

QoS 组播路由:算法与协议^{*}

黄东军 蔡雪莲 王建新 陈松乔

(中南大学信息科学与工程学院 长沙410083)

A Survey of QoS-Aware Multicast Routing Algorithms and Protocols

HUANG Dong-Jun CAI Xue-Lian WANG Jian-Xin CHEN Song-Qiao

(College of Information Science and Engineering, Central South University, ChangSha 410083)

Abstract This article provides a survey of the QoS-aware multicast routing algorithms and protocols. A modified group model and a description about QoS-aware multicast routing problem have been proposed. The main contribution to the designing of multicast architectures is that it initially defines the differences between multicast routing algorithms and protocols by pointing out that algorithm is the core of a multicast routing protocol but the protocol has its own characteristics in formulation and suitable for different environments. After the discussion we categorize existing algorithms and protocols into various types. We also introduce many important evaluation standards for multicast routing algorithms and protocols. Finally the article makes the conclusion by pointing out some possible future research directions.

Keywords Multicast, Algorithm, Protocol, Model, Classification, Evaluation, Research direction

1 引言

组播试图将源端数据流的单一副本通过网络(互联网)传送到一组接收者,目的是减少网络不必要的带宽开销。组播技术的关键是组播树(Multicast Tree)的建立,正是依靠组播树,源端只需要产生并发送一个数据流,通过组播路由器的复制和转发,数据流被传送到一组接收者。与利用多个单播(Unicast)将数据流传送给一组接收者相比,组播极大地减少了网络资源的消耗,同时也大大减轻了源主机负担^[34],组播的有效性是确定无疑的^[35]。受益于组播技术的应用主要包括视频会议、Internet-TV、远程教学、分布式交互仿真(DIS)等。这些多媒体应用的主要特点是对服务质量(QoS)的要求,可以称它们是QoS敏感的。因此,具有服务质量保证的QoS组播(QoS-Aware Multicast)研究越来越受到人们的重视^[1]。

组播是一个庞大的研究领域,主要议题包括组播路由算法和协议、可靠组播、安全组播、基于主机的组播以及组播应用等^[5],其中组播路由算法和协议是核心,是实现组播的关键。本文对目前组播路由特别是QoS组播路由算法和协议进行了回顾和总结,目的是为深入研究组播路由算法与协议提供有益的启示。

2 组播路由问题

组播所涉及的网络通常可表示成一个赋权图 $G=(V, E)$ ^[6],其中 V 是节点(表示网络路由器)的集合, E 是边(表示网络结点之间的链路)集合。 G 的一条链路可表示为二元组 (v, u) , $v, u \in V$ 。 $|V|$ 和 $|E|$ 分别表示节点数和链路数。不失一般性,本文仅考虑简单图,即无环且连接同一对相邻节点的链路数不大于1的图。

为了表示网络状态,我们给每条链路赋予一些参数。

定义1 对 $\forall e \in E$,存在链路集合 E 到正实数集合 R^+ 的映射 $d: E \rightarrow R^+$,且 $d(e)$ 表示链路 e 上的延时,包括排队延时、传输延时、传播延时,则称 $d(e)$ 是链路 e 的延时权函数。

定义2 对 $\forall e \in E$,存在链路集合 E 到正实数集合 R^+ 的映射 $w: E \rightarrow R^+$,且 $w(e)$ 表示链路 e 上的可用带宽,则称 $w(e)$ 是链路 e 的带宽权函数。

$d(e)$ 和 $w(e)$ 反映链路的状态。同样,网络节点也存在相应的状态信息,例如节点的每个转发端口的可用缓冲区大小(buffer space available)等。通常缓冲区大小是有限的,队列不能无限增长,如果队列满了而仍有包到达,某些包就会被丢弃。但是,在很多情况下假设缓冲区是无穷大对于分析问题没有实质性影响^[3]。

组播路由的核心问题是如何建立组播树。组播树又称为转发树(forwarding tree)或交付树(delivery tree)^[8]。

定义3 设 T 是图 $G=(V, E)$ 的一个子图, M 是 G 中的一个群组;如果 T

- ① 不包含回路;
 - ② T 的路径通过 M 的全部成员;
- 则称 T 为 G 的一个组播树。

显然, T 可以包含非 M 成员节点,这些节点构成组播树的一部分。 T 中非 M 成员节点位于从源端 v_s 到接收者节点 $v_d \in M - \{v_s\}$ 的传输路径上,可用 $P_i(v_s, v_d)$ 表示该路径,显然 $P_i \subset T$ 。

对于给定的网络 G ,一个组播任务可描述为一个4元组 $\tau=(M, Q, O, T)$,其中 M 是组播群组; Q 是任务 τ 的服务质量要求,即QoS约束,一般包括端到端延时限制、最低带宽要求、延时抖动限制和丢包率等; T 是完成任务 τ 所需要建立的

^{*}国家863计划(2001AA411040)和教育部高等学校骨干教师资助计划(教科司[2000]143号)资助项目。黄东军 博士生,副教授,主要研究领域为Internet组播与应用、分布式多媒体系统。蔡雪莲 硕士研究生,主要研究方向是Internet组播性能评价。王建新 博士,副教授,主要研究领域为QoS路由算法、网络性能评价。陈松乔 教授,博士生导师,主要研究方向为网络计算、软件工程等。

组播树; O 是一组对 T 进行优化的目标函数, 例如使 T 的总带宽为最小等。一个没有 QoS 约束的组播可视为 τ 的一个特例。组播路由问题可定义如下。

定义4 对于给定的网络 G , 通过某种算法和相关协议, 构造一个可以完成组播任务 τ 的组播树 T , 使 T 伸展到 M 的所有成员。

3 组播路由算法与协议分类

算法决定组播树的建立过程, 指明经过什么样的操作步骤使组播路由建立起组播转发表; 协议则是为实现算法而规定的相关数据结构以及交换这些数据的规程。不同的协议通常会使用不同的算法, 例如 DVMRP(v3)^[3] 协议使用了基于“广播并剪枝”的 RPM^[10] 算法, 而 MOSPF^[11] 协议则使用了最短路径算法。但是, 不同的协议也可以使用相同或相似的算法, 例如 PIM-DM (协议无关组播协议—密集模式)^[12] 就使用了与 DVMRP 相同的 RPM 算法。两者的差别在于, PIM-DM 不包括传播常规单播路由信息的工具, 而是假设路由器已经使用了一个常规单播路由协议来计算出每个目的站的最短路径。可以说 PIM-DM 是不带路由更新组件的 DVMRP 协议。

从上述分析可以看出, 算法是更单纯的东西、是协议的核心, 算法决定协议的基本特征; 协议是围绕算法而发展的一整套规约, 协议把算法有机地包含在内, 但协议的内容更宽泛。协议更多地关心路由信息收集和维持问题、群组关系管理问题等。

3.1 组播算法

集中算法与分布式算法 集中路由算法 (centralized routing algorithm) 也称显式路由 (explicit routing) 或源路由 (source routing) 算法^[13]。其特点是, 源节点计算出从源端到目标节点的整个组播树。为此, 网络中的每个路由器都必需维护一个全局状态 (global state) 信息库, 并且周期性地对其更新。最具代表性的采用集中路由算法的协议是 MOSPF。当一个 MOSPF 路由器第一次接收到一个组播数据包时, 它就使用 Dijkstra 算法计算出以该数据报源端为根的最短路径树 (shortest path tree)。由于所有路由器都拥有相同的网络拓扑信息, 因此 OSPF 区域内的每个路由器将计算出相同的组播树。源路由算法的问题是路由器为存储全局状态而付出的开销较大, 同时它也是计算密集的, 但它可以有效地避免环 (loop) 的出现。

分布式算法 (distributed multicast algorithm) 的特点在于组播树计算是由位于不同网络中的多个路由器协作完成的。例如 PIM-SM (协议无关组播协议—稀疏模式)^[14] 的算法是分布式的。PIM-SM 需要一个被称为汇聚点 (Rendezvous Point, RP) 的核心路由器, 它负责管理相应的群组。当主机想加入群组时它必须向本地的 PIM 路由器发送一个 IGMP 报文, 而该路由器向 RP 单播一个加入请求, 沿路的路由器都检查这个报文, 如果一个路由器已经是树的一部分它就会截取该报文并返回一个应答, 然后组播数据流就可以被传送到端节点了。分布式算法的优点是计算负担被分散了, 但容易导致环的出现。

分布式算法还可细分为需要全局状态的和不需要全局状态的。例如 PIM-SM 需要常规单播路由信息来适应网络结构的变化, 因此它是需要全局状态的。一些纯粹以泛洪技术 (flooding) 为基础的算法可归于不需要全局状态信息的分布式算法, 因为其使用的泛洪技术完全是依靠所有路由器的简单协作建立传播树的。例如在 Spanning-Join^[15] QoS 组播路由

协议中, 路由器接收到组播数据包时只是在除了数据包到达的端口外的其余端口上转发数据包, 因此它不需要全局状态信息。这两种分布式算法中, 前者跟源路由一样面临存储开销太大的问题, 而后者又会引起较高的传输开销。

确定性算法、近似算法与启发式算法 所谓确定性算法 (exact algorithm) 是指在一定条件下以确定的计算步骤求解问题的算法。确定性算法的优点是简单, 但不提供回溯能力。确定性算法往往具有较高的多项式时间复杂度。例如 MOSPF 所使用的 Dijkstra 算法是确定性的, 算法根据路由器所存储的全局状态拓扑信息, 计算出从源节点到目的节点的最短路径树, 其时间复杂度为 $O(|E|\log|V|)$, 其中 $|E|$ 是网络的边数, $|V|$ 是网络节点数。

近似算法 (approximate algorithm) 是指以多项式时间解决优化问题并保证能够得到接近优化的近似解的算法^[36]。KMB 算法 (Kou, Markowsky 和 Berman) 是一个被评述较多的 Steiner Tree (最小代价组播树) 近似算法^[37]。算法首先从网络拓扑图 G 生成一个完全距离图 H (complete distance graph); 然后寻找一个 H 的最小生成树 U ; 接着通过将 U 的每个节点转换成其相等的最短路径得到一个连通子图 V ; 之后对 V 运用最小生成树算法求得一个生成树 T ; 最后对 T 剪枝直到它不含任何非组播节点为止。Wall 给出了一个 KMB 分布式版本。KMB 树的代价比 Steiner Tree 平均多 5%。由于 KMB 算法需要网络全局拓扑信息, 因此不太适合大规模网络, 同时 KMB 还假设群组是静态的。

启发式算法 (heuristic algorithm) 采用某个启发式函数或启发式规则对计算步骤进行限制, 它不保证一定能够找到可用解, 但是一个设计较好的启发式算法, 往往能够得到接近最优的解 (near optimal solution), 同时具有相对低的时间复杂度。由于很多 QoS 组播路由问题是 NP-HARD^[6] 的, 例如延时受限的 Steiner-tree 问题、带宽受限的 Steiner-tree 问题等等, 因此大部分这类问题都采用启发式算法。文[38]提出了一个解决延时受限的优化树问题的启发式算法。算法定义链路代价为其利用率的函数, 并定义树中的最长简单路径 (longest simple path, 即仅含度数为 2 的在树节点的路径) 为超级边 (superedge)。算法首先计算出根于源端的最小延时组播树, 然后重复用非组播树超级边替换树中的超级边, 替换中始终保持不破坏延时限制, 直到树的总代价不能减小为止。算法的时间复杂度为 $O(k|V|^3 \log|V|)$ 。所有受限 Steiner Tree 算法的复杂度都不低^[6]。

数据驱动算法与需求驱动算法 数据驱动算法 (data-driven) 也称为源发起算法 (source-initialized)^[16], 其特点是算法先在网络中将数据发送到所有节点, 直到传播了否定信息后一些节点才停止转发。基于泛洪技术 (flooding) 的反向路径转发 (RPF)、截尾反向路径转发 (TRPF) 和反向路径组播 (RPM) 算法均属数据驱动的^[4]。数据驱动算法不需要传播成员信息, 但会在一些没有接收者节点的分枝上产生额外的传输开销, 同时这种方法不支持基于接收者的 QoS 请求选路。

与数据驱动算法不同, 需求驱动 (on-demand) 算法是由欲加入群组的接收者发起的 (receiver-initialized), 只有当源节点或在树节点 (on-tree-node) 接收到加入请求后才开始转发组播数据。MOSPF、CBT、PIM-SM 等协议采用了需求驱动算法。需求驱动算法克服了数据驱动算法会在一些没有接收者节点的分枝上产生额外传输开销的弊端。但是, 象 MOSPF 这样的协议它需要传播成员关系信息, 其规模伸缩性也不好, 因为它的路由决策依赖于特定组的链路状态信息的广播。CBT 和 PIM-SM 则由于其良好的规模可伸缩性而受到更多

关注^[40]。

单路径算法与多路径算法 单路径路由算法(single path routing, SPR)提供一条单一的路径将新成员连接到组播树上,而多路径路由算法(multi path routing, MPR)提供多条路径供新成员选择,确定其中最能满足其要求的一条连接到树上^[17,18]。MOSPF、CBT 和 PIM-SM 等协议都采用了单路径路由算法。Spanning-Join QoS 组播路由协议^[15]所用算法是 MPR 的典型代表。其工作过程是:新成员先在邻居节点中广播 join-request 加入请求报文以寻找在树节点。当一个在树节点接收到 join-request 报文时,它就发送一个应答报文 ack 给新成员。这个由单播(unicast)路由协议决定的 ack 传输路径即为一条候选组播路径。新成员可以接受到多个应答报文,每个应答都对应该一条候选路径。应答报文在传输过程中收集它所经过路径的 QoS 属性,因此新成员可以根据应答报文中所携带的 QoS 信息选择一条最佳路径。在新成员距离组播树比较远时,Spanning-join 方法需要连续广播加入请求报文,直至遇到在树节点(on-tree-node),所以这种方法会明显增加网络带宽开销。QoS MIC^[18]是另一个受到关注的多路径路由协议,它采用了本地搜索(local search)和树搜索(tree search)相结合的策略。多路径路由算法较单路径路由算法在支持 QoS、提高连接成功率、缩短加入时间等方面有较大优势,但它的控制报文开销较大。如果能够找到有效办法降低这种开销,多路径路由是更有前途的算法。一些学者基于理论和实验分析,也倾向于发展多路径路由协议^[19]。

事实上,各种组播算法之间还有一些区分,例如还存在动态算法与静态算法的区别,由于几乎很少有协议采用静态算法,因此本文不再对此加以分析。

3.2 组播协议

3.1 节对算法从技术角度进行了分类,由于算法是协议的核心,因此可以说也是用算法对协议分类,而且是从协议内部进行的分类。但同时我们也可以从协议外部或宏观上进行分类。协议的外部特征是指协议的形式特征,即协议的数据结构、交换数据的规程、应用形式等。大多数研究人员在对组播路由算法和协议进行分类时,也是分别就算法和协议进行分类的,但他们常常将两个方面的分类自觉或不自觉地相互混淆,他们对协议分类时实际上回到了用算法来做标准^[6],虽然得到了协议的算法区别,但往往忽视了协议的外部特征。

源基树协议与共享树协议 源基树(source-based tree)也称为每源树(source-per tree)或源根树(source-rooted tree)^[20]。源基树协议采取为群组中的每一个组播源建立一棵组播树的策略。这种协议能够为每个源端提供优化的组播树,同时有利于网络负载的平衡。但是,正如本节开始所讨论的那样,为群组的每个源端分别建立组播树会使组播路由表的大小正比于互联网中的网络数与群组数的乘积,所以这类协议的规模伸缩性(Scalability)不好。源基树协议比较适合于一点到多点的组播通信。DVMRP、PIM-DM、MOSPF 等协议即属于源基树协议。

围绕构造 QoS 受限的源基树,形成了一类 Steiner Tree 问题及其解法。由于求解 Steiner Tree 问题的方法在实现上具有较大的局限性,因此它们往往只是在理论上表现出给人以启示的价值^[6]。

共享树(shared tree)也称为核基树(core based tree),其基本思想是尽可能地让群组的所有源端共享同一个转发树^[21]。共享树协议建立一棵植根于被称为汇聚点(Rendezvous Point)的核心路由器(core router)的树。这种策略的优点是每个路由器无需存储(源,组)对的组播路由表,而

是存储形如(*,组)的表项,*号表示任意源,因此存储开销只正比于群组数,故有较好的规模伸缩性。共享树算法的问题在于通信量在汇聚点的集中导致瓶颈效应,同时共享树往往难以做到为所有源节点提供最优路由。CBT 和简单组播(SM)^[22]等协议属于共享树类型的协议。PIM-SM 严格讲属于混合型协议,因为它的主体是共享树协议,但是它也支持共享树向最短路径树切换。

域间协议和域内协议 域间协议和域内协议是与协议层次化相关的两个概念。

在广域网环境下,组播的关键问题是提高协议的规模伸缩性(Scalability)。最自然的解决规模问题的有效方法是设计层次路由协议(hierarchical routing protocols)。层次路由协议的基本思想是把节点划分成一些区域(如管理域 ADs,或自治系统 ASs),每个区域被赋予一个全局唯一标识,域内的拓扑结构对域外节点是透明的,即一个节点仅知道它所在域的拓扑信息,对其它域的拓扑结构细节不了解。工作在域间的组播协议(即域间协议,inter-domain routing protocols)负责维护和传播域互联信息。相对的域内协议(intra-domain routing protocols)负责在一个区域内的组播。

一个层次组播协议既包含域间也包含域内协议。DVMRP 是第一个层次组播协议。它把网络分割成若干自治域,域内的路由器 L₁运行 DVMRP 的内部实例。同时,每个域至少拥有一个边界路由器(boundary router),记为 L₂,它们把各个域连接起来。L₂运行 DVMRP 的域间实例,通过建立基于(domain-ID,group)对的组播路由表来实现域间转发。

BGMP(Border Gateway Multicast Protocol,边界网关组播协议)^[39]是一个域间组播协议,它实现在自治系统边界路由器上,构造一个域间的单根双向共享组播树,并允许域内使用任何组播路由协议。

MOSPF 协议也是层次化的,因为它支持 MOSPF 区域(MOSPF area)的概念。

PIM、CBT 等协议是单层的,而互联网事实上由多个自治系统构成,网络的异构性使象 PIM、CBT 这类单层协议不能普遍部署,所以它们本质上属于域内协议。

协议无关协议与协议相关协议 协议无关的含义是指组播协议与标准单播选路协议共存的能力。例如,PIM 可以使用任何选路协议(如 RIP 或 OSPF)来维护单播路由,它本身并不传播单播路由,而是假设每个路由器已经运行着一个维护单播路由的常规选路协议。但是象 MOSPF 这样的组播路由协议,使用了 OSPF 的拓扑数据库为每个源端产生一个组播树。所以,MOSPF 是与单播路由协议 OSPF 相关的。研究人员已经注意到这样一个更广范围的议题:“组播路由如何从常规路由协议收集到的额外信息受益”^[4]。多数研究人员倾向于发展协议无关组播路由协议。由于 PIM-SM 协议具有协议无关的特点,同时其规模伸缩性比较好,因此得到了相当多的研究。

QoS 组播协议与非 QoS 组播协议 根据协议是否支持 QoS 特性,它们又可分为 QoS 敏感的(QoS-sensitive)^[13,16~18,32,33]和非 QoS 敏感(QoS-oblivious)的^[9,11,12,14]。QoS 组播试图建立一棵从源端到成员节点的满足一定 QoS 请求的优化组播树。非 QoS 组播则采用传统的 IP 尽力而为(best-effort)机制传输组播数据。

源基树多半使用最短路径树(shortest path tree,STP)的概念建立植根于发送者的组播树,由于最短路径通常就是最小延时路径,因此这种组播树会提供良好的延时 QoS。但是,最短路径源基树除了伸缩性不好和资源开销大以外,它并不

能保证建立的组播树具有应用所要求的 QoS,因为它所做出的路由决策不是基于网络的可用资源和 QoS 状态,而是网络的拓扑结构,所以,它称不上是真正的 QoS 组播协议。

另一方面, IETF 为发展 QoS 互联网开发了综合服务/资源预留协议(IntServ^[24,25]/RSVP^[23])、区分服务(DiffServ^[26])等协议。但是,由于 IntServ/RSVP 协议不是路由协议,其应用依赖于底层的路由机制,如果路由协议所确定的路由不具有应用要求的 QoS 资源,那么应用的资源预留能力就是一个浪费。因此,找到一棵伸展到群组成员的组播树,使树上的每一个路由器都具有媒体数据流所需要的可用资源,仍然是组播路由协议必须解决的问题。很多研究者相信, QoS 组播路由协议是提高网络资源利用率不可缺少的组件。

目前大部分研究人员比较注意组播与资源预留集成的问题。文[16]提出了一个通过资源预留来实现具有服务质量保证组播的协议 MQ。注意到 RSVP 被用于 QoS 组播时,由于组播树的确定常常是由源节点发起的,因此会导致所谓“面向发送者的资源预留”问题(the problem of sender-oriented with RSVP),该问题使组播协议难以适应异构网络环境,即不能满足不同用户的 QoS 需求,作者构造了一个基于成员节点发送显式加入请求(explicit join request)和软状态机制(soft state mechanism)的分布式算法。算法可用于源基树也可以用于共享树。作者称 MQ 跟一些与资源预留结合不密切的 QoS 组播协议(MOSPF)相比较,具有更强的异构支持能力、更好的可伸缩性和更低的呼叫阻塞率。

文[33]所提出的协议 QMD 代表了发展 QoS 组播方法的另一个方向。QMD 针对以往 QoS 组播均以每流资源预留(per-flow resource reservation)为基础会引起路由器过量的状态信息存储开销的弊端(例如上文的 MQ 协议实际上仍然存在伸缩性问题),企图实现一个作用于 DiffServ 域的 QoS 组播,它能显著减少核心路由器的路由负担。在 QMD 中,边界路由器(edge router)负责处理成员节点的加入和退出、搜索满足 QoS 请求的树枝、为用户预留资源。QMD 中有一类所谓关键节点(key nodes),它们是在树节点的一个子集,这些关键节点维护组播路由状态信息并转发组播通信量,其它在树节点则不需要维护任何状态与 QoS 预留信息。作者宣称 QMD 具有更好的规模伸缩性、较高的 QoS 呼叫成功率和较低的协议开销。

总之,组播算法是组播协议的核心,而协议包含更加广泛的内容;组播算法具有丰富的类型,而组播协议又表现出不同的形式。这些不同的算法类型和不同的协议形式相互交叉组合可以产生很多种不同的组播协议。这正是组播研究呈现出蔚为大观的多样性与复杂性的原因所在。

4 组播路由协议的性能评价

为什么组播路由比单播路由更困难?组播路由究竟有何特别之处?答案集中在组播转发机制上。首先,由于路由器需要将进入的组播数据流在多个端口上转发,因此路由器在转发前必须检查多个端口,这就需要存储群组成员的相关信息,即组播路由表;第二,对于一个群组,它的每个成员都有可能是源端,如果为每一个源节点都建立一个组播树的话,组播转发表的表项将是一个(源,组)对,因此,组播路由表的大小将正比于互联网中的网络数与群组数的乘积(单播路由表正比于互联网中的网络数);第三,在单播路由中,只有当网络拓扑结构发生改变或者设备出现故障时,才会发生路由改变,而组播则不同,不仅网络拓扑结构发生改变或者设备出现故障时组播路由会改变,更重要的是应用程序加入或退出一个群组

就会引起路由的变化;换句话说,组播路由是一个更加动态化的问题。总之,所有组播路由方法都要提供一种传播成员信息的机制,同时提供利用这些信息以转发组播数据包的方法。而将 QoS 机制引入组播使组播问题更富挑战性。组播算法和协议设计的目标就是尽可能降低传播成员信息的代价同时又提高转发效率。各种组播路由方法的设计都是在这两个极端之间寻找某个折衷。

那么,如何对组播路由协议进行性能评价呢?这仍然是一个值得大力研究的课题。这里有两个问题:评价方法和度量指标。在评价方法上,存在两种选择:一是进行实际的 Internet 环境测试,这需要相当的条件才能完成;二是使用模拟仿真软件,目前大部分研究人员采用了这种方法。限于篇幅,本文不详细介绍这些内容。

在协议性能的度量指标上,研究人员提出了许多评价标准。

文[17]提出了一个 QoS 组播路由协议 QMRP,它将单路径路由和多路径路由结合起来。QMRP 先采用单路径路由搜索,如果失败,搜索退回到失败点的前趋节点并转而采用多路径搜索。文章用两个指标度量协议性能:平均呼叫接受成功率(average call accepted ratio, ACAR)和平均报文开销(average control message overhead, ACMO),其定义是:

$$ACAR = \frac{\sum_{i=1}^N accepted(R)}{N}$$

$$ACMO = \frac{\sum_{i=1}^N MessageSent(R)}{N}$$

其中, N 是请求总数, $\sum_{i=1}^N accepted(R)$ 是被接受的路由请求总数; $\sum_{i=1}^N MessageSent(R)$ 是一次测试中发送的报文总数;值得注意的是,如果一个报文通过了 m 跳(m hops)路径,该报文将记为 m 个。

文[33]的 QoS 组播算法(参见 3.2 节)除了采用平均呼叫成功率、平均报文开销以外,还测试了平均路由状态量(average routing states)和核心路由器(core router)的平均控制报文开销(average number of core routers involved)。

文[27]注意到多个群组的组播树在一些路径上的重叠性,提出了一个基于动态覆盖树路径的可伸缩组播路由算法(DOTP)。该文采用 OPNET^[28]作为其算法的模拟软件。但主要考察了组播路由表的大小、控制报文开销,得到平均路由表尺度(average table size)与群组数、控制报文开销与群组数的曲线关系:

$$average\ table\ size = f(group\ number)$$

$$control\ overhead = g(group\ number)$$

文[32]针对 CBT 协议在有大量组播群组并且都以同一路由器做核(core)的情况下会产生通信量集中从而导致瓶颈效应的问题,提出了一个旨在减少通信量在核周围聚集的 QoS 组播协议,该文也采用了平均呼叫成功率 ACAR、平均呼叫建立时间 ACST 两个性能度量指标,同时还增加了第三个指标:切换因子 Switching Factor,用来测量多目标组播协议中通过切换目标建立连接的比例。

值得注意的是,研究人员对算法的评价侧重点在时间复杂度,例如大部分关于 Steiner 树的求解算法都主要测试了算法的计算需求以及所生成的树的质量。文[30]提出了一个最低代价延时受限组播树算法,基本思想是用当前在树节点距离破坏 QoS 延时限制点的远近作为启发式度量,其绘制的曲

线关系主要包括:

群组大小、延时一定, 计算时间 $=f(\text{网络节点数})$

网络节点数、延时一定, 计算时间 $=f(\text{群组节点数})$

群组节点数、网络节点数一定, 计算时间 $=f(\text{延时限定值})$

群组节点数、延时一定, 计算时间 $=f(\text{网络节点数})$

总起来看, 各种标准往往针对某种类型的算法和协议形式, 都只是从一个或几个侧面来考察协议性能。考虑一个可接受的统一标准尚需时间。不过, 各种组播协议不论其算法有何差别, 协议的形式有何不同, 协议开销都是主要评价指标。

结束语 组播路由及其 QoS 扩展是 QoS 网络基础结构必不可少的组件, 其主要目标是构造一个资源优化、满足应用程序一定 QoS 需求的组播树。本文对组播算法、协议以及 QoS 组播问题进行了综述, 给出了一个群组模型, 提出了一个 QoS 组播路由问题的一般描述; 特别在组播算法与组播协议的概念上作了区分, 提出了组播路由协议的算法特征和协议的形式特征两个既相联系又相区别的概念, 并对算法特征和协议形式进行了划分, 穿插其间介绍了若干组播算法。最后讨论了协议性能评价问题。

QoS 组播在互联网上最终实现之前, 仍然有很多问题需要解决。第一, 在 QoS 组播协议的复杂性和对协议性能的改进之间如何平衡, 目前仍需要进行以试验为主的深入研究, 文[31]认为首先值得注意的研究课题是评估 QoS 组播的代价和可用性, 这些代价主要是处理代价和协议开销, 必须把这两个指标限制在现代技术的可行范围之内。第二, 层次化的 QoS 驱动的组播路由协议也是非常值得研究的问题。有必要将一些理论结果尽快通过试验加以证实, 并力求提高协议的规模可伸缩性, 并减少对现存路由协议的冲击。第三, 把组播路由和资源预留 (Resource Reservation) 集成起来的问题。RSVP 协议把路由和资源预留区别对待。但是, 很多研究人员主张在路由决策中将资源预留集成进来。不过也有不同的看法。人们希望从定性和定量的高度, 弄清结合的有效性以及会在多大程度上给互联网带来不必要的冗余功能。总而言之, 组播问题的研究空间还相当大。

参考文献

- Almeroth K. The evolution of multicast: from the Mbone to inter-domain multicast to internet2 deployment. IEEE Network, Special Issue on Multicasting, Jan. 2000
- Host group. A multicast extension to the Internet Protocol (RFC0966)
- Stallings W. High-Speed Networks TCP/IP and ATM Design Principles, Prentice Hall, Inc. 1998. 363~382
- Comer D E. Internetworking with TCP/IP Volume 1: Principles, protocols, and architectures, fourth edition, prentice hall, 2001. 68
- Roca V, et al. A Survey of Multicast Technologies, technical report, University Pierre et Marie (Paris 6). <http://www-rp.lip6.fr/>
- Wang B, Hou C-J. A survey on multicast routing and its QoS extension: problems, algorithms, and protocols. IEEE Network Magazine, 2000, 14(1)
- Comer D E. Internetworking with TCP/IP Volume 1: Principles, Protocols, and Architectures, fourth edition, prentice hall, 2001. 222~223
- Comer D E. Internetworking with TCP/IP Volume 1: Principles, protocols, and architectures, fourth edition, Prentice Hall, 2001. 233
- Waitzman D, Partridge C, Deering S. Distance Vector Multicast Protocol, RFC 1175, Nov. 1988
- Vainio A. IP Multicast Algorithms and Protocols, Helsinki University of Technology, Department of Computer Science and Engineering, 2001. <http://www.hut.fi/~avainio/etc/multicast.html>
- Moy J. Multicast Extension to OSPF. Internet draft, Network Working Group, Sep. 1992
- Estrin D, et al. Protocols Independent Multicast Version 2, Dense Mode Specification, May 1997, work in Progress; <draft-ietf-idmr-pim-dm-spec-05.txt>
- Ghosh D, et al. Quality-of-Service Routing in IP Networks. IEEE TRANSACTION ON MULTIMEDIA, 2001, 3(2)
- Derring S, et al. Protocol Independent Multicast Mode (PIM - SM): Motivation and Architecture, Internet draft, 1998
- Carlberg K, Crowcroft J. Building shared trees using a one-to-many joining mechanism. Computer Communication, Rev. Jan. 1997. 5~11
- Yang D-N, et al. MQ: An Integrated Mechanism for Multimedia Multicasting. IEEE TRANSACTIONS ON MULTIMEDIA, 2001, 3(1)
- Chen Shigang, Nahrstedt K, Shavitt Y. A QoS-Aware Multicast Routing Protocol. IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATION, 2000, 18(12): 2580~2592
- Faloutsos M, Banerjee A, Pankaj R. QoS-MIC: Quality of service sensitive multicast internet protocol. ACM SIGCOMM'98, Sept. 1998
- Cidon I, Rom R, Shavitt Y. Analysis of Multi-Path Routing. IEEE/ACM TRANSACTION ON NETWORKING, 2000, 6: 885~896
- Striegel A, Manimaran G. A Survey of QoS Multicasting Issues. IEEE Communications Magazine, June 2002. 82~87
- Microsoft: PIM-SM Multicast routing protocol, Windows 2000 Sever White paper, Microsoft Corporation, 1999
- Perlman R, et al. Simple Multicast: A Design for Simple, Low overhead Multicast. draft-perlman-simple-multicast-01.txt, 1998
- Zhang L, et al. RSVP: a new resource ReSerVation Protocol, IEEE Network, Sept. 1993
- Wroclawski J. RFC 2211, Specification of the Controlled-load Network Element Service, Sep. 1997
- Shenker S, Partridge C, Guerin R. RFC 2212, Specification of Guaranteed Quality of Service, Sep. 1997
- Blake S, Black D, Carlson M, Davies E. An Architecture for Differentiated Services. RFC2475, Dec. 1998
- Sheng X, Hock N C, Liren Z. Enabling Scalable Multicast Protocols Using Dynamic Overlay Tree Path. INTERNATIONAL JOURNAL OF COMMUNICATION SYSTEMS, 2001, 14: 361~375
- <http://www.opnet.com>
- Manimaran G, et al. A new Distributed Route selection Approach for channel Establishment in Real-Time Networks. IEEE/ACM TRANSACTIONS ON NETWORKING, 1999, 7(5): 698~709
- Guo L, Matta I. QDMR: An Efficient QoS Dependent Multicast Routing Algorithm. Unpublished paper, College of Computer Science, Northeastern University, Boston, 1999
- Apostolopoulos G, Guerin R, Kamat S. Implementation and Performance Measurement of QoS Routing Extension to OSPF. In: Proc. INFOCOM'99, mar. 1999
- Sivasubramanian S, Manimaran G. A QoS Multicast Protocol for Resource-Intensive Groups: [technical report]. Iowa State University, USA, 2001
- Li Z, Mohapatra P. QoS-Aware Multicasting in DiffServ Domains. IEEE Globecom'02 Global Internet, 2002
- John C, et al. Pricing Multicast Communication: A Cost-Based Approach. presented at the Internet Society INET 1998 Conf. Geneva, Switzerland, July, 1998
- Mieghem P V, et al. On The Efficiency of Multicast. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002, 9(6): 801~810
- Black P E. Algorithms and Theory of Computation Handbook, CRC Press LLC, 2000
- Kou L, Markowsky G, Berman L. A fast algorithm for Steiner trees. Acta Informatica, 1981, 15(2): 141~145
- Zhu Q, Barsa M, Garcia-Luna-Aceves J. A Source-Based Algorithm for Delay-Constrained Minimal-Cost Multicast. In: Proc. IEEE INFOCOM'95, 1995. 377~384
- Kumar S, et al. The MASC/GBMP Architecture for inter-domain Multicast Routing. in ACM SIGCOMM, April 1998. 93~104
- Biswas S, et al. A QoS-aware Routing Framework for PIM-SM Based IP-Multicast. Internet Draft, Nov. 1999