

基于博弈论的域间组播计费模型^{*}

赵金晶¹⁺, 朱培栋², 卢锡城²

¹(北京系统工程研究所, 北京 100101)

²(国防科学技术大学 计算机学院, 湖南 长沙 410073)

A Pricing Model of Inter-Domain Multicasting Based on Game Theory

ZHAO Jin-Jing¹⁺, ZHU Pei-Dong², LU Xi-Cheng²

¹(Beijing Institute of System Engineering, Beijing 100101, China)

²(School of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-66356529, E-mail: misszhaojinjing@hotmail.com, <http://www.nudt.edu.cn>

Zhao JJ, Zhu PD, Lu XC. A pricing model of inter-domain multicasting based on game theory. *Journal of Software*, 2008,19(1):144–155. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/144.htm>

Abstract: A practical pricing mechanism is the foundation for the deploying of IP multicast in the inter-domain Internet. The IP multicast service model and its pricing mechanism are discussed in this paper, by considering the motivations of different partners in the process. Three models are proposed for all applications in the real environments. They are ICP-USER model, ICP-ISP model and ICP-ISP-USER model. In every model, the applied scenarios, resolving method and the complexity of algorithm are described. Here, the Internet is considered as an ecosystem. So the work embodies the self-organization property of the Internet based on the game theory, and respects every role's right and benefit, which is good at the health and stable development of the Internet. So it has great practical feature.

Key words: pricing mechanism; IP multicast; game theory

摘要: 实用的组播计费机制是 IP 组播能够在域间得以广泛部署的前提条件。从不同参与者的角度讨论了 IP 组播的 3 种典型的服务模型及其相应的可实施的计费策略。这 3 种模型代表了域间组播的多种可能情况,它们是 ICP-USER 模型、ICP-ISP 模型以及 ICP-ISP-USER 模型。分析了每种模型所对应的应用场景、解决方案以及提出算法的复杂性等。整个 Internet 被看作是一个生态系统,该工作利用博弈论的思想,尊重各个参与者的目的和利益,使得 Internet 的自组织特性得以充分体现,有利于 Internet 中“生态链”的长期、稳定和健康发展,具有很好的实用性。

关键词: 计费机制; IP 组播; 博弈论

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

传统的 Internet 路由都采用单播形式,每一个从源发送的报文都被传送给唯一的一个接收者。虽然单播服务

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60673169 (国家自然科学基金); the National Basic Research Program of China under Grant No.2005CB321801 (国家重点基础研究发展计划(973)); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2006AA01Z213 (国家高技术研究发展计划(863))

Received 2006-09-12; Accepted 2006-12-19

具有很好的实用性及应用场景,但是它不能有效地将相同的内容传送给大量不同的接收者,如电影或音乐点播等。**Internet** 的组播模型能够很好地解决这个问题,它通过建立共享的分发生成树来连接所有的源和接收者,报文在通过这棵树传送的过程中,在每一个分枝点上被复制,然后发送到每一个链路上。在接收者很多的情况下,组播能够大量减少转发开销。

但是,自从组播机制被提出至今,虽然在 **Mbone** 的组播实验网上已经成功运行了几年的时间,但在 **Internet** 上还没有得到很好的商业部署。基于 **IP** 的网络提供了对数据报文单点到多点以及多点到单点的尽力传输服务,这意味着 **IP** 组播服务是能够在 **Internet** 上实施的。而现今,对 **IP** 组播的商业模型还没有一个明确而清晰的想法,**Internet** 上的各级运营商实施的 **IP** 组播框架过于复杂,不利于大规模和长期的运营,这也是 **IP** 组播部署缓慢的一个重要原因。

Internet 中存在多种类型的博弈,参与者往往只有很少的全局信息。他们不知道其他参与者的信息,也无法得知它们的行为。另外,因为他们不了解底层网络拓扑的全局信息和特性,所以也无法知道具体的付费函数。每个参与者唯一知道的只有自己的行为和最终的付费信息。所以,基于不完全信息的博弈是 **Internet** 的一个重要的设计原则。

在域间组播过程中有 3 类参与者:**ICP**(**Internet content provider**),**ISP**(**Internet service provider**)和用户。激励他们参与其中的主要动力就是获得自身利益的最大化。**ICP** 希望从用户那里得到更多的收益,并且给替他们转发数据的 **ISP** 尽可能少的费用。**ISP** 希望从 **ICP** 以及其他 **ISP** 那里得到比实际代价更多的报酬。**USER** 希望用最少的费用获得更多的服务。所以,在他们之间存在着典型的博弈过程。

本文构建了域间组播的 3 种实用计费模型。**ICP** 被假设为诚实的,因为它受到长期利益的驱动,只有保持良好的信誉才有可能长期盈利。但是,用户和 **ISP** 的生命期一般都是针对特定组的,所以他们可能会受到短期利益的驱动,通过欺骗的方式获取更高的利润。根据考虑角色的不同,我们可以将模型分为 4 种:1) 用户会撒谎,**ISP** 是诚实的;2) 用户是诚实的,**ISP** 会撒谎;3) 用户和 **ISP** 都会撒谎;4) 用户和 **ISP** 都是诚实的。第 4 种情况下的计费问题比较容易处理,所以在本文中不再进行讨论。对于前 3 种模型,本文研究了其适用的环境、对应的解决机制、采用算法的复杂性等问题,试图为全面解决域间组播在各种情况下的计费问题提出初步的尝试。为了具有更好的实用性,本文提出的 3 种机制都是建立在固定组播树的基础上的,即计费机制不要求组播树的构建和部署过程的变化。

本文第 1 节介绍相关的背景知识和研究现状。第 2~4 节分别对上述 3 种模型进行研究,讨论其适用的环境、对应的解决机制、采用算法的复杂性等问题。最后一节总结全文。

1 相关研究

1.1 网络博弈

将博弈论应用于解决网络研究领域中的问题具有很长的历史。从利用激励机制进行协议设计^[1]到分析现有资源分配的设计机制中用户自私性对结果的影响^[2],以及为了应付用户自私性而采用的基于机制的设计方法对网络设计进行的修改^[3-7]。其他在人工智能领域^[8,9]以及基于市场机制的计算领域^[10]中,博弈论也有重要的应用。

动机问题一直以来都是博弈论研究的核心问题。大量的文献研究了即使参与者是自私的,但为了达到全局期望利益的目的,在资源分配过程中的设计机制和实现方式问题^[11,12]。大量的实现方法运用 **Nash** 均衡(或其他考虑非合作的方法)理论(假设所有自私用户的行为将产生自私一致性均衡),所有的参与者都无法在偏离整体均衡值的时候取得最优解。**Nash** 问题一般采用基于均衡的资源预留方法^[13,14]来产生期望的结果。

与 **Nash** 均衡方法相对应的是 **Strategyproofness** 方法,它无论其他参与者的行为是撒谎的还是诚实的,是愚蠢的还是聪明的,都会保证任何参与者在自身诚实的情况下取得最优值。所以,**Strategyproofness** 方法比 **Nash** 方法更具有吸引力。文献[15]中认为,**Strategyproofness** 方法是唯一一种可应用于 **Internet** 的博弈方法,因为无法确认各个同时自私的参与者能否达到所谓的均衡状态。

我们对 3 种应用所提出的模型都是建立在 Strategyproofness 方法的基础上的,下面我们从算法的角度详细介绍 Strategyproofness 方法的一种主要实行机制——代价-分担机制。

1.2 代价-分担机制

先前对于组播计费问题的研究主要是基于组播代价均担的思想^[16],也就是基于代价-分担机制。

代价-分担机制通过函数 $x_i(u)$ 和 $\delta_i(u)$ 来定义.对给定的代价-分担机制,定义 $R(u)=\{i \in P \mid \delta_i(u)=1\}$, P 是所有用户的集合, $R(u)$ 是根据给出的利益值 u 所选择出的能够接受传输的用户集合.类似地, $W(u)=NW(R(u))$ 是根据 u 向量计算出的最终整体利益值.对于代价-分担机制,必须有对所有的 u, i 和 $v_i, w_i(u) \geq w_i(u|v_i)$, 即选择用户 i 一定会比选择其他用户获得的利润更高.除此之外,代价-分担模型还要满足以下 3 条基本规则:

- 非正迁移(no-positive transfers,简称 NPT): $x_i(u) \geq 0$.避免向入不敷出的用户传输数据,即只有给出恰当代价的用户才能得到服务.
- 随意加入(voluntary participation,简称 VP): $w_i(u) \geq 0$.用户可以自由选择不接受数据,也不需要付费.这样会使自身的利益值为 0,网络不能强迫用户使利益值小于 0.
- 消费者主权(customer sovereignty,简称 CS):对任意 u ,如果 v_i 值够大,则 $\delta_i(u|v_i)=1$.代价-分担机制不能随意地将任何用户排除在外,网络必须确保给出高竞价的用户能够得到服务.

此外,为了避免用户间的恶性竞争,保证整个网络的利益最大化,还需要以下两个额外的约束条件:

- 预算平衡(budget-balance): $\sum_{i \in P} x_i(u) = c(T(R(u)))$, $T(R(u))$ 是根据 u 确定的最终组播树.即从用户获得的收益正好可以支付传输所带来的代价.
- 有效性(eficiency):对所有的 $R \subseteq P$,有 $NW(R(u)) \geq NW(R)$.即最终的接收者集合能够使得网络的整体利益最大化. $NW(R)$ 称为一个有效集.

现在的 Strategyproofness 代价-分担机制中,还没有任何一种能够同时满足以上两个要求.从本质上分析,只有边际成本 MC(marginal cost)机制能够同时满足 NPT,VP 和有效性的要求.

设 $R \times(u)$ 为最大的有效集集合.当 $\delta_i(u)=1$ 时,有 $i \in R \times(u)$;当 $\delta_i(u)=0$ 时,有 $i \notin R \times(u)$.因此, $W(u)=NW(\times R(u))$.代价共享函数定义为

$$x_i = u_i \delta_i(u) - (W(u) - W(u|i0)) \quad (1)$$

MC 机制给用户 i 的利益为 $w_i = W(u) - W(u|i0)$,即用户 i 给整个网络利益带来边际性的贡献.然而,MC 机制不是预算平衡的,并且它的最终结果都是亏空的,即总体收益为负^[17].这种特性使得 MC 机制在很多使用环境中都不能被采用.

另外一种代价-分担机制称为值增长 SH(shapley value)机制,它遵循预算平衡规则.SH 机制定义为函数 $f: 2P \rightarrow R_{\geq 0}^P$,对所有的 $i, j \in P$,有 $\sum_i f_i(R) = c(T(R))$ 以及 $f_i(R+j) \leq f_i(R)$, f 可以以迭代的形式被定义:

$$f_i(R) = \sum_{\tilde{R} \subseteq R-i} \frac{|\tilde{R}|!(|R|-|\tilde{R}|-1)!}{|R|!} [c(T(R \cup i)) - c(T(\tilde{R}))] \quad (2)$$

函数表明,链路 l 的代价被所有需要它来获得流量的用户所分担.SH 代价分担的结果能够通过强算法得到,但在最坏情况下,它需要交换的消息数目达到 $O(n \times p)$,即在特定的链路上有 p 个报文, n 为用户总数.在我们考虑的所有现有的计算模型中,还没有任何一种代价-分担模型需要如此高的通信代价.所以,SH 机制不适用于大规模网络上的组播应用环境.

综上所述,我们认为域间组播计费模型是一种代价-分担机制,可以从博弈论的角度进行分析.然而,现有的成熟算法都不能很好地适用于 Internet 的现实环境,所以我们需要给出一种实用的解决方案.

1.3 组播网络模型

在域间组播过程中存在 3 类不同的参与者:ICP,ISP 和用户,所以,组播网络 G 可以看作由用户集合 P ,ISP 集合 N (包括 ICP)以及一系列连接节点的双向连接边 L 组成的无向图.为了分析过程的简化,每个 ISP 由一个节点来表示,即 ISP 内部结构被忽略.最终生成的组播树 T 是通过 $ISP \subseteq N$ 连接接收者集合 $R \subseteq P$ 并以 ICP θ_s 为根的一

棵树,且 $T(R) \subseteq L$. 组播树 $T(R)$ 的结构如图 1 所示.

```

Algorithm "Dew Bottom-Up Traversal"
At ISP  $i$  belonging to the multicast tree
Begin
  After receiving a message  $A_\beta$  from child  $\beta \in Ch(i)$ 
     $W_i = B_i + \sum_{\beta \in Ch(i)} A_\beta - C_{i \rightarrow Pa(i)}$ 
    if  $W_i \geq 0$  then
      {
         $\delta_i = 1$  for all the  $U_{sr}(i)$ 
        Send  $W_i$  to  $Pa(i)$ 
      }
    else
      {
         $\delta_i = 0$  for all the  $U_{sr}(i)$ 
        Send 0 to  $Pa(i)$ 
      }
  }
End
  
```

Fig.1 Algorithm Dew bottom-up traversal

图 1 Dew 算法的“从下到上”过程

域间组播树具有如下特点:

- 1) $T(R)$ 中的边符合 ISP 之间的商业关系;
- 2) 由于域内结构被忽略,所以单个 ISP 节点可能会有多条入边,但是可以通过将 ISP 分裂将其转变为树结构.
- 3) 每一个接收者 i 都有一条由组播路由结构决定的到 ICP 的固定道路 $T(i)$,所以对确定的接收者集合 R ,组播分发树就是由这些固定路径组成的集合: $T(R) = \bigcup_{i \in R} T(i)$.

在现实网络应用中存在着多种组播商业模型,但其大都可以归约为以下 4 种模型:

- (1) ICP-ISP-USER 模型:服务接收者向 ICP 付费,ICP 需要向替它为接收者转发数据的 ISP 支付报酬.计费过程可以抽象为两个步骤:接收者与 ICP 之间的付费关系以及 ICP 与 ISP 之间的付费关系.
- (2) ICP-ISP 模型:ICP 提供免费服务,即 ICP 可以通过广告费或者其他渠道来获利,但是接收者不需要向 ICP 缴费.这样,其中的计费过程就只有 ICP 向 ISP 支付数据转发费用.
- (3) ICP-USER 模型:网络中各个 ISP 之间通过包月或者固定带宽的方式来计费,所以,具体多少流量或者何种应用的流量是无关紧要的,只有 ICP 向接收者收取服务费.
- (4) 不存在计费过程.即 ICP 提供免费服务,各个 ISP 之间不按照具体流量计费.

在下面的 3 节中,我们将分析和解决前 3 种模型.第 2 节主要分析模型 3 中的应用场景,ISP 可以认为是诚实的,而接收者可能是不诚实的.第 3 节讨论的模型 2 中,接收者是诚实的,而各个 ISP 之间可能存在着欺骗以获取最大利益.第 4 节中研究的模型 1 的情况最为复杂,ISP 和接收者都可能会被彼此欺骗.在这几种情况下,我们的目标是提出具体的算法,在不影响组播树构建的前提下,得到一种合理、公平、各方都可接受的解决方案.

2 ICP-USER 模型

在 ICP-USER 模型中,ISP 被认为是诚实可信的,博弈过程存在于用户和 ICP 之间.ICP 的目标是追求利润的最大化,而用户希望能够得到最大的服务性价比.

ICP 向 Internet 上的所有节点提供视频或者音频等服务,有意向的用户会对接受服务所得到的价值进行评估,据此给出一个自己可以接受的上限值 B_i ,如果产生的代价大于 B_i ,用户就会放弃接受服务.组播数据在组播树的传输过程中需要向 ISP 支付费用,假设每一条链路的转发代价为 $C_{i \rightarrow j}$, $C_{i \rightarrow j}$ 的值被连接在链路两端的 ISP_i 和 ISP_j 所接受.由于 ISP 是诚实的,它会如实地通告出链路的真实费用.这样,ICP 可以根据转发代价和从用户处得到的费用计算出自己可以获得的利润.

ICP-USER 模型遵从 NPT,VP 和 CS 规则,所以它是一种典型的代价-分担模型.我们前面提到,代价-分担模

型有两种典型的机制——SH 和 MC 机制,但它们在现实应用中都有着无法克服的缺陷.SH 机制会给网络带来很大的处理开销,而 MC 机制不能使 ICP 的利益得到保证.所以,我们有必要提出一种新的改进方案来解决域间组播过程中 ICP 和用户之间的计费问题.

我们提出的 Dew 算法具有 MC 机制的低处理开销以及 SH 机制中保证网络正利润的特点.Dew 算法的处理过程类似于 MC 机制,但在每一个单步中都确保网络利润的正相性.算法产生的报文数为 $2 \times m$, m 为组播树中的链路总数.表 1 中列出的是 Dew 算法中定义的各个符号的具体意义.

Table 1 Symbol definition in ICP-USER model

表 1 ICP-USER 模型的符号定义

Symbol	Definition
B_i	The bid announced by user i
P_i	The actually payment of user i
δ_i	Whether user i can get the service, If $\delta_i = 1$, user i receives the transmission, and $\delta_i = 0$ otherwise
$C_{i \rightarrow j}$	The link cost between ISP i and j
W_i	The welfare of the tree rooted at ISP i
P_s	The profit got by the ICP
$U(T(i))$	The whole utility of the tree rooted at ISP i
$Ch(i)$	The set of children of ISP i
$Pa(i)$	The parent of ISP i
$U_{sr}(i)$	The set of users in $Ch(i)$
$T(i)$	The threshold of prize the ISP i can accept

Dew 算法分为两个步骤:第 1 步将那些价格上界未达到 ICP 所经过的链路代价总和要求的用户去除;第 2 步计算出所选用户的最终付费值以及 ICP 的最终利润.图 1 为算法的第 1 部分.整个过程与 MC 机制的“从下到上”过程类似.每一个链路代价被每一个它下面的用户所分担,如果他的所有用户的 B_i 值的总和无法负担整个子树的代价,那么这个子树将会被剪掉,所有的用户都无法得到服务.

在去除了这些低报价的用户集之后,第 2 步需要计算出最终用户可接受的价格,如图 2 所示.Dew 算法的原则之一就是必须要保护 ICP 的合理利益,并且鼓励用户给出较高的竞价,以使网络能够健康地、良性地发展下去.所以我们引入奖励机制,对那些给出高竞价的用户以优惠的价格,即 $P_i \leq B_i$,具体算法如图 2 所示.

```

Algorithm "Dew Up-Bottom Traversal"
At ISP  $i$  belonging to the multicast tree
Begin
  After receiving a message  $A_\beta$  from parent  $\beta \in Pa(i)$ 
  if  $\delta_i = 0$  or  $A_\beta \leq 0$  then
  {
     $P_i = 0$  and  $\delta_i = 0$  for all the  $U_{sr}(i)$ 
    Send -1 to all the  $Ch(i)$ 
  }
  else
  {
    For each  $c \in Ch(i)$ 
    {
       $A_c = A_\beta \times \left( \frac{B_c}{\sum_{j \in U_{sr}(i)} (B_j)} \right)$ 
      Send  $A_c$  to  $c$ 
      For each  $u \in User(i)$ 
       $P_u = B_u - A$ 
    }
  }
End
  
```

Fig.2 Algorithm Dew up-bottom traversal

图 2 Dew 算法的“从上往下”过程

Dew 算法产生的报文总数为 $2 \times n, n$ 为组播树中的总节点数,这不会给整个网络带来处理和传输上的负担.我们以图 3 中的组播树为例,最终组播树的总代价为 15,而用户的总付费为 17,所以,ICP 有 2 个单位的盈利.

Dew 算法具有以下优点:

- (1) 具有可接受的空间和时间复杂性以及良好的可扩展性;
- (2) 引入的奖励机制能够鼓励用户的参与以及高竞价,有利于组播应用的长远发展;
- (3) ICP 的利益得到保护.

我们提出的 Dew 算法也是典型的代价-分担模型的一种通用解决方案,它满足 NPT,VP 和 CS 规则,并且比 MC 和 SH 机制更加实用、有效.它的时间复杂性为 $O(n)$,是域间组播应用中 ICP-USER 之间的一种实用的计价机制.

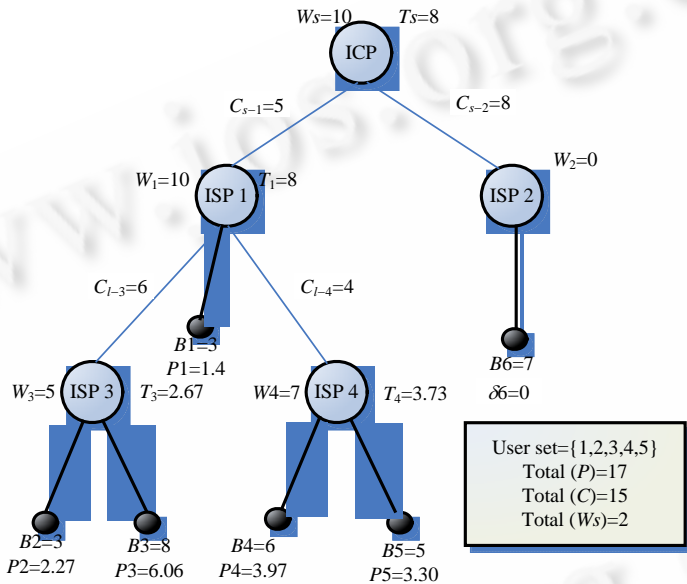


Fig.3 An example of Dew mechanism
图 3 一个 Dew 算法的实例

3 ICP-ISP 模型

根据第 1 节中提到的,ICP-ISP 模型适用于类似于 Internet 免费内容分发的组播应用环境.ICP 不需要从用户获得利润,它可以通过商业广告或者资助等方式来盈利,所以 ICP 和用户之间不存在利益上的矛盾.但是,ICP 需要向替它转发流量的 ISP 付费,所以,ICP-ISP 模型中的博弈存在于 ICP 和 ISP 之间.

在 Internet 骨干网上,现有的应用普遍的 ISP 之间的计费方式主要包括以下几种:

- (1) 固定速率的计费;
- (2) 基于流量的计费;
- (3) 时间相关计费;
- (4) 基于距离的计费.

对于 IP 组播,ISP 之间的计费问题是需要解决的重点.如果不能很好地

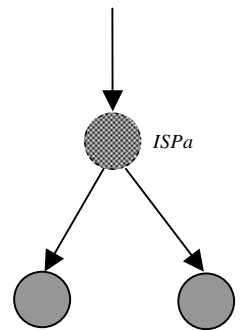


Fig.4 Data flow in multicast
图 4 组播数据流

解决这个问题,各个 ISP 运营商就不会积极地进行组播业务的部署和推进.如图 4 所示,有一个组播数据流进入 ISP_a ,但 ISP_a 需要转发到两个其他 ISP.如果采用传统的点到点的计费方式, ISP_a 将从它的上游得到转发一份数据的报酬,却要向它下游的两个 ISP 付出两份数据的报酬.在以利益驱动的 Internet 上,没有 ISP 会做这样的事情.所以,对于域间组播应用中 ISP 间的计费方式,我们必须提出一种确实有效的方案来保护 ISP 的合理盈利.所谓合理盈利是因为在 ICP-ISP 博弈中,ISP 期望能够在组播过程中获得更好的利润,为了达到这个目的,甚至会采用欺骗的方式,所以,这种欺骗行为必须得到制止和惩罚,才能使域间组播应用向着良性和健康的方向发展.

ICP-ISP 模型满足以下几条规则:

- 用户需要被满足(US):所以,愿意加入组播组的用户都应该得到组播服务;
- ISP 合理利益被保障(IS):ISP 如果没有撒谎,那么,它就应该得到所需要的利益;
- ICP 的无私性(SS):ICP 不以通过组播服务来盈利,所以它不需要撒谎.

根据模型的以上规则,我们提出 AV(alternately validation)机制,即迭代验证法.这是一种分布式算法,博弈中的 ISP 彼此验证它们之间的可信性.为了讨论方便,我们根据链路的利用来计费,即使用一条链路就需要支付一定的费用.

AV 机制中有 3 种类型的报文——验证报文(validation message)、通告报文(announcement message)和确认报文(confirmation message).

验证报文从 ISP 发送到它的祖父节点,格式如下:

Source ID	Destination ID	Children ID list	Children cost list	Parent ID
-----------	----------------	------------------	--------------------	-----------

在图 5 中,验证报文从 ISP_{32} 发送到祖父节点 ISP_{11} ,报文内容为

ISP_{32}	ISP_{11}	ISP_{41}	0	ISP_{22}
------------	------------	------------	---	------------

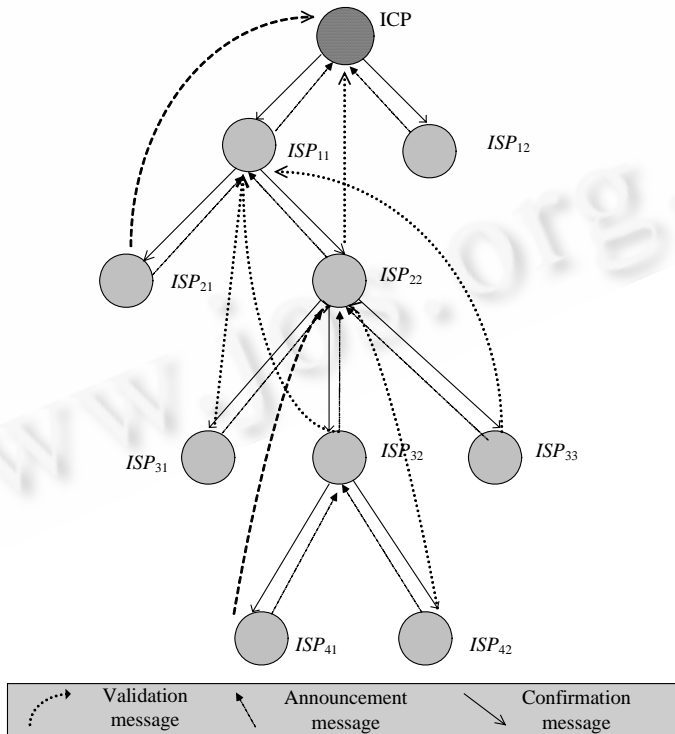


Fig.5 The message flow in AV mechanism

图 5 AV 机制中的信息流

通报报文从 ISP 发送到它的父节点,格式如下:

Source ID	Destination ID	Children ID list	Children cost list	Total cost
-----------	----------------	------------------	--------------------	------------

从 ISP_{32} 到 ISP_{22} 的通报报文为

ISP_{32}	ISP_{22}	$\{ISP_{41},ISP_{42}\}$	$\{0,0\}$	2
------------	------------	-------------------------	-----------	---

确认报文发送给子节点来确认它将会付给子节点的金额,格式如下:

Source ID	Destination ID	Total payment	Children payment list
-----------	----------------	---------------	-----------------------

从 ISP_{22} 发送到 ISP_{32} 的确认报文为

ISP_{22}	ISP_{32}	2	$\{(ISP_{41},1),(ISP_{42},1)\}$
------------	------------	---	---------------------------------

每一个 ISP 维护一个代价表来收集它从子节点和孙节点得到的信息,进而计算出最终的代价.代价表是一个 3 层嵌套结构,如图 6 所示.

$(Child\ 1,Cost)$	$(Grandchild\ 1, Cost)$	$(Great-grandchild\ 1,Cost)$
		$(Great-grandchild\ 2,Cost)$
		...
	$(Grandchild\ 2,Cost)...$	$(Great-grandchild\ t,Cost)$
		...
		$(Grandchild\ m,Cost)...$
$(Child\ 2,Cost)...$		
...		
$(Child\ n,Cost)...$		

Fig.6 The structure of the cost table

图 6 代价表的组织结构

AV 机制的处理过程也包括从下到上和从上到下两部分.在从下到上的过程中,验证消息和通告消息被发送到父节点和祖父节点,每个 ISP 计算出他和他的子孙节点真正需要的代价,算法如图 7 所示.在从上到下的过程中,父节点将会通告给他的子节点最终可以获得的利益,算法比较简单,这里不再赘述.

Algorithm "AV Mechanism Bottom-Up Traversal"

At ISP i belonging the multicast tree

Begin

If receiving a message A from a child then

{

Create an item with the $ChildID$ in cost table and fill its cost with the $TotalCost$ in A

Create a List with the $GrandchildID$ in it and fill its cost with the corresponding $ChildrenCost List$ in A

}

If receiving a message V from a grandchild then

{

Search the item that the $childID$ consists with the $ParentID$ in V and the $GrandchildID$ consists with the $SourceID$

Fill the List of $(Great-grandchildID,Cost)$ with the $ChildrenID List$ and $ChildrenCost List$ in V

}

After the cost table built

{

Check the $GrandchildCost$ with the sum of the corresponding $Great-grandchildCost$

Check $ChildCost$ with the sum of the $GrandchildCost$

Compute the sum of the $ChildCost$ as his own cost

}

Create the Announcement Message A and send to its Parent

Create the Validation Message V and send to its Grandparent

End

Fig.7 The algorithm of AV mechanism bottom-up traversal

图 7 AV 机制的从下向上过程

作为分布式算法,AV 机制的计算复杂性需要从多个方面进行衡量. Feigenbaum 等人^[18]提出一种通用的“网络复杂性”的概念,即从以下 4 个方面来考虑分布式算法给整个互连网络 T 的影响:

- N : 在 T 上传输的总的消息数目;
- N_i : 在 T 的单条链路上传播的最大消息数;
- S_m : 最大消息的字节数;
- C_a : 单个 Agent 上的最大处理开销.

如果分布式算法在以上任何一个指标上的性能不佳,它的“网络复杂性”都不可接受. 下面我们对 AV 机制的分布式算法性能进行分析.

定理 1. AV 算法产生的消息总数 N 为 $(3n-L-M-2)$, n 是组播树中 ISP 的总数,包括 ICP 所在的 ISP. L 和 M 分别代表根为 ICP 的叶结点和非叶结点数目.

证明:除了组播树中的叶结点 ISP 和 ICP 所在的 ISP 以及其子节点之外,每一个 ISP 需要分别发送一个验证报文、通告报文和确认报文. 叶结点 ISP 不需要发送确认报文,而 ICP 所在的 ISP 只需要发送确认报文,以 ICP 为根的 ISP 不需要向其祖父节点发送验证报文. 所以,AV 机制的总消息数为 $N=(3n-L-M-2)$. \square

定理 2. 通过任何一个链路上的最大消息数目为 $N_i=3$.

证明:包括一个验证报文、一个通告报文和一个确认报文. \square

定理 3. AV 机制产生的最大报文的字节数为 $S=\lceil [68+36 \times (n-1)]/8 \rceil$, 当 IP 地址为 32 位时.

证明:当所有的 ISP 都位于 ICP 所在的 ISP 的子节点的位置时,产生的通告报文具有最大的字节数:

Source ID	Destination ID	Children ID list	Children cost list	Total cost
32	32	$32 \times (n-1)$	$4 \times (n-1)$	4

即 $S=\lceil [68+36 \times (n-1)]/8 \rceil$. \square

定理 4. 当搜索算法的时间复杂性为 $O(n)$ 时,单个 Agent 的最大处理开销 C_a 为 $O(n^2)$.

证明:根据图 7 中算法的描述,当 ISP 收到通告消息 A 时,需要常数时间 C 在自己的代价表中建立两个相应的项.收到验证报文 V 时,就会在代价表里进行两层搜索,需要 $O(2n)$ 的时间.每个 ISP 最多收到 n 个验证报文, n 为所有的 ISP 数目,所以最多需要 $O(n^2)$ 的时间来处理验证报文.在代价表建立完毕后,有 3 个求和的过程,需要 $O(n)$ 时间来得到最终的子孙节点的代价.所以,Agent 上的整个处理开销为 $C_a=O(n^2)$. \square

4 ICP-ISP-USER 模型

在 ICP-ISP-USER 模型中,ISP 和用户都有可能为了取得更多的利益而进行欺骗,它们都是不可信任的.

模型可以如下描述:一棵建立好的组播树 $T(R)$, r 是提供服务的 ICP;它通过 ISP 的集合 $I=\{ISP_1, ISP_2, \dots, ISP_m\}$ 来向网络上的用户集 $U=\{USR_1, USR_2, \dots, USR_n\}$ 传输组播数据.每个用户 USR_i 会先对所得到服务的价值进行评估,得到评价价值 U_i ,据此给出一个可以支付给 ICP 的竞价值 B_i .那么,如果它能够得到服务,则获得的收益为 $WU_i=U_i-B_i$. ISP_j 在向用户传输组播数据的过程中,需要付出一定的代价 C_j ,它所期望从 ICP 获得的利益为 P_j ,那么他可以获得的收益为 $WI_j=P_j-C_j$.所以,ISP 和用户都希望能够获得最大的收益 WI_j 和 WU_i .它们可能会通过通告较高的 C_j 或者较低的 B_i 来达到目的.

在图 8 中,用户 USR_3 可以获得的收益为 $5-3=2$,用户 USR_4 的收益为 $4-2=2$. ISP_2 则期望在向 USR_3 和 USR_4 转发过程中得到的利益为 $6-3=3$.由于 ISP 和 USER 只追求自身利益的最大化,所以使得以 ISP_2 为根的子树的总收益为 -1 .为了惩罚它们这种过分的自私行为,它们将不能够获得组播服务和期望的利益.所以,为了实现 Internet 的健康可持续发展和良好的经济环境,我们必须采取措施来约束这种过分的欺骗行为.

在整个博弈过程中存在着两类参与者——ISP 和用户,它们无法得到彼此的真实信息,所以,ICP-ISP-USER 模型是一个多人不完全静态博弈.博弈 G 可以形式化地描述为

$$G=(N,(\Theta_i),(A_i),(W_i)),$$

其中,

$$N = \{I, U\} = \{ISP_1, \dots, ISP_m, USR_1, \dots, USR_n\}, |N| = n + m.$$

$$\Theta_i = \begin{cases} 0, & \text{if } i \text{ is a ISP} \\ 1, & \text{if } i \text{ is a User} \end{cases}$$

$A_i \triangleq \{a_1, a_2, \dots, a_t\}$ 是参与者 i 可能采取的策略集. 在这里, 如果 i 为 ISP, 则 A_i 为 P_i ; 而若 i 为用户, 则 A_i 为 B_i . $W_i \triangleq \{w_1, w_2, \dots, w_t\}$ 为参与者 i 采取相应的策略或可能得到的利益集合.

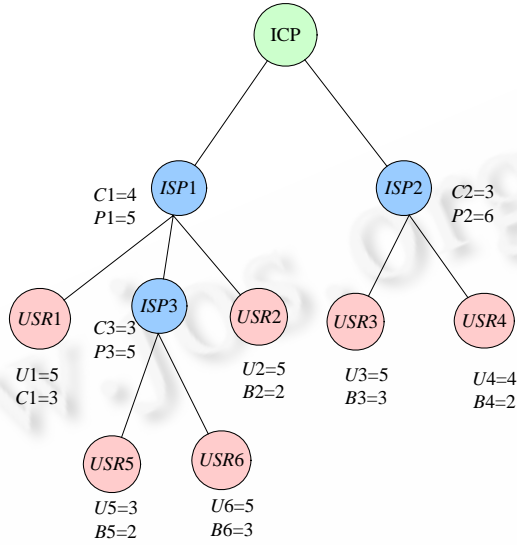


Fig.8 An instance of ICP-ISP-USER model
图 8 ICP-ISP-USER 模型实例

在 ICP-USER 模型中提到的对撒谎者的惩罚机制同样适用于 ICP-ISP-USER 模型. 用户给出的竞标价 B_i 越低, 越不可能获得组播服务, ISP 要求支付的价格越高, 也越不可能得到支付. 这样的惩罚机制能够使参与者在欺骗之前对成功的概率进行估计, 判断欺骗是否真的能够得到更好的利益值. 这样, 可以利用本身的利益机制来抑制欺骗行为的发生.

在我们的惩罚机制中, 可以将参与者的利益函数 W_i 定义为

(1) 当 $i \in N$, 如果 $\Theta_i = 0$, A_i 定义为 $\{C_i, C_i+1, \dots, C_i+x\}$, 那么, 对应的利益函数 W_i 定义为

$$\forall w_i \in W_i, w_i = a_t \times \prod_{\beta \in An(i)} p_{i\beta} = (C_i + t) \times \prod_{\beta \in An(i)} \frac{\xi_0}{\sum_{j \in ch(\beta)} U_j - C_\beta} \quad (3)$$

其中, ξ_0 是 ISP 的收益参数, 是一个定值. $An(i)$ 是从 i 到 r 的路径上所有经过的 ISP 的集合, 即 $An(i)$ 中的元素为 ISP_i 的祖先, 则 ISP_i 采取策略 $a_t \in A_i$ 产生的利益为其通告的价格 (C_i+t) 与可能获得该值的概率之积. 如果它的祖先也撒谎, 那么这个概率值也会降低.

(2) 当 $i \in N$, 如果 $\Theta_i = 1$, A_i 定义为 $\{U_i, U_i+1, \dots, U_i+y\}$, 那么, 对应的利益函数 W_i 定义为

$$\forall w_i \in W_i, w_i = a_t \times p_{ur} = (U_i+t) \times \xi_1 \times t \quad (4)$$

其中, ξ_1 是用户的收益参数, $(\xi_1 \times t) \in [0, 1]$. 用户给出的 U_i 值越高, 它可能获得服务的概率越大.

在非合作博弈中, 参与者都会认为其他参与者是不友好的, 即其他参与者选择的策略会对自己不利, 那么, 在它选择策略的时候也会假设其他人会撒谎, 这样, 它选择撒谎的概率也会大为降低.

在 ICP-ISP-USER 模型中, 我们提出了一种与 Dew 算法相类似的 Punish 算法. 它们的不同之处在于, 在 Punish 算法从上到下的过程中, 筛选出的用户需要支付的和 ISP 能够得到的就是它们自己的通告值 B_i 和 P_i . Punish 算法的时间复杂性也为 $O(n)$.

5 总 结

本文基于网络博弈的思想讨论了域间组播的3种价格模型——ICP-USER模型、ICP-ISP模型和ICP-ISP-USER模型,几乎涵盖了域间组播的各种应用场景。

在ICP-USER模型中,ISP被认为是诚实、可信的,博弈过程存在于用户和ICP之间.这种模型可以适用于Internet上各ISP之间包月或者包年等按时间的计费模式,所以ISP之间不需要关心流量的类型和大小.对于ICP-USER模型,我们基于代价-分担模型提出了一种对撒谎行为的惩罚算法,称为Dew算法.它鼓励用户的诚实行为,并保障了ICP的正利润,有助于组播应用的长期健康发展.Dew算法的时间和空间复杂性都适用于较大的网络规模,具有很好的扩展性.

在ICP-ISP模型中,用户是可信的,而ISP为了获得更好的利益可能会彼此欺骗.这种模型适用于ICP发布免费组播服务的应用,例如Internet广播等.利益关系存在于各个ISP之间,它们从ICP向各个用户转发组播数据,并以此盈利.我们提出的AV机制采取迭代验证的方法来避免ISP之间的欺骗行为.AV机制分布式算法的时间复杂性为 $O(n^2)$,单个节点的处理开销很小.

ICP-ISP-USER模型比较复杂,适用于大部分的域间组播应用.这里,ICP,ISP以及用户之间都存在着利益冲突,所以是一个复杂博弈.我们基于博弈论对其进行建模,为了对欺骗行为进行惩罚,定义了各个参与者的利益函数在欺骗的情况下取最小值.提出的Punish算法与ICP-USER模型中的Dew算法思想类似,时间复杂性也是 $O(n)$.

本文系统地分析了面向不同域间组播应用的计费模型,并给出了相应的解决方案.域间组播计费是IP组播能够大规模部署的先决条件.一个实用的计费方案需要考虑到所有参与者的利益和行为,并且根据它们的自组织特性,利用经济规律和自身特点对市场进行调解,鼓励良性的竞争和行为,对破坏网络健康的行为进行惩罚.

References:

- [1] Kurose JF, Simha R. A microeconomic approach to optimal resource allocation in distributed computer systems. *IEEE Trans. on Computers*, 1989,38(5):705-717.
- [2] Hsiao MT, Lazar A. A game theoretic approach to decentralized flow control of markovian queueing networks. In: *Proc. of the Performance'87*. Amsterdam, 1988. 55-74. <http://citeseer.ist.psu.edu/altman94markov.html>
- [3] Ferguson D, Nikolaou C, Yemini Y. An economy for flow control in computer networks. In: *Proc. of the 8th Infocom*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1989. 100-118. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=101443
- [4] Korilis Y, Lazar A, Orda A. Architecting noncooperative networks. *Journal on Selected Areas in Communications*, 1995,13(7): 1241-1251.
- [5] Sanders B. An incentive compatible on control algorithm for rate allocation in computer networks. *IEEE Trans. on Computers*, 1988,37(9):1067-1072.
- [6] Shenker S. Efficient network allocations with selfish users. In: *Proc. of the Performance'90*. Amsterdam, 1990. 279-285. <http://portal.acm.org/citation.cfm?coll=GUIDE&dl=GUIDE&id=725040>
- [7] Shenker S. Making greed work in networks. *ACM/IEEE Trans. on Networking*, 1995,3:819-831.
- [8] Rosenschein J, Zlotkin G. *Rules of Encounter: Designing Conventions for Automated Negotiation among Computers*. Cambridge: MIT Press, 1994.
- [9] Shoham Y, Wellman M. Economic principles of multiagent systems. *Artificial Intelligence*, 1997,94(1-2):1-6.
- [10] Walsh W, Wellman M. A market protocol for decentralized task allocation. In: *Proc. of the 3rd Int'l Conf. on Multi-Agent Systems*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1998. 325-332. <http://citeseer.ist.psu.edu/14687.html>
- [11] Groves T, Ledyard J. Incentive compatibility since 1972. In: *Proc. of the Information, Incentives, and Economics Mechanisms*. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1987. 48-111. <http://citeseer.ist.psu.edu/context/2425664/0>
- [12] Osborne MJ, Rubinstein A. *A Course in Game Theory*. Cambridge: MIT Press, 1994.
- [13] Dasgupta P, Hammond P, Maskin E. The implementation of social choice rules. *Review of Economic Studies*, 1979,46:185-216.

[14] Maskin E. The theory of implementation in Nash equilibrium. In: Proc. of the Social Goals and Organization: Essays in Memory of Elisha Pazner. Cambridge: Cambridge University Press, 1985. 173-204. <http://ideas.repec.org/p/mit/worpaper/333.html>

[15] Friedman E, Shenker S. Learning and implementation in the Internet. <http://www.aciri.org/shenker/decent.ps>

[16] Moulin H, Shenker S. Strategyproof sharing of submodular costs: Budget balance versus efficiency. *Economic Theory*, 2001,18: 511-533.

[17] Johnson DS, Minkoff M, Phillips S. The prize collecting steiner tree problem: Theory and practice. In: Proc. of the 11th Annual ACM-SIAM Symp. on Discrete Algorithms. New York: ACM Press, 2000. 760-769. <http://citeseer.ist.psu.edu/354710.html>

[18] Feigenbaum J, Papadimitriou C, Shenker S. Sharing the cost of multicast transmissions. *Journal of Computer and System Sciences*, 2000,63:21-41.



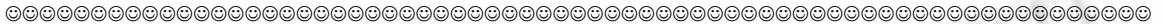
赵金晶(1981-),女,山东潍坊人,博士生,主要研究领域为域间路由技术,复杂巨系统理论.



卢锡城(1946-),男,教授,博士生导师,中国工程院院士,CCF高级会员,主要研究领域为高性能计算,并行与分布处理,先进网络技术.



朱培栋(1971-),男,博士,副教授,主要研究领域为路由技术,移动网络,网络安全.



中国科学院软件研究所筹建国内首家软件博物馆

近日,中国科学院软件研究所发起建设我国首家以计算机软件为主题的软件博物馆。

软件博物馆旨在记录软件发展历程,展示软件发展成就,传播软件科技知识,宣传软件科学文化。软件博物馆将以丰富而翔实的史料及珍贵的实物,将计算机软件从起步到现在的发展状况以及未来发展趋势生动、直观地展示给大众。通过各种展示手段,追溯软件的发展历程,发掘软件文化内涵,弘扬科学精神,普及科技知识。

软件博物馆计划于2008年中期向公众开放。目前,正面向社会各界广泛征集能够反映国内、外软件发展历程和软件发展成就的实物、照片、回忆文章、模型、成果展示材料等。有捐赠意向的单位及个人请与软件博物馆建设办公室联系。

地址:北京市中关村南四街4号中科院软件园区5号楼202室 邮编:100080

电话:86-10-62661035 传真:86-10-62661035

联系人:李洁 E-mail: rjbgw@iscas.ac.cn