

下一代网络中基于遗传算法的 QoS 组播路由算法

刘伟彦 张顺颐

(南京邮电大学江苏省通信与网络技术工程研究中心 南京 210003)

摘要 向用户提供多媒体业务是下一代网络业务最基本、最重要的要求, QoS 组播路由技术是网络多媒体信息传输的核心技术之一。该文给出了支持 QoS 组播的网络模型, 对已有的 QoS 组播路由算法进行了优化, 提出了适用于下一代网络的基于遗传算法的 QoS 组播路由算法。仿真实验表明, 这种算法收敛速度快, 可靠性高, 能够很好地满足下一代网络 QoS 组播的需求。

关键词 下一代网络(NGN), 遗传算法(GA), 服务质量(QoS), 组播路由

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)11-2157-05

A QoS Multicast Routing Algorithms Based on Genetic Algorithm in Next-Generation Networks

Liu Wei-yan Zhang Shun-yi

(Jiangsu Province Engineering Research Center of Telecommunication & Network Technology,
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract Multimedia service is the basic service in NGN. QoS multicast routing algorithms technology is one of the key technology of multimedia transfer. The network model of QoS multicast routing based on project-the key technology of the next-generation networks is presented. Some other approaches are optimized in this paper, and an approach based on genetic algorithm is proposed. The simulation results demonstrate that the proposed algorithm (NGNMR-GA) has fast convergence speed and high reliability, it can meet the requirement of the next-generation works.

Key words Next-Generation Networks (NGN), Genetic Algorithm (GA), Quality of Service (QoS), Multicast routing

1 引言

下一代网络(Next-Generation Networks, NGN)是一个能够支持语音、多媒体、数据和视频的多业务开放网络^[1, 2]。在NGN网络中使用一个统一的平台可以同时传送语音、数据、图像等信息, 提供多种媒体流的实时传输及各种多媒体业务。随着下一代网络的发展, 大量的多媒体应用如电视会议、远程教学等都涉及到多用户的参与, 音频、视频等多媒体业务对网络的服务质量提出了更高的要求, 这要求通信网络能够提供端到端的QoS保证。

当前的QoS研究主要集中在IP网络^[3], 主要是关于调度、拥塞控制和资源预留。而对QoS路由技术研究不多, 因此研究满足下一代网络的QoS组播路由算法有重要意义。

组播(Multicast)是一种由源节点同时向多个目的节点发送信息的通信方式, 组播被广泛应用于多媒体传输。因此QoS组播路由技术是下一代网络的重要研究课题之一^[4, 5]。

组播路由通常采用树型结构, 最常见的是把组播路由问题形式化为图论中的斯泰纳(Steiner)问题, 通过求解斯泰纳

最小树MST(Minimum Steiner Tree, MST)来求解代价最小的组播树^[6], 这一问题已被证明是NP完全问题^[7]。针对组播路由问题提出的算法很多, 通常采用的方法多为启发式, 例如SPH算法^[8], KPP算法^[9]等。文献[9] Kompella等提出的KPP算法, 在斯泰纳树问题中增加QoS限制条件, 是比较早的采用受限MST解决组播路由的启发式算法, 算法在满足一定时延条件下寻找代价最小的斯泰纳, KPP算法的复杂度为 $O(\Delta|V|^3)$, 比较复杂。文献[10]给出的有时延约束条件的斯泰纳树的启发式算法, 先计算最短时延树, 逐步用低代价的链路代替高代价的链路, 由此得到优化路由, 该算法的不足之处是比较费时。文献[3]中Ravikumar等针对时延约束、费用最小组播路由问题, 提出了另一种遗传算法, 算法的缺点是容易陷于未成熟收敛, 算法的精度差一些。由以上分析可知, 目前提出的启发式算法普遍存在算法的复杂度大或太费时、精度差等不尽人意的的问题。

遗传算法^[11-13](Genetic Algorithm, GA)是由美国Michigan大学的Holland提出的, 是一种模拟生物进化过程中达尔文的“优胜劣汰、适者生存”原则的新型优化算法, GA已经被证明是一种解决优化问题的有效途径。作为一种智能优化方法, 遗传算法具有全局性、群体寻优等特点, 近年被广泛应用于计算组播路由问题^[14]。文献[15]提出的通用遗传

2005-06-06 收到, 2005-12-16 改回

江苏省高技术研究计划(BEG200301), 国家“863”计划基金(2003AA121560)资助课题

算法, 算法采用 $N \times N$ 的一维二进制编码机制。这种编码方式存在算法编解码过程较复杂, 而且随着网络规模增大导致算法的搜索空间也急剧增大, 影响算法运行效率。文献[16]提出的基于遗传算法的QoS路由算法, 选择带宽、时延、丢包率、时延抖动等作为选路尺度, 利用遗传算法找到满足这些QoS参数的路径; 但其编码模式使得算法编解码过程复杂, 算法的效率低, 且未对网络资源及负载分布均衡进行优化。文献[17]给出的QoS组播路由的遗传算法采用单点交叉算法, 容易陷入未成熟收敛, 因此其收敛速度慢。本文的交叉操作不同于传统的单点交叉, 采用了相同链路继承的思想, 同时采用参数控制策略在一定程度上避免了局部最优成为全局最优的问题并加快了算法的收敛性。

针对已有算法存在的问题, 在分析已有的基于遗传算法的组播路由算法局限性的基础上, 本文结合对下一代网络关键技术深入研究, 重点研究了支持下一代网络的QoS组播路由算法, 针对QoS的各种性能参数, 采用Früfer树编码, 结合MST最优化方法提出了能够满足下一代网络QoS组播路由的实现简单、收敛速度快的组播路由算法(NGNMR-GA)。本文算法在满足带宽、时延的约束条件下, 使得消耗的网络资源尽可能少, 并使网络负载分布均衡。

2 网络模型研究

研究组播路由问题时, 我们通常把计算机网络描述为一个有向赋权图 $G=(V, E)$ ^[5, 18], 其中 $V=(v_1, v_2, \dots, v_N)$ 是图 G 中所有节点的集合, 节点表示网络中路由器或主机; $E=(e_1, e_2, \dots, e_L)$ 是边的集合, 每条边表示连接网络节点的通信链路。 E 上每条从 i 到 j 的边都定义了3个正实数加权值 (B_{ij}, C_{ij}, D_{ij}) , B_{ij} 表示由节点 i 到节点 j 传送信息的带宽, C_{ij} 表示由节点 i 到节点 j 传送信息的代价, 它反映了通信链路资源的利用情况; D_{ij} 表示由节点 i 到节点 j 传送信息的时延。为了简化问题, 假设节点 i 到节点 j 的边和节点 j 到节点 i 的边上的权值相等, 因此有 $B_{ij}=B_{ji}, C_{ij}=C_{ji}, D_{ij}=D_{ji}$ 。

为不失一般性, 本文考虑一个源节点到多个目的节点的代价最小时延限制的组播问题, 假设信息由一个源节点 $S \in V$ 传送到一组目的节点集合 $D \subseteq V - \{S\}$ 。组播树 $T=(V_T, E_T)$, 其中 $V_T \subseteq V, E_T \subseteq E$, T 中存在由源节点到目的节点 $d \in D$ 的通路 $P_T(s, d)$ 。给出组播路由树 T , T 满足以下关系:

组播树 T 的带宽是源节点 s 到目的节点 $d \in D$ 路径中链路带宽的最小值: $B(T) = \text{Min}(B(e), e \in E_T)$

组播树 T 的代价为: $C(T) = \sum_{e \in E_T} C(e)$

组播树 T 的时延是源节点 s 到各目的节点路径时延的最大值, 即 $D(T) = \text{Max}(\sum_{e \in P_T(s, d)} D(e), d \in D)$ 。

NGN网络中, 带宽和时延是两个重要参数, 假设组播树的最大时延限制为 Δ , 最小带宽约束为 B , 对于一个给定组播请求 R , 构造的组播树满足以下条件:

$$V_T \subseteq V \ \& \ E_T \subseteq E, \quad s \subseteq V_T \ \& \ D \subseteq V_T, \quad B(T) \geq B, \quad D(T) \leq \Delta.$$

假设组播树集合 $S(R)$ 满足以上条件的组播树的集合, 则我们要寻找的组播树 T 为

$$C(T) = \text{Min}(C(T_s), \text{其中 } T_s \in S(R)).$$

3 遗传算法设计

遗传算法GA是一种模拟自然界生物遗传进化机制发展起来的一种优化搜索算法, 它具有以较大概率求得全局最优解、计算时间相对较少、有较强鲁棒性等特点。GA被证明是一种解决优化问题的有效途径, 因此应用遗传算法解决QoS组播路由问题成为研究的热点。遗传算法的一般过程^[11]描述如下:

```

Begin
  t ← 0
  Initialize P(t)
  Evaluate P(t)
  while (Termination not true) do
  begin
    Recombine P(t) get C(t)
    Evaluate C(t)
    Selete from P(t)& C(t) get P(t+1)
    t ← t+1
  end
end

```

其中 $P(t)$ 表示父代; $C(t)$ 表示子代; $P(t+1)$ 表示新种群。

下一代网络NGN是PSTN、移动通信网和分组网(ATM/IP)的融合, 网络在统一的分组网上提供丰富多彩的业务。传统的穷举法不能很好地解决NGN的QoS组播路由算法问题, 一般的遗传算法在解决QoS组播路由问题进行遗传算子操作时染色体中会产生死遗传子, 因而形成不存在的链路及循环链路, 本文算法通过利用Dijkstra第 k 最短路径算法得到备选路径集消除了以上问题的发生。

本文随机产生初始种群, 然后采用选择、交叉、变异等算子使种群向着最优解的方向发展, 从而能得到近似的最优解。

3.1 编码、初始种群的产生

如何将问题的解转化为用编码表达的染色体是遗传算法的关键问题。本文算法中采用了Früfer树结构编码, 每个染色体代表一棵树。

假设给定一个源节点 s 和一组目的节点 $d \in D$, 群体中的每个染色体代表一棵组播树, 初始种群随机生成。产生初始种群前, 对编码空间预处理, 由于源节点 s 到目的节点 $d \in D$ 的路径很多, 因此可能会使染色体的编码空间很大而降低解的收敛性, 因此算法对编码空间进行改进。利用Dijkstra第 k 最短路径算法找出源节点 s 到目的节点 $d \in D$ 的满足时延、带宽约束的路径, 组成路径集合, 作为遗传算

法编码空间的备选路径结合。设 $Q_i = \{P_i^1, \dots, P_i^j, \dots, P_i^k\}, k \leq l$ 。其中 P_i^j 表示目的节点为 i 的第 j 条路径。然后从每个路径集 Q_i 中任选一条路径组成一棵组播树作为初始群体的染色体。这样构成的组播树既能覆盖所有的目的节点,又优化了网络性能,减少了算法的搜索空间,删除了算法选择中不符合约束条件的链路,使算法比较容易实现,提高了算法的求解效率。

3.2 适度函数(fitness function)

适应度函数又称对象函数(object function),是问题求解的评测函数。适应度函数的优劣对算法的收敛起关键作用,是算法用来判断个体好坏的衡量尺度。适应度值越大,表明个体性能越好,遗传到下一代的可能性就越大;适应度值越小,表明个体性能越不好,遗传到下一代的可能性就越小。本文算法中组播树代价和越小,其适应度越高,所以适应度函数定义为代价函数的倒数,即 $f(i) = 1/[C(T)] = 1/[\sum_{e \in E_i} C(e)]$,计算代价 $C(T)$ 时如果有到不同目的节点的路径有重复的链路时,为避免重复,该链路的代价只计算一次。

3.3 选择

选择是用来重组或交叉个体,以及被选个体将产生多少个子代个体。选择操作过程如下:计算适应度,适应度计算后的实际选择,按照适应度从大到小排序,适度值最大的就是最好的个体,将其选做父个体。所有个体的选择概率与其适度值成正比,个体的适度值越大被选择的概率就越高。设种群的大小为 N_{pop} ,则每个个体 i 被选择的概率为: $P_i = f(i) / [\sum_{i=1}^{N_{pop}} f(i)]$ 。如果产生的染色体相同,就只保留一个染色体,将其余的染色体删除,以上过程重复进行完成个体的选择。

3.4 交叉(Crossover)

交叉是按一定概率从亲代群体中随机选择两个个体做为父个体,随机将父个体的部分结构加以替换重组生成两个新的子代个体。交叉操作所产生的子代个体都包含父个体的遗传物质,但又与父个体不同。通过交叉操作,遗传算法的搜索能力大大提高,也是遗传算法获得新的优良个体的重要手段。通过交叉操作能提高向最优解的收敛程度。本算法的交叉不同于传统的单点交叉,而是采用相同链路继承的思想,随机抽取两个父代个体,它们的共同链路部分优先被子代继承,对于不同部分就从被选路径集中随机选择非第一代父代的路径,构成完整的新个体的重组。与传统的单点交叉算法相比,这种交叉法能显著提高算法的收敛速度。交叉概率 P_c 决定了交叉操作的频率,频率越高能越快地收敛到最优解区域,但过高的频率会导致过早收敛,交叉概率 P_c 取值范围在 0.4-0.9。

3.5 变异(Mutation)

交叉之后是子代的变异,遗传算法中,变异是产生新个

体的一种方法。变异本身是一种局部随机搜索,与选择结合在一起保证了遗传算法的有效性,使得遗传算法具有局部的搜索能力同时使遗传算法保持种群的多样性,并能使算法良性方向发展,保证了最优解的搜索能力及解的全局收敛性,防止非成熟收敛的出现。变异概率 P_m 的选取受种群大小、染色体长度等因素影响。变异概率 P_m 通常取值范围在 0.01-0.1。

3.6 参数控制策略

本文算法中的进化参数交叉概率、变异概率不是固定的,而是根据进化的程度采用不同的进化参数。交叉运算和变异运算的目的是扩大搜索空间,避免局部最优的发生。在种群进化的初期选择方法采用轮盘赌选择与 (μ, λ) 选择相结合方式,当达到一定的进化代数 GivenGen 后选用 (μ, λ) 。轮盘赌选择为确定性选择,能从父代和子代中选择最好的染色体,该方法禁止从种群中选取相同的染色体,而 (μ, λ) 保证了每个染色体在下一代中复制的次数与期望值相差不大。进化初期的进化参数稍大些,目的是减少初期的选择压力,对搜索空间进行广度搜索,为不同的个体提供发展机会,防止出现超级染色体在进化初期就霸占选择过程。在进化的终止阶段选择较小的交叉变异概率限制搜索空间以增大选择压力。

交叉概率、变异概率参数控制实现如下:

```

... ..
if (Gen<GivenGen)
Crossover ration=CrossRation1
Mutate ration=MutateRation1
selectiontye = ( $\lambda, \mu$ ) + Roulette
else
Crossover ration=CrossRation2
Mutate ration=MutateRation2
selectiontye = ( $\lambda, \mu$ )
end if
... ..

```

仿真实验证明了在进化的不同阶段采用不同的进化参数,在一定程度上避免了局部最优成为全局最优的问题,同时加快了算法的收敛性。

4 仿真结果分析

为了验证本文所提算法的有效性,对本文算法(NGNMR-GA)进行了仿真实验,仿真环境采用 Matlab6.5 及其遗传算法工具箱 GAOVT5,根据本文算法需求对其进行了改动,添加了参数控制。实验采用的网络拓扑结构如图 1 所示。

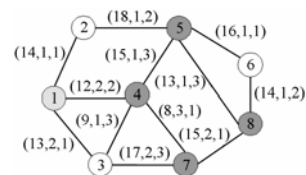


图 1 网络拓扑结构图

Fig.1 Network topology

设图 1 中源节点 s 为节点 1, 目的节点集合 $D = \{4,5,7,8\}$, 图中各边上的数值分别是带宽、代价、时延, 由 (B_{ij}, C_{ij}, D_{ij}) 表示, 其数值是随机给定的。当最小带宽约束 $B = 12$ 时, 利用 Dijkstra 第 k 最短路径算法找出源节点 s 到目的节点 $D = \{4,5,7,8\}$ 的备选路径集合, 删除了算法选择不符合约束条件的链路, 路径集合如表 1 所示。

表 1 源节点到目的节点的备选路径集合

Tab.1 Routing table: source node to destination nodes

目的节点	备选路径集合
4	{1,4},{1,2,5,4}
5	{1,2,5},{1,4,5},{1,3,7,8,5}, {1,3,7,8,6,5}
7	{1,3,7},{1,2,5,8,7},{1,2,5,6,8,7}
8	{1,3,7,8},{1,2,5,8},{1,2,5,6,8}

在本文的遗传算法中, 交叉概率、变异概率根据进化的程度采用不同值, 算法运行如果找不到最优解时就一直进化到实验预先设置的最大运行代数。实验进行了 200 多次, 产生的数据是多次实验求平均值的结果。

最大时延限制 $\Delta = 6$, 带宽限制 $B = 12$ 时, 得到的最小组播树如图 2 所示, 其代价为 9。最大时延限制 $\Delta = 9$, 带宽限制 $B = 14$ 时, 得到的最小组播树如图 3 所示, 其代价为 6。

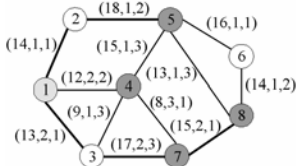


图 2 $\Delta = 6, B = 12$ 时的最小组播树

Fig.2 Minimum multicast trees ($\Delta = 6, B = 12$)

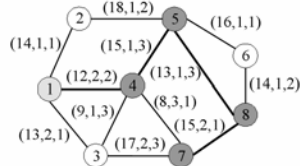


图 3 $\Delta = 9, B = 14$ 时的最小组播树

Fig.3 Minimum multicast trees ($\Delta = 9, B = 14$)

将本文算法(NGNMR-GA)与文献[17]的算法(MR-GA)进行了对比。两种算法产生组播树的代价随进化代数的收敛情况的比较见图 4、图 5。

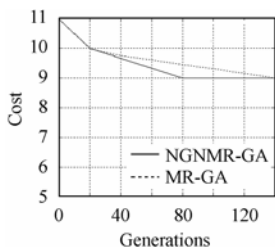


图 4 $\Delta = 6$ 时组播树代价随遗传代数的变化曲线

Fig.4 Generations vs. cost ($\Delta = 6$)

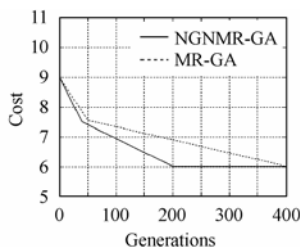


图 5 $\Delta = 9$ 时组播树代价随遗传代数的变化曲线

Fig.5 Generations vs. cost ($\Delta = 9$)

图 4 是最大进化代数 $\max\text{GenTerm} = 140$, $\Delta = 6$ 时的仿真变化曲线, 本文算法 NGNMR-GA 进行到约 80 代时就收敛到了全局最优, 而对比的 MR-GA 算法在接近 140 代时才

趋于收敛, 本文算法在满足约束条件下使得子代能很好地继承父代的良好性能。图 5 是最大进化代数 $\max\text{GenTerm} = 400$, $\Delta = 9$ 时的仿真变化曲线比较, MR-GA 算法在 400 代内有 13.7% 找不到最优解, 本文的 NGNMR-GA 算法有 2.8% 找不到最优解, 收敛速度高于 MR-GA。两组仿真曲线表明在不同的时延约束条件下本文算法产生最优解的速度比较快。

由以上两组分析结果可得, 本文提出的算法的收敛速度比文献[17]的 MR-GA 算法有明显的提高, 尤其是对于下一代网络中, 当带宽约束、时延限制较大, 备选路径增多时本文算法优势更明显。

图 6 是对进化过程中采用可变参数作用的验证, 实验采用与图 1 相同的网络模型。分别对进化参数交叉概率、变异概率可变与交叉概率、变异概率不变的情况进行了比较。最大进化代数 $\max\text{GenTerm} = 300$, $\Delta = 9$, 仿真实验进行了 200 次, 交叉概率、变异概率的变化遵循本文的参数控制策略。仿真结果表明采用进化参数可变的算法在进化到 180 代时就收敛到了全局最优解, 而相同条件下的进化参数固定不变的算法在进行到 240 代时才趋于收敛。仿真结果证实进化的不同阶段采用不同的交叉概率、变异概率在达到相同代价的情况下, 在种群进化过程中采用可变进化参数时, 算法的收敛速度明显加快。

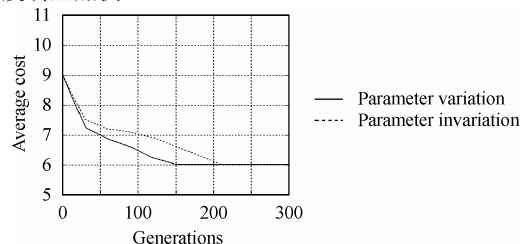


图 6 进化参数改变与进化参数不变的对比

Fig.6 Comparison of variation and invariance of evolution parameters

5 结束语

本文通过对下一代网络的关键技术的深入研究, 分析了有关 QoS 组播路由问题已有算法的不足, 提出了基于遗传算法的下一代网络 QoS 组播路由算法。该算法具有以下特点: (1) 编码采用基于路径的 Prüfer 树结构编码, 简化了编码操作, 省略了复杂的编解码过程; 对编码空间进行预处理, 删除了不满足约束条件的链路, 减少了算法的搜索空间, 提高了算法的求解效率; (2) 交叉操作不同于传统的单点交叉, 采用了相同链路继承的思想, 有效保留了组播树中的相同链路。(3) 参数控制策略在一定程度上避免了局部最优成为全局最优的问题并加快了算法的收敛性。仿真结果表明本文算法收敛速度快, 有较强的实时性、有效性, 能满足下一代网络 QoS 需求。

参考文献

[1] 龚双瑾, 刘多. 下一代电信网的关键技术. 北京: 国防工业出版社, 2003: 191-192.

- [2] 王三海, 杨放春. 下一代网络端到端 QoS 体系的研究. 北京邮电大学学报, 2004, (3): 32–36.
- [3] Ravikumar C P, Bajpai R. Source-based delay-bounded multi-casting in multimedia networks. *Computer Communications*, 1998, 21(2): 126–132.
- [4] Schollmeier Gero, Winker Christian. Providing sustainable QoS in next-generation networks. *IEEE Communications Magazine*, 2004, (6): 102–107.
- [5] 林闯, 单志广, 任丰原著. 计算机网络的服务质量(QoS). 北京: 清华大学出版社, 2004, 4: 186–205.
- [6] Hwang F K. Steiner tree problems [J]. *IEEE Networks*, 1992, 22(1): 55–89.
- [7] Rouskas G N, Baldine I. Multicast routing with end-to-end delay and delay variation constraints [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1997, 15(3): 346–356.
- [8] Bauer F, Varma A. Distributed algorithms for multicast path setup in data networks[J]. *IEEE/ACM Transaction on Networking*, 1993, 1(3): 286–292.
- [9] Kompella V P, Pasquale J C, Polyzos G C. Multicast routing for multimedia communication. *IEEE INFOCOM*. 1992, 3: 2078–2085.
- [10] Zhu Q. A source-based algorithm for delay-constrained minimal-cost multicasting[A]. In: Proc IEEE INFOCOM'95, 1995, 377–384.
- [11] 玄光男, 程润伟. 遗传算法与工程优化. 北京: 清华大学出版社, 2004, 1: 1–291.
- [12] Chen Gou-Liang. Genetic Algorithm and its Application. Beijing: People's Posts and telecommunications Press, 1996.
- [13] 王小平, 曹立明著. 遗传算法——理论、应用与软件实现. 西安: 西安交通大学出版社, 2002, 1.
- [14] Abhishek Roy, Sajal K. Das. QM²RP: A QoS-based mobile multicast routing protocol using multi-objective genetic algorithm. *Wireless Networks*, 2004, 10 (3): 271–286.
- [15] 何小燕, 费翔, 罗军舟等. Internet 中一种基于遗传算法的 QoS 路由选择策略[J]. 计算机学报, 2000, 23(11): 1173–1178.
- [16] Xiang F, Zhou J, Jie Y W. QoS routing based on genetic algorithm [J]. *Computer Communications*, 1999, 22: 1392–1399.
- [17] 石坚, 邹玲, 董天临等. 遗传算法在组播路由选择中的应用[J]. 通信学报, 2002, 28(5): 88–89.
- [18] Chen Shigang, Kiara Nahrstedt. An overview of quality of service routing for next-generation high-speed networks: Problems and solutions. *IEEE Network*, 1998, 12(6): 64–79.
- 刘伟彦: 女, 1973 年生, 博士生, 研究方向为计算机通信与 IP 技术、下一代网络关键技术.
- 张顺颐: 男, 1944 年生, 南京邮电大学副校长, 教授, 博士生导师, 中国电子学会通信分会理事, 中国通信学会通信软件分会理事, 国家 863 通信主题高速宽带通信技术经济专家组成员, 目前主要研究方向为计算机通信网与 IP 技术.