k, & \text{时延参数不需要调整} \end{cases}$$

$$r_2^{k+1} = \begin{cases} r_2^k + \epsilon_2, & \text{丢失率参数需要调整} \\ r_2^k, & \text{丢失率参数不需要调整} \end{cases}$$

且置 $k = k + 1$, 返回 Step3; 否则取有效解 e^k 为满意解, 停止交互过程。

Step7: 置

$$r_1^{k+1} = \begin{cases} \text{delay}(e^k) - \epsilon_1, & \text{时延参数需要调整} \\ r_1^k, & \text{时延参数不需要调整} \end{cases}$$

$$r_2^{k+1} = \begin{cases} \text{lose}(e^k) - \epsilon_2, & \text{丢失率参数需要调整} \\ r_2^k, & \text{丢失率参数不需要调整} \end{cases}$$

且置 $k = k + 1$, 返回 Step3。

5 实例及结果分析

设一个多跳分组无线网络的模型图如图2所示(带宽和时延单位分别为 kbps 和 ms)。应用上述交互式算法求解从节点1到节点5的满足通信带宽不小于2的最短时延和最小丢失率的路由, 其中调整精度 $\epsilon_1 = 1, \epsilon_2 = 0.01$, 计算过程如下:

1) 求得时延极值 $d_{\max} = 29, d_{\min} = 15$, 其最优解(时延取最小值时的解)为 $E_{11} = E_{21} = E_{34} = E_{42} = 1$ 和 $E_{12} = E_{23} = E_{31} = E_{43} = 1$, 其余 $E_{ij} = 0$; 求得丢失率极值为 $l_{\max} = 0.366 1, l_{\min} = 0.236 1$, 最优解(丢失率取最小值时的解)为 $E_{12} = E_{23} = E_{31} = E_{42} = 1$, 其余 $E_{ij} = 0$ 。检查两个最优解不等, 即不存在绝对最优解, 理想点不可达。

2) 执行算法 Step2 ~ Step7 的交互过程, 结果如表1所示。

算法第一次求解得到时延为 18 ms, 丢失率为 0.268 5 的路由($E_{11} = E_{22} = E_{31} = E_{42} = 1$), 决策者认为时延偏大, 算法调整时延参数; 第二次得到时延为 16 ms, 丢失率为 0.322 4 的路由($E_{11} = E_{22} = E_{34} = E_{42} = 1$), 决策者认为时延满意, 但丢失率偏高, 算法调整丢失率参数; 第三次得到时延为 17 ms, 丢失率为 0.284 2 的路由($E_{11} = E_{21} = E_{31} = E_{42} = 1$), 决策者认为满意, 交互过程结束。

6 结 语

本文选取带宽作为约束条件, 把时延和丢失率作为 QoS 优化目标, 建立了 QoS 路由选择的多目标整数优化模型, 给出了多目标优化的交互式算法和实例分析。从所给的数学模型可以看出, 本文提出的算法可以方便地扩展到求解基于多个参数约束的多目标路由优化问题, 只需在多目标优化模型(MOIP)中添加相应的参数约束条件和所求的目标函数即可。由此可见, 文中提出的模型和算法对于多目标的 QoS 路由选择具有一定的实际意义。

参考文献:

- [1] Wang Zheng, Crowcroft Jon. Quality of service routing for supporting multimedia applications[J]. IEEE J on Selected Areas in Communications, 1996, 14(7): 1228-1234.
- [2] Shigang Chen, Klara Nahrstedt. Distributed Quality-of-service routing in Ad Hoc network[J]. IEEE J on Selected Areas in Communications, 1999, 17(8): 1488-1505.

(下转第 720 页)

果,如第一个指标的4个优化尺度参数为0.7051, 0.5296, 0.4072, 0.2341。这样某个项目的指标综合评价值为

$$p = \begin{bmatrix} 0.2864 & 0.3691 & 0.3691 & 0.3681 \\ 0.3698 & 0.3691 & 0.3350 & 0.4324 \\ 0.4324 & 0.4324 & 0.5345 & 0.5856 \\ 0.8445 & 0.3010 & 0.7511 & 0.2377 \end{bmatrix}$$

经过遗传算法优化处理后的指标综合评价值为

$$p = \begin{bmatrix} 0.2500 & 0.2500 & 0 & 0.2500 & 0 \\ 0.5000 & 0.2500 & 0.5000 & 0.5000 & 0 \\ 0.5000 & 0.5000 & 0.7500 & 1.0000 & 0 \\ 0.2500 & 0.7500 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3.2.2 利用GA对FNN的连接权值进行优化

利用GA进化选择网络最佳连接权值具有多方面独特的优越性,如进化学习不依赖于导数信息,并行度高,善于处理解空间为复杂、多峰值的全局优化问题。本文结合GA与FNN各自的优点,先利用GA的强全局搜索能力进行粗学习,再利用BP的最速梯度下降特性进行细学习,以加快网络连接权的进化学习收敛过程。

3.3 应用效果

将基于广义模糊加权型推理的模糊遗传神经网络应用于广东省自然科学基金科研项目立项评审。首先用遗传算法对1999年度的764个有效申请项目的评审结果进行数据预处理,得到模糊神经网络的学习样本,网络学习速度大大提高,没有出现不收敛情况。将训练过的网络用于1999年度704项自由申请项目的评审,实际拟合率为95.45%,取得了令人满意的应用效果。

4 结语

本文首先阐述了模糊系统、神经网络和遗传算法的优缺点,然后在基于广义模糊加权型推理的模糊神经网络基础上,融合非一致性自适应遗传算法,建立一种模糊遗传神经网络,并将其应用于科研智能管理专家系统。实际应用结果表明了网络模型和算法的有效性。关于遗传算法与模糊神经网络的更紧密的融合技术,如用遗传算法替代BP算法,遗传算法与模糊逻辑的结合等,值得进一步研究。

参考文献:

- [1] 王士同. 神经模糊系统及其应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998. 48-56.
- [2] 陈世权, 孙有发, 李秀平, 等. 模糊排序专家系统及其在科研管理中的应用[J]. 模糊系统与数学, 2000, 14(1): 94-99.
- [3] 孙有发, 陈世权, 刘永清, 等. 基于集值统计的专家系统及其应用[A]. 华南理工大学电子与信息学科研究生学术论文集[C]. 广州, 2000. 150-155.
- [4] 孙有发, 陈世权, 刘永清, 等. 非一致性自适应遗传算法及其应用[A]. 华南理工大学电子与信息学科研究生学术论文集[C]. 广州, 2000. 156-161.
- [5] 宋爱国, 陆信人. 极度并行计算: 演化算法和演化神经网络的研究进展[J]. 系统仿真学报, 1998, 15(2): 14-19.
- [6] 肖健华, 吴今培, 陈世权, 等. 基金项目立项评审系统的设计[J]. 系统工程, 1999, 17(5): 71-76.
- [7] 王以直, 张志强, 李敏强. 杂合遗传算法与计算智能[J]. 系统工程理论与实践, 1999, 14(3): 54-56.

(上接第716页)

- [3] C R Lin, J S Liu. QoS routing in Ad Hoc wireless network[J]. IEEE J on Selected Areas in Communications, 1999, 17(8): 1426-1438.
- [4] M Gerla, J T-C Tsai. Multiduster, mobile, multimedia radio Network [J]. ACM-Baltzer J of Wireless Networks, 1995, 1(3): 255-265.

- [5] G L Nemhauser, L A Wolsey. Integer and combinatorial optimization[M]. New York: John Wiley & Sons, 1988.
- [6] 马仲蕃. 线性整数规划的数学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1995.