

基于效用函数的无线数据网络资源管理策略

吴一多 陈晓光

(复旦大学通信科学与工程系 上海 200433)

摘要 针对可变速率的无线数据网络,提出了一种基于效用函数的资源管理策略。该策略兼顾了数据业务对吞吐量和速率波动的要求,并且综合考虑了速率分配和功率控制对系统性能的影响。仿真结果显示,该策略能够有效地抑制终端的传输速率波动;在信道环境较差时,改进后的算法可以进一步提高系统的性能。

关键词 效用函数,资源管理,时帧占用,速率分配,功率控制

Utility-based Resource Management Strategy in Wireless Data Network

WU Yi-duo CHEN Xiao-guang

(School of Communication Science & Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract A utility-based resource management strategy in wireless data network was proposed in this paper. The strategy achieves a balance between throughput and rate oscillation of data service and takes into account the impact of both rate and power on the system performance. Numerical results show a low oscillation of rate and an efficient improvement of the system performance in poor channel condition.

Keywords Utility function, Resource management, Time frame occupancy, Rate allocation, Power control

1 引言

在无线通信系统中,不同业务对 QoS (Quality of Service) 有着不同的需求,根据这些需求动态地管理系统有限的资源是提高系统通信质量的有效方法。在传统的语音通信中,资源管理往往仅限于功率控制。而在数据通信中,资源管理要考虑更多因素以支持不同的 QoS 需求,尤其是各个终端的传输速率。随着互联网以及数据业务的快速发展,为了寻求网络最大的吞吐量,人们对尽力而为业务 (best-effort service) 的需求不断增长^[1]。

效用函数很早以前就被引入网络资源管理领域,来解决吞吐量的分配以及网络优化问题。文献[2]采用了线性的效用函数对系统吞吐量建模,当仅选择可达速率最大的终端进行通信时,系统的总吞吐量达到最大。显然,这对于信道质量好的终端有利,而对信道质量差的终端不利,不具有公平性。考虑到系统的公平性,文献[3]提出了比例公平算法 (proportional fair algorithm),该算法的效用函数采用了针对平均传输速率的对数形式。文献[4]采用类似的算法保证了无线网络中各 TCP 流的加权公平性,提高了系统的吞吐量。

以上文献所提出的算法都只适用于尽力而为业务,它们都会导致较大的速率波动。为了兼顾吞吐量与速率波动,我们提出了一种基于时帧占用的速率分配算法,该算法能够有效地抑制终端传输速率的波动。在考虑了发射功率之后,对算法进行了改进,通过仿真可以看到,改进后的算法使得以效用函数为衡量标准的系统性能得到了进一步的提高,这种提高在信噪比不太高的情况下尤为明显。

2 系统模型

我们考虑包含 N 个终端的单小区系统,由基站决定整个小区的资源管理策略。终端与基站之间的通信链路建模为时变的加性白高斯噪声信道,假设在每一个时帧内信道参数近似保持不变。我们将终端 i 在时帧 t 的瞬时信道增益记为 $g_i(t)$,将 $g_i(t)$ 服从的概率分布密度函数记为 $f_i(g)$,则整个网络的信道增益可以用 N 维向量表示为:

$$g(t) = (g_1(t), g_2(t), \dots, g_N(t)) \quad (1)$$

对于频率平坦的瑞利衰减信道, $f_i(g)$ 可以表示为:

$$f_i(g) = \begin{cases} \frac{1}{g_i} \exp(-\frac{g}{g_i}), & g \geq 0 \\ 0, & g < 0 \end{cases} \quad (2)$$

在系统中,如果不考虑其他终端的影响,系统中某一个终端 i 可达到的传输速率为^[5]:

$$c_i(t) = \log_2 [1 + \frac{\beta_i(t)g_i(t)}{\beta N_0}] \quad (3)$$

式中, N_0 为噪声功率, β 为信噪比差额,它反映了实际传输速率和理论传输速率的差别。

我们用 ρ_i 表示第 i 个终端对整个时帧的占用率,那么基于时帧占用的速率分配策略可以表示为:

$$\rho(g) = [\rho_1(g), \rho_2(g), \dots, \rho_N(g)] \quad (4)$$

式中, $0 \leq \rho_i(g) \leq 1, i = 1, 2, \dots, N$, 且 $\sum_{i=1}^N \rho_i(g) = 1$ 。

那么终端 i 在第 t 个时帧的传输速率可以表示为:

$$r_i(t) = \rho_i c_i(t) \quad (5)$$

终端 i 的效用可以表示为传输速率的函数: $U_i(r_i(t))$ 。

吴一多(1984-),男,硕士生,主要研究方向为无线通信,E-mail:072021090@fudan.edu.cn;陈晓光(1964-),男,副教授,硕士生导师,主要研究方向为移动通信与无线通信、量子通信等。

对于不同的 QoS 需求,效用函数可以有不同的表达式,但必须是可微的凹函数。

3 基于时帧占用的速率分配策略

3.1 基本思想

我们首先仅考虑基于时帧占用的速率分配策略给系统性能带来的影响,而不考虑对终端的发射功率控制,即假设所有的终端在任何时间都保持相同的发射功率。效用函数是对系统性能的数学抽象,系统性能的最优化策略,也就是研究系统效用的最大化策略。在基于时帧占用的速率分配框架下,系统的优化目标就是找到最佳的时帧占用策略,使得系统的总效用最大,即:

$$\max_{\rho(g)} \int_g \sum_{i=1}^N U_i(\rho(g), g_i) f(g) dg \quad (6)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^N \rho_i(g) = 1 \quad (7)$$

由于式(7)的约束条件是针对所有信道状态的,因此求平均的效用函数的极值就等效于求瞬时的效用函数的极值。此时系统的优化过程被抽象为在某个约束条件下求函数的极值的过程,所以我们可以采用拉格朗日乘法,首先令 $F = \sum_{i=1}^N U_i(\rho_i(g), g_i) + \lambda [1 - \sum_{i=1}^N \rho_i(g)]$,再分别令 $\frac{\partial F}{\partial \rho_i} = 0$ 及 $\frac{\partial F}{\partial \lambda} = 0$,即可得到最优解:

$$\rho_i^*(g) = \max(0, [\frac{\partial U_i(\rho_i, g_i)}{\partial \rho_i}]^{-1}(\lambda)), i=1, 2, \dots, N \quad (8)$$

我们将基于时帧占用的速率分配与梯度调度 (gradient scheduling) 策略^[6]进行比较。梯度调度策略也适用于尽力而为业务的网络,它可以使系统内终端获得最大的平均速率,也就是最大的吞吐量。采用梯度调度策略的速率分配会选择某一个移动终端在整个时帧进行传输,选择的终端由下式确定^[6]:

$$i^*(t) = \arg \max_{1 \leq i \leq N} \frac{\partial U_i(R_i(t))}{\partial R_i(t)} c_i(t) \quad (9)$$

3.2 仿真与分析

我们使用 MATLAB 7.0 对系统建模,仿真计算终端的速率平均值以及速率标准差(表征了速率的波动大小)。在仿真中,效用函数可以采用多种形式,只需满足可微的凹函数条件即可。为了方便计算,我们采用如下形式的效用函数^[2]:

$$U(r) = U(\rho c) = \ln(1 + \frac{\rho c}{A}) \quad (10)$$

参数 A 为一正常数, A 的大小决定效用函数的凹凸程度,由之后的仿真结果可以看出,效用函数的凹凸程度,决定了系统优化过程中对总吞吐量还是速率波动更为倾向。考虑 A=1 以及 A=10 两种情况,分别计算终端在不同信噪比条件下的速率平均值和速率标准差。

在仿真中我们设用户数 N=4 且每个终端与基站距离相等,那么 4 个终端在两种速率分配策略下应该具有一致的表现,所以我们只用计算比较其中某一个终端的速率即可。设系统采用无编码的 QAM 调制,那么信噪比差额就是目标误比特率的函数,可以表示为:

$$\beta = -\ln(5 \cdot BER) / 1.5 \quad (11)$$

我们将目标误比特率设为 10^{-5} ,则可由式(11)算出 $\beta = 6.6 = 8.2\text{dB}$ 。平均信噪比的范围设为 5dB~35dB,每次仿真

我们一共计算 50000 个时帧的速率平均值和速率标准差。

利用式(7)计算得到采用时帧占用的各终端速率,然后求得速率平均值和速率标准差;利用式(8)计算梯度调度下各终端的速率平均值和速率标准差,将两者进行比较可以看出:采用了时帧占用之后终端的速率平均值会有所下降(见图 1)。但随着信噪比的增加,梯度调度策略的速率标准差增加也很快,即速率波动非常大,而采用了时帧占用之后,传输速率的标准差减小非常明显,也就是说时帧占用平滑了终端的速率波动(见图 2)。

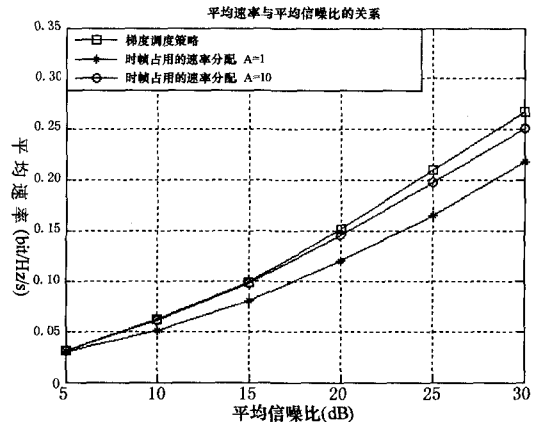


图 1 平均速率与平均信噪比的关系

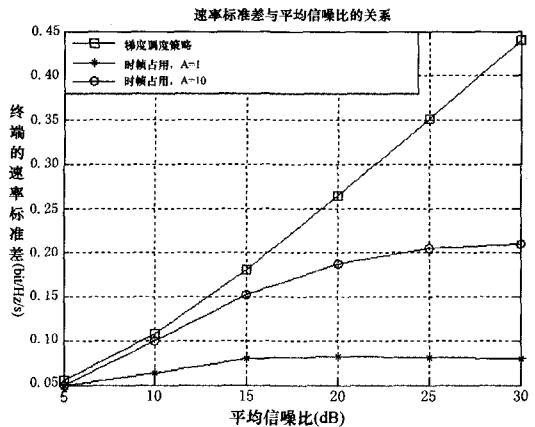


图 2 速率标准差与平均信噪比的关系

图 1 中的 3 条曲线分别为梯度调度策略、采用时帧占用且效用函数参数 A=1、采用时帧占用且效用函数参数 A=10 3 种情况下终端的速率平均值。可以看到,不论采用何种速率分配方式,终端的速率平均值都随着平均信噪比的提高而增加,但是对于不同的速率分配策略以及不同的效用函数参数,速率平均值的大小不一样。在相同的信噪比条件下,梯度调度策略所获得的速率平均值最大, A=10 的时帧占用其次, A=1 的时帧占用最小。这种情况在低信噪比条件下不是特别明显,但是随着平均信噪比的提高,三者之间的差别会逐渐加大。这种情况的产生是因为梯度调度策略以获得最大的速率平均值作为系统的优化目标^[6],而时帧占用综合考虑了吞吐量和传输速率稳定性之间的平衡,所以会以牺牲部分吞吐量,来达到抑制传输速率波动的目的,这两者之间的平衡可以通过调整效用函数中的参数 A 来取得。这一点从图 2 中可以很明显地看出来。

图 2 中的 3 条曲线分别为梯度调度策略、采用时帧占用

且效用函数参数 $A=1$ 、采用时帧占用且效用参数 $A=10$ 3 种情况下终端速率的标准差。可以看到,梯度调度策略和 $A=10$ 的时帧占用的速率标准差随着平均信噪比的提高而增加, $A=1$ 的时帧占用的速率标准差在 $SNR < 15\text{dB}$ 时也随着信噪比的提高而增加,但是如果信噪比进一步提高,速率标准差就呈下降趋势。在相同的信噪比条件下,采用梯度调度策略的终端的速率标准差大于时帧占用策略,而且信噪比越大,两者之间的差距就越大。过大的速率波动,有时会给网络带来过度负载,有时又无法完全利用网络的带宽,这是我们在无线数据应用中所不愿意看到的,而采用时帧占用可以很好地解决这一问题,从而提高网络的利用效率。

另外我们单独比较 $A=1$ 与 $A=10$ 两种情况下的速率标准差。图 2 中,在相同的信噪比条件下, $A=10$ 的速率标准差要大于 $A=1$ 的情况,并且信噪比越大,两者之间差距就越大。结合图 1 我们可以发现,效用函数中 A 的取值越小,终端的速率波动就会越小,但是系统也会以损失更多的吞吐量为代价。基于这一点,我们可以通过调整效用函数中常数 A 的大小,来调节系统在吞吐量和速率波动之间的平衡性。

4 联合速率分配与功率控制的资源管理

4.1 基本思想与算法

我们联合速率分配与功率控制,即允许移动终端的发射功率在时帧内根据信道增益进行相应调整,那么系统的总效用将由终端的传输速率和发射功率共同决定。这里我们只考虑上行功率控制,所有的终端都会有一个平均的功率上限。那么系统优化的目标函数及约束条件可以表示为:

$$\max_{(\rho, p)} \int_g \sum_{i=1}^N U_i(\rho_i(g), p_i(g), g_i) f(g) dg \quad (12)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^N \rho_i(g) = 1 \quad (13)$$

$$\int_g \rho_i(g) p(g) f(g) dg = \bar{p}_i, i = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

式中, \bar{p}_i 为终端 i 的平均功率上限。为了方便计算,记 $m = \rho p$, 则效用函数 $U(\rho, g, m)$ 是 ρ 和 m 的凹函数,同样采用拉格朗日乘法,可以得到:

$$\frac{\partial U_i}{\partial \rho_i} f(g) - \lambda_0(g) = 0, i = 1, 2, \dots, N \quad (15)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial m_i} - \lambda_i = 0, i = 1, 2, \dots, N \quad (16)$$

于是加入功率控制的资源管理算法可以表示如下:

1) 初始化 m , 令系统时钟 $k=0$, 初始功率 $p^{(0)} = \bar{p}$, 时帧占用参数 $\rho_i = 1/N$;

2) 固定 $m^{(k)}$, 由式(15)计算 $\rho^{(k)}$;

$$\rho_i^{(k)}(g) = \max(0, (\frac{\partial U_i}{\partial \rho_i})^{-1}(\lambda_0, m_i^{(k)})), i = 1, 2, \dots, N \quad (17)$$

3) 由式(12)计算系统总效用:

$$F^{(k)} = \int_g \sum_{i=1}^N U_i(\rho_i(g), p_i(g), g_i) f(g) dg \quad (18)$$

4) 固定 $\rho^{(k)}$, 由式(16)计算 $m^{(k+1)}$;

$$m_i^{(k+1)}(g) = \max(0, (\frac{\partial U_i}{\partial m_i})^{-1}(\lambda_i, \rho_i^{(k)})), i = 1, 2, \dots, N \quad (19)$$

并令 $k=k+1$;

5) 重复步骤 2)~4) 直到 $F^{(k+1)} = F^{(k)}$ 。

4.2 仿真与分析

在实际仿真过程中,最后程序的收敛往往是通过 $|F^{(k+1)} - F^{(k)}| < \Delta$ 来实现的,这里 Δ 是一个很小的值,通过调整 Δ 可以控制算法的精度以及迭代次数。仿真过程的流程图如图 3 所示。

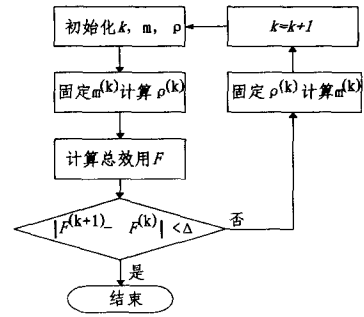


图 3 联合速率分配与功率控制的资源管理流程图

在仿真中,信道增益在仿真中,信道增益由下式给出:

$$g = ad^{-n} \quad (20)$$

式中, α 为常量, d 为终端到基站的距离, n 为路径损耗指数。仿真中参数取值如下: $\alpha=0.097, n=4$ 。由于这里考虑了发射功率,因此仿真中我们还需要明确噪声功率的大小,取 $N_0 = 5 \times 10^{-15} \text{W}$ 。效用函数采用式(10)的表达形式并取 $A=1$ 。另外取 $\bar{p}_i = 1, W=30\text{dBm}, i=1, 2, \dots, N$ 。

仿真得到的 4 个终端的总效用随平均信噪比的变化如图 4 所示。

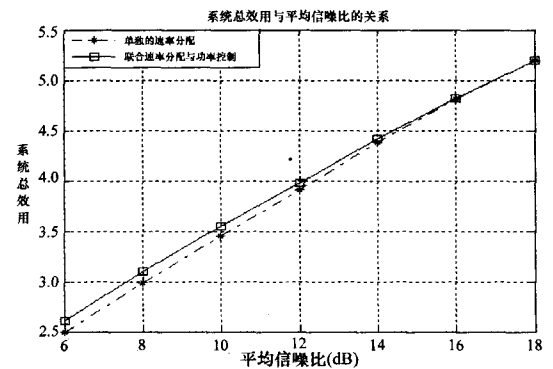


图 4 系统总效用与平均信噪比的关系

由图 4 可以看出,加入功率控制之后,系统的总效用得到了提高。这种提高在较低信噪比的环境下 ($SNR < 12\text{dB}$) 表现较为明显,且信噪比越低,系统总效用的提高越明显。

4.3 算法性能分析

下面我们简单分析一下改进后算法的收敛速度和复杂度。在仿真中加入一个计数变量记录下加入功率控制后仿真由开始到停止的迭代次数,得到改进后算法的收敛速度与 Δ 取值的关系如下表所示:

Δ 取值	$1e-4$	$1e-5$	$1e-6$	$1e-7$	$1e-8$
迭代次数	53	86	161	539	1374

表 1 的数据显示,取 $\Delta=1e-4$ 时,仅需要约 50 次迭代算法就能收敛, Δ 取值越小,仿真就需要更多次迭代才能收敛。最小时,我们取 $\Delta=1e-8$,此时算法需要 1300 多次迭代才能收敛,有一定的复杂度,但从另一个角度来说也能取得更高的精确度。

结束语 针对可变速率传输的多业务无线网络,本文提出了一种基于效用函数的资源管理策略。该策略综合考虑了吞吐量和传输速率稳定性之间的平衡,可以通过牺牲小部分吞吐量,达到抑制传输速率波动的目的。与传统的资源管理策略相比,特别适用于高速率的无线网络中对传输速率波动较为敏感的数据业务。仿真结果显示,该策略能够有效地抑制无线网络中终端的传输速率波动,提供了较高的速率稳定性,从而提高了网络的利用效率。该策略与功率控制相结合后能进一步提高系统性能,但是具有一定的复杂度。今后的研究内容主要有两点,一是改进算法、提高收敛速度,二是将其扩展至多小区系统并与准入控制等其他资源管理技术相结合,进一步提高无线资源管理的效率。

参考文献

[1] Jiang Zhi-mei, Ge Ye, Li Ye. Max-utility wireless resource man-

agement for best-effort[J]. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2005, 4(1): 100
 [2] Knopp R, Humblet P A. Information capacity and power control in single-cell multiuser communications[C]// IEEE International Conference on Communications, Seattle, 1995, 1: 331
 [3] Viswanathan H, Venkatesan S, Huang H. Downlink capacity evaluation of cellular networks with known-interference cancellation[J]. IEEE J. Sel. Areas Commun., 2003, 21(5): 802
 [4] 李学勇, 黄佳玮, 王建新. 保证无线上行链路 TCP 公平的调度算法[J]. 计算机工程, 2009, 35(24): 136
 [5] Qiu Xiao-xin, Chawla K. On the performance of adaptive modulation in cellular systems[J]. IEEE Trans. On Commun, 1999, 47(6): 884-895
 [6] Stolyar A L. On the asymptotic optimality of the gradient scheduling algorithm for multiuser throughput allocation[J]. Operation Research, 2005, 53(1): 12-25

(上接第 287 页)

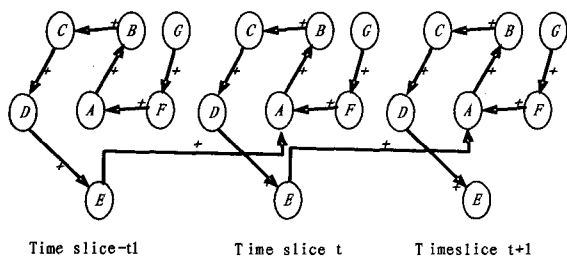


图3 虚线部分的展开及定性标注

下面我们对给定的几个节点进行定性推理。假设在时刻 $t-1$ 只有一个证据节点 G , 此时节点 G 的取值为“+”, 即节点 G 所代表的节点路由出现拥塞。输入证据节点后, 在展开后的定性动态概率网络上进行推理, 结果如图 4 所示。

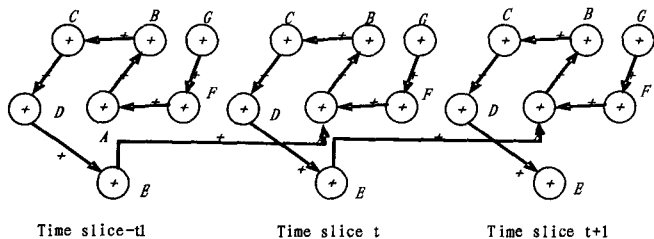


图4 虚线部分的推理结果

根据推理结果, 从因果关系上来看, 如果当前时刻节点 G 发生拥塞, 则会导致网络中所有节点发生拥塞, 反之亦然。此外, 在接下来的后续时刻中, 如果节点 A 发生拥塞, 则会导致环中的其它节点发生拥塞, 反之亦然。反馈环中的节点 A 则起着非常重要的作用, 因为它起着将拥塞与否的状态传递到后续时刻的作用, 可以视为关键节点。也可以说, 与关键节点 A 相比, 谁是证据节点就显得无足轻重了。

解决关键节点的拥塞问题也就成为了我们对上述主干网络拥塞控制的关键所在。针对关键节点 A , 我们可以采取相应的拥塞控制策略。按照模型, 我们经过反复的统计、模拟, 调整节点 A 发送和接收缓冲区的大小, 可以得出一个最佳上限阈值。超过了该阈值, 节点 A 将发生拥塞, 并且在后续时刻也将导致环路中的其他节点发生拥塞。

经过推理和分析, 我们可以对关键节点 A 采取以下两种网络拥塞控制策略。

(1) 采用主动队列管理, 根据上限阈值, 通过丢包来积极响应拥塞, 强行使超过上限阈值后到来的分组分流到其他的“辅道”, 而不进入反馈环中, 来达到拥塞控制。

(2) 将关键节点 A 设计成网状拓扑结构, 增加冗余度, 使该节点具有冗余的出入路径, 采用 OSPF 协议, 根据上限阈值, 可以灵活、动态选择最佳路径, 实现分组的改道发送。

结束语 本文所提出的模型并不能完全概括网络中纷繁复杂的拥塞情况, 但是将具体的网络拥塞通过定性概率网络来加以建模, 通过简单的定性推理后, 我们总能找到网络拥塞产生的问题所在, 找到关键节点。通过不断地模拟验证, 从而能够采取相应的拥塞控制策略, 使网络能避免拥塞。

参考文献

[1] 季敏, 张利萍. 网络拥塞控制概述[J]. 军民两用技术与产品, 2006(08): 40-41
 [2] 魏星, 高振中. 网络拥塞控制概述[J]. 桂林航天工业高等专科学校学报, 2008(01): 35-36
 [3] 钱民, 唐克生. 一种具有反馈环的定性动态概率网络的推理算法[J]. 计算机科学, 2010, 37(7A): 76-78
 [4] Tang Ke-sheng, Liu Wei-yi, Qian Min. Application of Qualitative Time-series Dynamic Bayesian Networks with Feedback Loops [C]// Zhu Qingsheng, ed. Proceedings of the 11th Joint International Computer Conference. Singapore, 2005: 513-518
 [5] Wellman M P. Fundamental concepts of qualitative probabilistic networks[J]. Artificial Intelligence, 1990(44): 257-303
 [6] 韦健, 吴祈宗, 黄锴, 等. 定性影响图及其决策算法研究[J]. 微计算机信息, 2008, 24(8-3): 106-108
 [7] 刘双贤, 刘惟一. 基于粗糙集的定性概率网推理冲突解决方法[J]. 计算机应用, 2008, 28(6): 1447-1449
 [8] Druzdel M J, Henrion M. Efficient reasoning in qualitative probabilistic networks[C]// Proceedings of the Eleventh National Conference on Artificial Intelligence. AAAI Press, Menlo Park, California, 1993