

## 基于用户体验评价模型的最优路由选择算法

张大陆<sup>1\*</sup>, 曹孝晶<sup>1</sup>, 胡治国<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 计算机科学与技术系, 上海 201804; 2. 65583 部队, 辽宁 辽阳 111000)

(\* 通信作者电子邮箱 daluz@acm.org)

**摘要:**网络视音频业务的兴起使网络运营商和服务提供商更加关注视音频的用户体验(QoE),而传统的路由算法只能保证所选路径的服务质量(QoS)参数,如延迟、抖动等满足QoS约束的需求,并不能直接反映QoE的信息,从而不能保证所选路径满足QoE需求。基于QoE评价模型,给出以QoE为目标的最优路由选择算法。通过分析QoE表征参数与传统QoS参数的关系,利用QoE表征参数可分解性和QoE表征值非递减性两个性质,给出多项式时间复杂度为 $O(V \log V + E)$ 的QoE\_DSP算法。实验和分析表明,该算法能保证所得路径满足QoE需求,同时具有良好的计算扩展性。

**关键词:**用户体验路由算法;最优路由;参数分解;用户体验模型

**中图分类号:** TP393.06 **文献标志码:** A

### Optimal routing algorithm based on user experience estimation model

ZHANG Da-lu<sup>1\*</sup>, CAO Xiao-jing<sup>1</sup>, HU Zhi-guo<sup>1,2</sup>

(1. Department of Computer Science and Technology, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. The No. 65583 Army, Liaoyang Liaoning 111000, China)

**Abstract:** As a fast-growing contributor to Internet service, online videos make ISPs and video providers pay more attention to the Quality of user Experience (QoE). The existing routing algorithms could only guarantee that parameters of path such as delay and jitter, in accordance with the demands of Quality of Service (QoS) restriction. However, they are not able to reflect the QoE-related information directly. As a result, these kinds of algorithms cannot meet the demand of showing QoE. This paper proposed a QoE-optimal routing algorithm called QoE\_DSP, based on QoE estimation model. By taking advantage of two properties of QoE parameter, decomposability and nondecreasing characteristics from the analysis on relationship between QoE and QoS, the authors designed QoE\_DSP, which owned a polynomial time complexity of  $(V \log V + E)$ . According to the experiments and results analysis, this algorithm can guarantee the selected path meets the demand of QoE, while it also has a strong computational scalability.

**Key words:** Quality of user Experience (QoE) routing algorithm; optimal routing; parameter decomposition; Quality of user Experience (QoE) model

## 0 引言

目前IP协议在路由选择时只依据单个网络参数,如最短时延或最少跳数确定转发路径,忽略了网络资源、路径费用、用户主观感受等其他参数。而服务质量(Quality of Service, QoS)多约束路由选择算法,根据QoS各参数的重要程度给出QoS约束条件,然后路由选择满足约束条件的路径,从而改善了路由选择单一性的问题。然而以QoS为目标的路由只能保证所选路径的QoS参数,如延迟、抖动等满足QoS约束的需求,并不能直接反映用户体验(Quality of user Experience, QoE)的信息,从而不能保证所选路径满足QoE的需求。通常,用户并不关心网络提供的服务是如何构成和如何实现的,也就是说对用户而言关注各种QoS参数也没有多大实际意义,他们只关心服务的QoE。

本文基于QoE评价模型<sup>[1]</sup>,提出一种以QoE为目标的最优路由选择算法,其不仅关注QoS各参数的重要程度,更关注QoS参数所反映的QoE是否满足用户需求,即QoE最优路由选择能保证所得路径满足QoE的需求,从而为用户提供准确的服务质量。

## 1 相关工作

现有路由算法主要是针对QoS参数的多约束路由算法,大致分为:1)多项式非启发式算法。在文献[2]中,使用Dijkstra最短路径树算法实现了带宽延迟受限的源路由求解。首先在网络拓扑图中将带宽不足要求的链路剪除掉,然后再以延迟为关键字使用最短路径树算法计算,这样求得的路径满足带宽约束并具有最短延迟。赵海雁等<sup>[3]</sup>使用Dijkstra最短路径树算法实现了时延、成本受限的求解。主要通过将原问题转化为该问题的一个子问题来进行研究求解,而非真正解决QoS多约束路由问题。2)各类启发式算法。文献[4]提出一种随机启发式算法,该算法在广度优先搜索(Breadth-First Search, BFS)算法基础上进行了改进,不是系统地选择一个节点进行搜索,而是随机地选取,这样可以更好地保证搜索方向不断向目标节点过渡。文献[5]针对两个约束条件的QoS路由问题,提出了一种启发式算法,该算法通过将其中一个约束参数整数化的方式将问题转化为一个新问题,并证明新问题得到的解是原多约束路径(Multi-Constraint Path, MCP)问题的解的子集,从而能保证利用该算法得到解,则该解就是

满足原问题的解。3) 单混合参数算法。以上算法只是简单地分开考虑 QoS 参数是否满足给定约束条件,并寻找满足要求的路径,其算法效率都受到一定的影响,于是文献[6]提出了各种单混合参数的思想,并出现了文献[7-14]的算法,其中文献[15]中的 SAMCRA 算法较好地解决了混合参数为标准的路由选择问题。

上述算法的研究都是围绕客观 QoS 参数,通过各种技巧提高算法性能,从而达到提升网络性能和资源利用率的目的,然而这些研究都忽略了用户这一最重要的评价因素,导致这些算法在路由选择时没有考虑所选路径是否满足用户真正关注的 QoE 需求,从而不能保证所选路径满足 QoE 的需求。相比较而言,以用户体验值 QoE 为目标的路由选择算法,其在路由选择时则始终关注 QoE 的需求,从而保证所得路径满足 QoE 的需求。然而关于 QoE 路由算法的研究目前几乎没有,所以对以 QoE 体验值为目标的路由选择问题研究是必要的和紧迫的。本文将根据文献[1]提出的 QoE 评价模型对 QoE 路由算法进行研究。

## 2 最优路由选择问题的定义

### 2.1 QoE 评价模型

在文献[1]中,对 QoE 的评价方法进行了较详细的讨论,并通过回归分析建立 QoS 与 H.264, MPEG4 视频 QoE 之间的映射模型,并确定相应的模型系数,在不失一般性的前提下,给出如下扩展形式:

$$QoE(p) = Max - k_1 * jitter(p) + k_2 * delay(p) + k_3 * packet\_loss\_rate(p) * 100 \quad (1)$$

其中:  $Max$  为相应模型的最大值;  $k_1, k_2, k_3$  为模型系数;  $p$  为给定路径;  $jitter$  为抖动,  $delay$  为时延, 单位都为 ms;  $packet\_loss\_rate$  为丢包率, 为范围 0 ~ 1 的小数。

根据文献[1,16]对 QoE 等级的说明,给出如表 1 所示的  $QoE(p)$  与 QoE 等级的关系。

表 1 QoE 值与 QoE 等级  $C$  关系

$QoE(p)$	QoE 等级 $C$	含义
[0,1)	1	非常差
[1,2)	2	差
[2,3)	3	一般
[3,4)	4	好
[4,5]	5	非常好

该 QoE 评价模型的特点是,通过系数  $k_1, k_2, k_3$  反映 QoS 参数的重要程度,即区分对待网络各参数,同时通过简单的线性模型形式反映出用户关注的 QoE。

### 2.2 QoE 最优路由选择问题数学模型

一个通过有向图表示的网络  $G = (V, E)$ ,  $V$  代表节点集合,  $E$  代表链路集合。每条链路  $(i, j) \in E$  与  $jitter, delay$  以及  $packet\_loss\_rate$  相关联,所有的参数都已知且非负。给定用户需要的 QoE 等级需求为  $C$ , 其中  $C \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ , QoE 路由问题就是去寻找一条从一个给定节点  $s$  到一个给定节点  $t$  的路径  $p$ , 同时满足:

$$1) QoE(p) = Max - k_1 * jitter(p) + k_2 * delay(p) + k_3 * packet\_loss\_rate(p) * 100 \geq C - 1 \quad (2)$$

2) 在满足 1) 的可行路径上,使  $QoE(p)$  最大。

利用文献[1]中 QoE 评价模型的特点,从而保证以 QoE

为目标的最优路由选择具有如下特点:1) 考虑各 QoS 参数的重要程度;2) 在路由选择过程中始终考虑搜索路径是否满足 QoE 需求;3) 所选路径在满足用户体验的基础上,提供最优的 QoE 的路径。所以 QoE 最优路由选择算法能直接保证所得路径满足 QoE 用户等级需求,而传统的路由选择算法最多只能在获得路径之后验证其是否满足 QoE 用户等级需求。

## 3 QoE 最优路由选择问题研究

### 3.1 时间复杂度研究

对式(2)进行整理,得到如下表达式:

$$M = k_1 * jitter(p) + k_2 * delay(p) + k_3 * packet\_loss\_rate(p) * 100 \leq Max + 1 - C \quad (3)$$

于是使  $QoE(p)$  最大,等价于使

$$M = k_1 * jitter(p) + k_2 * delay(p) + k_3 * packet\_loss\_rate(p) * 100 \quad (4)$$

最小。这里定义  $M$  为 QoE 表征参数。

于是原问题就转化为使一个由抖动、延迟以及丢包率构成的线性函数值  $M$  在满足约束条件  $Max + 1 - C$  下寻找最小值的问题。转化后的 QoE 最优路由问题,其在形式上类似最短约束路径 (Restricted Shortest Path, RSP) 问题,而著名的 RSP 问题是一个 NP 完全 (NP-Complete, NPC) 问题<sup>[17]</sup>,但其前提是约束条件的参数和目标参数之间是相互独立的,而转化后的 QoE 最优路由问题中涉及到的参数却是同一个参数,所以其可能就不再是 NPC 完全问题。

接下来基于广度优先搜索的思想,并利用基于 QoE 评价模型的最优路由选择问题的性质进行算法设计,提出一种能保证所选路径满足 QoE 需求的最优路由选择算法 QoE\_DSP,其可以在多项式时间内给出算法的最优解。

### 3.2 性质特点分析

在网络中,设每条边对应的权值参数为  $w$ , 则对 QoS 参数可以进行如下分类<sup>[18]</sup>:

**定义 1** 可加性度量。若  $w_p = \sum_{i=1}^{s-1} w_{i,i+1}$ , 则称路径  $P$  的  $w$  权值参数为可加性度量。

可加性度量包括延迟、抖动、花费、转发跳数等。例如,一条路径  $P$  的延迟为从源到目的地的所有链路延迟的总和。

**定义 2** 可乘性度量。若  $w_p = \prod_{i=1}^{s-1} w_{i,i+1}$ , 则称路径  $P$  的  $w$  权值参数为可乘性度量。

例如,分组丢失率为可加乘度量,其中链路丢失率  $0 \leq w_{i,i+1} \leq 1$ 。在求解有关可乘性度量的过程中,可以类比参照可加性度量的有关求解方法<sup>[19]</sup>。

**定义 3** 最小性度量。若  $w_p = \min_{i=1,2,\dots,s-1} \{w_{i,i+1}\}$ , 则称路径  $P$  的  $w$  权值参数为最小性度量。

例如,带宽为最小性度量,即路径带宽为路径上瓶颈链路的带宽。对于求解  $w_p = \max_{i=1,2,\dots,s-1} \{w_{i,i+1}\}$  的问题可转化为问题  $-w_p = \min_{i=1,2,\dots,s-1} \{-W_{i,i+1}\}$ 。

#### 3.2.1 QoE 表征参数的可分解性

QoE 表征参数  $M$  是一个包含可加性度量参数和可乘性度量参数的混合度量参数,其反映的是 QoS 参数经过 QoE 评价模型映射得到的 QoE 情况,从而以其为目标的路由选择将

能保证所得路径满足 QoE。然而 QoE 表征参数  $M$  的混合特点导致路由选择时 QoE 表征值  $M$  的前向信息不能像可加性或可乘性度量进行累积,也不能像最小性度量那样进行预处理裁剪,于是每次计算到达新节点的 QoE 表征值时,就必须获取到达该节点的全部前向信息,利用 QoE 评价模型重新进行计算,从而得到新节点的 QoE 表征值。如:已知路径  $a \rightarrow b \rightarrow c$  的 QoE 表征值后,要获取路径  $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$  到的 QoE 表征值时,不能利用类似可加性度量  $QoE(a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d) = QoE(a \rightarrow b \rightarrow c) + QoE(c \rightarrow d)$  的方法获取,而是需要重新获取路径  $a \rightarrow b \rightarrow c$  的全部前向信息,结合链路  $c \rightarrow d$ ,利用 QoE 评价模型计算出路径  $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$  的 QoE 表征值,这样算法的复杂度将会随着节点数量的增加而呈现指数增加。

通过观察,基于该 QoE 评价模型的 QoE 表征参数  $M$  是抖动  $jitter$ 、时延  $delay$ 、丢包率  $packet\_loss\_rate$  的线性组合参数,并具有如下特点:

$$jitter(p) = \sum_{l \in p} jitter(l) \quad (5)$$

$$delay(p) = \sum_{l \in p} delay(l) \quad (6)$$

$$1 - packet\_loss\_rate(p) = \prod_{l \in p} (1 - packet\_loss\_rate(l)) \quad (7)$$

其中:  $p$  是路径,  $l$  是路径中的链路。

QoE 表征参数  $M$  中,  $jitter$ 、 $delay$  具有可加性特点,  $1 - packet\_loss\_rate$  具有可乘性特点。在计算 QoE 表征值  $M$  这样的混合参数时,将其分解为多个可加性或可乘性度量,在路由选择时每个节点分别保留分解得到的可加性度量  $jitter$ 、 $delay$  和可乘性度量  $1 - packet\_loss\_rate$  从始节点到达该节点的累积值,然后利用可加性或可乘性度量的可累积性进行新节点路径的 QoE 表征值  $M$  计算,从而避免获取全部前向信息计算新节点 QoE 表征值的开销,降低了算法的复杂度。

### 3.2.2 QoE 表征参数的非递减性

通过观察,抖动、时延以及丢包的路径函数  $p$  都是以链路  $l$  为参数的非递减函数,即:

$$jitter(p_1) = jitter(l_1 + l_2) \geq jitter(p_2) = jitter(l_2) \quad (8)$$

$$delay(p_1) = delay(l_1 + l_2) \geq delay(p_2) = delay(l_2) \quad (9)$$

$$packet\_loss\_rate(p_1) = packet\_loss\_rate(l_1 + l_2) \geq packet\_loss\_rate(p_2) = packet\_loss\_rate(l_1) \quad (10)$$

其中:  $p_1$ 、 $p_2$  是路径,  $l_1$ 、 $l_2$  是链路。于是它们的线性组合函数,即 QoE 表征参数  $M$  的路径函数也是链路  $l$  为参数的非递减函数。

利用 QoE 表征参数的非递减性,在路由选择算法搜索过程中,发现当前从始节点  $s$  到达节点  $a$  路径的 QoE 表征值  $M$  已经不能满足 QoE 等级的需求时,则不必对节点  $a$  的邻接节点进行搜索,因为经过节点  $a$  到达邻接节点所对应路径的 QoE 表征值一定大于当前节点  $a$  的 QoE 表征值路径,即不符合 QoE 等级需求。避免路由选择中对不必要的路径的搜索从一定程度上也提高了 QoE 最优路由算法的效率。

## 4 QoE 最优路由选择算法

首先假设在以节点  $s$  进行路由选择时,该节点已知网络拓扑全局信息以及所使用的 QoE 评价模型等相关信息。  $G$  对象表示网络拓扑信息,其中包含存放节点和链路信息的  $Node$ 、 $Link$  对象,在  $Node$  对象中包含从始节点到当前节点路

径的  $jitter$ 、 $delay$  和  $packet\_loss\_rate$  累积信息,该路径的 QoE 表征值  $M$  和存放前向节点信息的  $reverseNode$  等,这些信息在路由选择时计算确定;在  $Link$  对象包含链路的  $jitter$ 、 $delay$ 、 $packet\_loss\_rate$  信息,这些信息在路由选择前已确定;  $Model$  对象表示模型信息;  $C$  表示 QoE 需求等级信息。接下来给出 QoE 最优路由选择算法的伪代码,它能在多项式时间内解决 QoE 最优路由选择问题,具体如下:

```
Initialize(  $G, s, C, Max$  )
Begin
  1) For each vertex  $v \in G.Node$  do
  2)    $Node[v].M = Node[v].jitter = Node[v].delay =$ 
       $Node[v].packet\_loss\_rate = +\infty$ ;
  3)    $Node[v].flag = white$ ;
  4)    $Node[v].reverseNode = NIL$ ;
  5)  $Node[s].M = Node[s].jitter = Node[s].delay =$ 
       $Node[s].packet\_loss\_rate = 0$ ;
  6)  $C' = Max + 1 - C$ ;
End
Relax(  $Q, u, v, k_1, k_2, k_3$  )
Begin
  7)  $tmp.jitter = Node[u].jitter + Link[u,v].jitter$ ;
  8)  $tmp.delay = Node[u].delay + Link[u,v].delay$ ;
  9)  $tmp.packet\_loss\_rate = 1 - (1 - Node[u].$ 
       $packet\_loss\_rate) * (1 - Link[u,v].packet\_loss\_rate)$ ;
  10)  $tmp.M = k_1 * tmp.jitter + k_2 * tmp.delay + k_3 *$ 
       $tmp.packet\_loss\_rate * 100$ ;
  11) If (  $tmp.M \leq C'$  ) then
  12)   If (  $Node[v].M > tmp.M$  ) then
  13)      $Node[v] = tmp$ ;
  14)      $Node[v].reverseNode = u$ ;
  15)     if  $v \notin Q$  then  $Q = Q + \{v\}$ ;
End
QoE_DSP(  $G, s, t, C, Model$  )
Begin
  16) Initialize(  $G, s, C, Model, Max$  );
  17)  $Q = \{s\}$ ;
  18) While  $Q \neq \emptyset$  do
  19)   Find  $u \in Q$  such that  $Node[u].M = \min_{u' \in Q} Node[u'].M$ 
  20)   If  $u \neq t$  then
  21)      $Node[u].flag = black$ ;
  22)     For each adjacent edge of  $u$  ( $u, v \in G.Link$  and
       $Node[v].flag == white$  do
  23)       Relax(  $Q, u, v, Model.k_1, Model.k_2, Model.k_3$  );
  24)     Else
  25)       Break;
  26) If  $Node[t].reverseNode == NIL$  then
  27)   Print "can't find satisfied path"
  28) Else
  29)   Print the feasible path
End
```

### 4.1 算法分析说明

节点  $v$  对应对象  $Node[v]$ , 其中  $Node[v].jitter$ 、 $Node[v].delay$ 、 $Node[v].packet\_loss\_rate$  表示以 QoE 表征值  $M$  为目标, 当前从  $s$  到  $v$  所得最优路径对应的累积信息,  $Node[v].M$  表示该路径的 QoE 表征值,  $Node[v].flag$  表示该节点是否进行过释放操作。

Initialize 函数对网络拓扑的所有节点进行初始化:

1) 将所有节点  $v$  对应的  $Node[v].jitter$ 、 $Node[v].delay$ 、 $Node[v].packet\_loss\_rate$  和  $Node[v].M$  设置为  $+\infty$ , 表示从始节点到终止节点  $v$  满足 QoE 的路径不存在, 从而保证第一条

从始节点到达节点  $v$  满足 QoE 需求路径所相应的信息在对象  $Node[v]$  存放;

2)  $Node[v].flag$  设置为 white, 表示节点未进行释放操作;

3)  $Node[v].reverseNode$  设置为 NIL, 表示节点还不存在反向节点信息;

4) 将始节点对象  $Node[s]$  设置为 0,  $C'$  设置为  $Max + 1 - C$ , 表示路由选择时 QoE 表征值  $M$  的阈值。

Relax 函数对给定的节点对  $(u, v)$  进行释放操作:

1) 根据  $Node[u]$  存放的从始节点到节点  $u$  最优路径的累积信息和链路  $u \rightarrow v$  的信息, 计算出新的累积信息  $tmp.jitter$ 、 $tmp.delay$ 、 $tmp.packet\_loss\_rate$ , 然后根据 QoE 评价模型给出 QoE 表征值  $t.M$ 。

2) 对满足 QoE 等级需求的新路径, 即  $tmp.M \leq C'$ , 判断从始节点到达邻接节点  $v$  新路径对应的 QoE 表征值  $tmp.M$  是否优于当前始节点到达邻接节点  $v$  最优路径的 QoE 表征值  $Node[v].M$ , 如果是, 则说明从始节点经过节点  $u$  到达邻接节点  $v$  所得路径能提供更好的用户体验, 于是更新  $Node[v]$  的信息, 并且当节点  $v$  不在优先队列  $Q$  时将其加入队列。

3) 对于不满足用户等级需求的新路径, 则无须再行比较判断, 也无须加入优先队列  $Q$ 。利用 QoE 表征参数的可分解性特点, 在  $Node[u]$  保留从始节点到达节点  $u$  最优路径的  $jitter\_delay\_packet\_loss\_rate$  累积值, 于是从节点  $u$  计算新路径的 QoE 表征值时, 利用  $Node[u]$  和链路  $u \rightarrow v$  信息便可快速地得到新路径的 QoE 表征值; 另外利用 QoE 表征参数的非递减性, 对于那些已经不再满足 QoE 等级需求的路径则没有必要做进一步的搜索, 通过不将相应的节点放入队列的方式, 避免了对无效路径的搜索。

主函数 QoE\_DSP 完成整个基于 QoE 评价模型的最优路由选择过程。采用优先队列  $Q$ , 其中存放需要进行搜索的节点:

1) 从优先队列中获取 QoE 表征值  $M$  最小的节点, 然后对该节点标记为 black, 表示已搜索状态。

2) 对该节点所有标记为 white 的邻接节点进行 relax 释放操作, 完成对所有邻接节点的释放操作后, 重复 1), 直到从队列取出的节点为终节点  $t$  或队列为空。当取出的节点为终节点  $t$  时, 表示当前队列中其他节点  $u$  的  $Node[u].M$  都大于等于  $Node[t].M$ 。根据 QoE 表征参数的非递减性, 优先队列中剩余节点和随后加入优先队列的节点的  $Node[u].M$  也一定大于  $Node[t].M$ , 从而不存在到达终节点  $t$  更优的新路径, 于是可以停止搜索。

当算法完成搜索时, 查看  $Node[t].reverseNode$  信息, 如果此时为 NIL, 那么说明不存在满足用户等级需求的路径, 否则通过  $Node[t].reverseNode$  反向跟踪前向节点的信息, 通过所有的中间节点, 直到始节点  $s$ , 从而获得满足 QoE 需求的最优路径。

## 4.2 举例说明

不失一般性, 假设 H. 264 所对应的 QoE 评价模型如下:

$$QoE = 4.4 - 0.15 * jitter - 0.15 * packet\_loss\_rate * 100 \quad (11)$$

给定用户等级需求  $C = 4$ , 则  $C' = Max + 1 - C = 4.4 + 1 - 4 = 1.4$ 。

### 4.2.1 无可行解的情况

从始节点  $s$  出发, 计算相邻节点  $u, v$  得到  $tmp.M = 0.15 * 10 + 0.15 * 15 = 5.25 > C'$ ,  $tmp.M = 0.15 * 20 + 0.15 * 6 = 3.9 > C'$ , 而这两个值都超出了  $C'$ , 故不会放入队

列  $Q$ , 此时队列  $Q$  已经没有节点, 于是循环结束, 查看  $Node[t].reverseNode$ , 发现为 NIL, 说明没有满足 QoE 等级需求的路径。通过对进入队列  $Q$  节点的过滤, 可以避免对那些已经超出 QoE 等级需求路径的搜索, 从而提高对寻找满足 QoE 等级需求路径或者确定不存在满足 QoE 等级需求路径的速度。无可行解的拓扑图如图 1 所示。

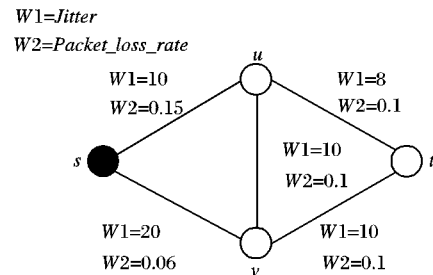


图 1 无可行解的拓扑图

### 4.2.2 有可行解的情况

有可行解的(过程1)拓扑图如图 2 所示。

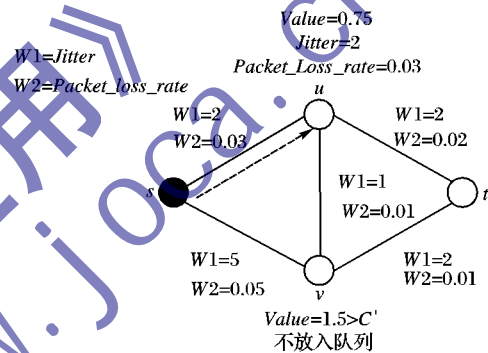


图 2 有可行解的拓扑图(过程1)

1) 从源节点  $s$  出发, 计算到节点  $u$  的相关信息  $tmp.jitter = Node[s].jitter + Link(s \rightarrow u) = 2$ ,  $tmp.packet\_loss\_rate = 1 - (1 - Node[s].packet\_loss\_rate)(1 - Link(s \rightarrow u)) = 0.03$ ,  $tmp.M = 0.15 * tmp.jitter + 0.15 * tmp.packet\_loss\_rate = 2 * 0.15 + 0.03 * 100 * 0.15 = 0.75 < C'$ 。

此时不存在始节点到达节点  $u$  满足 QoE 需求的路径, 于是将满足 QoE 需求的新路径信息存放在  $Node[u]$  中, 并将节点  $u$  加入队列  $Q$ 。

2) 计算到节点  $v$  的相关信息  $tmp.jitter = Node[s].jitter + Link(s \rightarrow v) = 5$ ,  $tmp.packet\_loss\_rate = 1 - (1 - Node[s].packet\_loss\_rate)(1 - Link(s \rightarrow v)) = 0.05$ ,  $tmp.M = 0.15 * tmp.jitter + 0.15 * tmp.packet\_loss\_rate = 5 * 0.15 + 0.05 * 100 * 0.15 = 1.5 > C'$ 。

于是不更新  $v$  节点的信息, 也不加入队列  $Q$ 。过程 2 的拓扑图如图 3 所示。

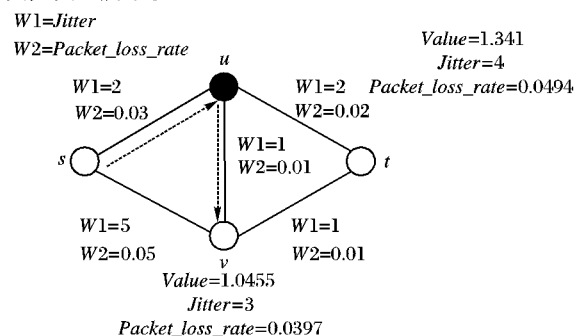


图 3 有可行解的拓扑图(过程2)

1) 从队列获取节点  $u$ , 计算  $tmp.jitter = Node[u].jitter +$

$Link(u \rightarrow v) = 3, tmp.packet\_loss\_rate = 1 - (1 - Node[u].packet\_loss\_rate)(1 - Link(u \rightarrow v)) = 0.0397, Node[v].M = 0.15 * tmp.jitter + 0.15 * tmp.packet\_loss\_rate = 3 * 0.15 + 0.0397 * 100 * 0.15 = 1.0455 < C'$ 。

此时不存在始节点到达节点  $v$  满足 QoE 需求的路径,于是将满足 QoE 需求的新路径信息存放在  $Node[v]$  中,并将节点  $v$  加入队列  $Q$ 。

2) 计算  $tmp.jitter = Node[u].jitter + Link(u \rightarrow t) = 4, tmp.packet\_loss\_rate = 1 - (1 - Node[u].packet\_loss\_rate)(1 - Link(u \rightarrow t)) = 0.0494, tmp.value = 0.15 * tmp.jitter + 0.15 * tmp.packet\_loss\_rate = 10 * 0.15 + 0.127 * 100 * 0.15 = 1.341 < C'$ 。

此时不存在始节点到达节点  $t$  满足 QoE 需求的路径,于是将满足 QoE 需求的新路径信息存放在  $Node[t]$  中,并将节点  $t$  加入队列  $Q$ 。

过程的拓扑图如图 4 所示。

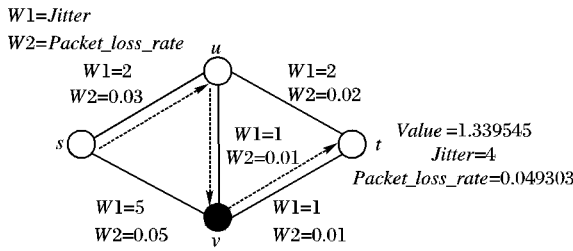


图4 有可行解的拓扑图(过程3)

1) 从队列获取节点  $v$ , 计算  $tmp.jitter = Node[v].jitter + Link(v \rightarrow t) = 4, tmp.packet\_loss\_rate = 1 - (1 - Node[v].packet\_loss\_rate)(1 - Link(v \rightarrow t)) = 0.049303, Node[t].M = 0.15 * tmp.jitter + 0.15 * tmp.packet\_loss\_rate = 4 * 0.15 + 0.049303 * 100 * 0.15 = 1.339545 < 1.341$ ;

此时满足 QoE 需求的新路径  $s \rightarrow u \rightarrow v \rightarrow t$  的 QoE 表征值优于当前路径  $s \rightarrow u \rightarrow t$  的 QoE 表征值,于是将新路径的信息更新  $Node[t]$ 。

2) 最后从队列中获取节点  $t$ , 于是停止搜索循环, 根据  $Node[t].reverse$  信息不断向前搜索获得满足 QoE 用户需求的最优路径  $s \rightarrow u \rightarrow v \rightarrow t$ 。

## 5 QoE 最优路由选择算法性能分析

### 5.1 理论分析

对基于 QoE 评价模型的最优路由选择算法的最坏时间复杂度进行分析。 $V$  表示边的数目,  $E$  表示节点数目,  $Initialize()$  的复杂度为  $O(E)$ ,  $relax()$  利用 QoE 表征参数的可分解性, 其除优先队列插入操作的所有其他操作时间复杂度为  $O(1)$ ;  $Q$  的最大值为  $V$ , 所以 18) 行的 while 最多执行  $V$  次, 19) 行优先队列操作时间复杂度为  $O(1)$ , 而  $relax()$  操作中将节点放入优先队列的时间复杂度为  $O(\log V)$ , 故在整个 while 过程中有关优先队列的操作时间复杂度为  $O(V \log V)$ ; 在 22) 行, 每条邻边  $(u, v)$  在整个 while 过程中最多被查询一次, 而对应于每个  $(u, v) \in E$ ,  $relax()$  将被调用一次, 而  $relax()$  中除优先队列插入操作的所有其他操作时间复杂度为  $O(1)$ , 所以此部分的时间复杂度为  $O(E)$ ; 故该最优路由选择算法总时间复杂度为  $O(V \log V + E)$ 。从而该算法可以在多项式时间内解决基于 QoE 评价模型的最优路由选择问题。

### 5.2 实验分析

通过随机生成的拓扑对算法的计算扩展性进行验证, 通过一些著名的 Internet 拓扑对算法的实用性进行验证。实验

中所使用的著名 Internet 拓扑有 ArpaNet (20 个节点和 32 条链路)、ItalianNet (33 个节点和 67 条链路)<sup>[19]</sup> 以及 AnsNet<sup>[5]</sup> (32 个节点和 54 条链路)。使用著名的 Internet 拓扑生成器 BRITE 生成随机网络拓扑。BRITE 提供了一些著名的拓扑模型, 包括 Waxman 模型, 用于生成合理的网络拓扑。本文将使用 Waxman 模型生成随机拓扑网络, Waxman 参数则选用 BRITE 提供的参数。在 Waxman 模型中, 节点随机插入  $1000 \times 1000$  的区域里。 $d(u, v)$  表示两个节点的欧几里得距离;  $\beta \times e^{-d(u, v)/(\alpha \cdot L)}$  表示边  $(u, v)$  连接节点  $u$  和  $v$  的概率, 其中:  $e$  是自然对数函数的底数;  $L$  是节点之间的最大距离;  $\alpha, \beta$  是  $(0, 1]$  区间的两个参数, 实验中使用 BRITE 提供的默认参数  $\alpha = 0.15, \beta = 0.2$ 。

实验利用 Waxman 模型生成 7 个网络拓扑, 其大小为: 1) 80 节点、320 链路; 2) 100 节点、400 链路; 3) 120 节点、480 链路; 4) 140 节点、560 链路; 5) 160 节点、640 链路; 6) 300 节点、1200 链路; 7) 500 节点、2000 链路。根据文献[1]的 QoE 模型和文献[5-7, 14]链路参数取均匀分布, 这里以 H. 264 模型和链路抖动为  $(0, 10]$  均匀分布, 丢包率为  $(0, 0.001]$  均匀分布为例, 测试不同 QoE 等级情况下的搜索平均时间。实验结果如图 5 所示, 其中  $E = 2 \times N$  ( $E$  表示边数,  $N$  表示节点数)。

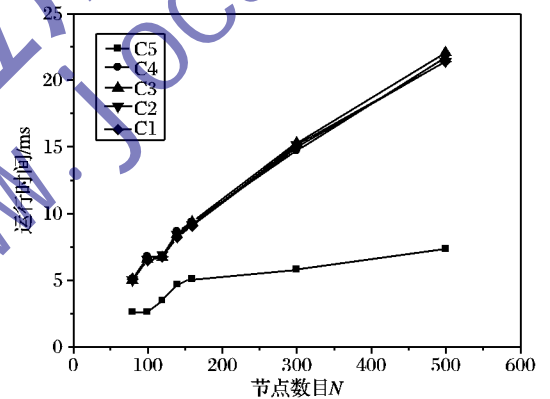


图5 QoE\_DSP 时间复杂度

观察发现, 随着网络节点数目的增加, 算法运行时间呈现几乎线性的增长趋势, 从而表明该算法具有很好的计算扩展性。另外, 相对于 QoE 等级为 1~4 时, QoE 等级为 5 的算法的平均时间相差很多, 其原因主要是, 当 QoE 等级为 5 时, 搜索过程中多数的路径不满足 QoE 需求, 通过裁剪避免不可行路径的搜索, 从而路径搜索的时间相对较短; 当 QoE 等级为 1~4 时, 搜索过程中有更多的路径满足 QoE 需求, 从而路径搜索的时间也相对较长。从另一个角度而言, QoE 等级为 5 的运行时间更多反映的是算法失败搜索的平均时间, 而其他 4 组运行时间更多反映的是算法成功搜索的平均时间。即当 QoE 等级小于等于 4 时, 给定网络拓扑中多数的节点对能找到满足 QoE 需求的最优路径; 而大于 4 时, 则很难找到满足 QoE 需求的路径, 并且很快就结束搜索过程。

接下来, 给出算法成功率  $SR$  的定义:

$$SR = \frac{\text{路由成功的请求数}}{\text{路由请求的总数}} \quad (12)$$

根据文献[1]中的 QoE 模型, 得到对应的模型系数  $k_1, k_2, k_3$ , 并分别在 ArpaNet、ItalianNet 和 AnsNet 中进行测试, 记录下成功率和运行时间, 如表 2~4 所示。

观察发现: 节点数和链路数最少的 ArpaNet, 运行时间相对最短, 成功率相对最小; 而节点数和链路数最多的

ItalianNet,运行时间相对最长,成功率相对最大。同时,在 QoE 等级为 5 时,运行时间相对最短,成功率相对最低,这说明当 QoE 等级为 5 时,网络中多数节点对不满足 QoE 的需求,又说明算法有效地利用 QoE 表征参数非递减性的特点对

不可行路径进行裁剪,从而提高了算法在网络中的搜索效率。最后,基于 QoE 评价模型的最优路由算法在 QoE 等级为 1~4 时的成功率和运行时间都很接近,这说明算法的运行时间不会随 QoE 的需求变化而增大,而只与网络拓扑结构有关。

表 2 ArpaNet 中的成功率和运行时间

QoE 模型等级	H. 264				MPEG4			
	新闻		运动		新闻		运动	
	成功率	运行时间/ $\mu$ s	成功率	运行时间/ $\mu$ s	成功率	运行时间/ $\mu$ s	成功率	运行时间/ $\mu$ s
1	0.2760	265.063	0.2925	258.358	0.2930	243.741	0.2845	246.215
2	0.2965	252.469	0.2960	260.369	0.2800	236.332	0.2975	269.596
3	0.2910	252.855	0.3110	249.229	0.2925	255.184	0.2830	244.949
4	0.2790	242.141	0.2935	239.623	0.2850	240.585	0.2840	253.685
5	0.1020	102.941	0.1500	150.512	0.2660	240.057	0.2690	243.489

表 3 AnsNet 中的成功率和运行时间

QoE 模型等级	H. 264				MPEG4			
	新闻		运动		新闻		运动	
	成功率	运行时间	成功率	运行时间/ $\mu$ s	成功率	运行时间/ $\mu$ s	成功率	运行时间/ $\mu$ s
1	0.3225	520.383	0.3235	495.922	0.2990	485.588	0.3055	490.477
2	0.3160	516.962	0.3355	510.964	0.3200	509.869	0.3110	496.425
3	0.3130	509.533	0.3245	508.738	0.3085	507.947	0.3090	502.759
4	0.2840	465.803	0.2950	505.880	0.3240	495.220	0.3010	494.986
5	0.0970	156.970	0.1350	239.184	0.2835	480.188	0.2795	459.079

表 4 ItalianNet 中的成功率和运行时间

QoE 模型等级	H. 264				MPEG4			
	新闻		运动		新闻		运动	
	成功率	运行时间/ $\mu$ s	成功率	运行时间/ $\mu$ s	成功率	运行时间/ $\mu$ s	成功率	运行时间/ $\mu$ s
1	0.4085	783.804	0.3990	777.393	0.4035	777.282	0.4015	781.107
2	0.4030	776.331	0.4250	778.253	0.4135	797.075	0.3985	772.553
3	0.4035	753.389	0.4150	773.609	0.4095	797.724	0.3955	794.065
4	0.3625	739.400	0.4035	758.851	0.4210	774.300	0.3915	778.316
5	0.1160	261.202	0.1760	373.539	0.3810	756.287	0.3765	707.208

6 结语

针对传统的路由选择算法只关注 QoS 参数本身,而没有关注 QoE 的现状,本文基于 QoE 评价模型给出以 QoE 为目标的最优路由选择算法 QoE\_DSP,其不仅考虑 QoS 各参数的重要程度,而且考虑 QoS 所反映的 QoE 情况。通过该算法能保证所得路径满足 QoE 需求,从而为用户提供准确的服务质量;并且该算法具有多项式时间复杂度和良好的计算扩展性。未来工作将研究基于其他 QoE 评价模型的路由选择算法,同时考虑网络资源利用率情况下的 QoE 路由算法也是一个比较实际的应用场景。

参考文献:

[1] 张大陆,张起强. IP 网络中视频流 QoE 评价模型[J]. 计算机工程与应用, 2012,48(3):83-87.

[2] WANG ZHENG, CROWCROFT J. Quality-of-service routing for supporting multimedia applications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1996,14(7):148-154.

[3] 赵海雁,陈立潮. 多约束条件下最短路径 QoS 路由算法[J]. 华北工学院学报, 2004,25(1):49-51.

[4] KORKMAZ T, KRUNZ M. A randomized algorithm for finding a path subject to multiple QoS constraints[C]// GLOBECOM'99: Global Telecommunications Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 1999:1694-1698.

[5] CHEN SHIGANG, NAHRSTEDT K. On finding multi-constrained paths[C]// ICC'98: Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Communications. Atlanta: IEEE, 1998:874-879.

[6] COSTA L H M K, FDIDA S, DUARTE O C M B. A scalable algorithm for link-state QoS-based routing with three metrics[C]// ICC 2001: IEEE International Conference on Communications. Helsinki: IEEE, 2001:2603-2607.

[7] JAFFE J M. Algorithms for finding paths with multiple constraints[J]. Networks, 1984,14(1):95-116.

[8] ANDREW L L H, KUSUMA A A N A. Generalised analysis of a QoS-aware routing algorithm[EB/OL]. [2012-01-05]. [http://www.caia.swin.edu.au/cv/landrew/pubs/qos\\_gc98.pdf](http://www.caia.swin.edu.au/cv/landrew/pubs/qos_gc98.pdf).

[9] IWATA A, IZMAILOV R, LEE D-S, et al. ATM routing algorithms with multiple QoS requirements for multimedia internetworking[J]. IEICE Transactions on Communications, 1996, E79-B(8):999-1006.

[10] CUI YONG, XU KE, WU JIANPING, et al. Precomputation for finding paths with two additive weights[C]// ICC'03: IEEE International Conference on Communications. [S.l.]: IEEE, 2003:636-640.

[11] XIAO WENDONG, SOONG B H, LAW C L, et al. Evaluation of heuristic path selection algorithm for multi-constrained QoS routing[C]// IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control. [S.l.]: IEEE, 2004:112-116. (下转第 2695 页)

设网络时,锚节点的比例也需要控制在一定的范围内。图6是定位误差随节点密度变化曲线。

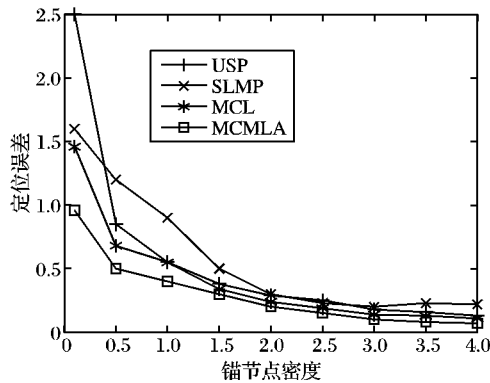


图5 定位误差随锚节点密度变化曲线

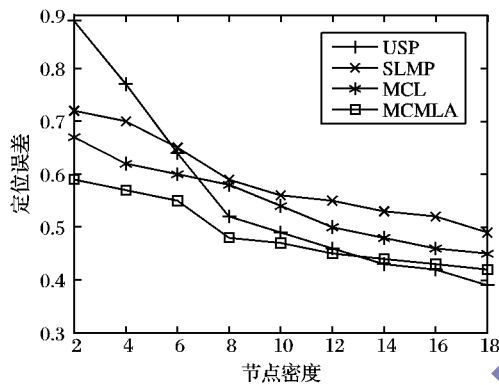


图6 定位误差随节点密度变化曲线

节点密度是影响无线传感器网络定位精度的重要因素,节点密度越大,定位就越容易。四种算法的定位误差都随着节点密度的增大而减小。MCMLA中,由于在预测过程中需要节点间交换信息来更新采样窗口,在滤波过程中需要节点的邻居节点提供锚节点的相关信息。当节点密度越高时,算法的定位误差就越小。同时,由于节点分布不均匀导致算法精度低的可能性,也会随节点密度的提高而降低。MCMLA对节点间通信信息的灵活运用,使它的定位精度要优于另外三种算法。

#### 4 结语

由于海洋环境的复杂多变性,导致无线传感网的海洋监测节点定位比静态定位更难实现,算法更加复杂。本文在MCL算法的基础上结合海洋自身的特性进行定位,克服了传统MCL反复采样陷入死循环的缺点,更符合海洋这一特殊环境的应用。从仿真结果可以看出,MCMLA的定位效果要好

于以往的定位算法。

#### 参考文献:

- [1] 吕超,王硕,谭民.水下移动无线传感器网络研究综述[J].控制与决策,2009,24(6):801-812.
- [2] 孙利民,李建中,陈渝,等.无线传感器网络[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [3] TEYMORIAN A Y, CHENG WEI, MA LIRAN, *et al.* 3D underwater sensor network localization[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 8(12): 1610-1621.
- [4] CHENG WEI, TEYMORIAN A Y, MA LIRAN, *et al.* Underwater localization in sparse 3D acoustic sensor networks[C]// INFOCOM'08: Proceedings of the Twenty-seventh Conference on Computer Communications. Phoenix: IEEE Press, 2008: 236-240.
- [5] CHEN TIAN, LIU WENYU, WANG YI, *et al.* Localization and synchronization for 3D underwater acoustic sensor networks[C]// Ubiquitous Intelligence and Computing, LNCS 4611. Berlin: Springer, 2007: 622-631.
- [6] 曾斌,钟德欢,姚路.考虑水流影响的水下传感器网络移动算法研究[J].计算机应用研究,2010,27(10):3926-3931.
- [7] 李睿.水下GPS定位技术研究[D].西安:西安电子科技大学,2008:1-81.
- [8] 黄根梅,常新峰.一种基于蒙特卡罗法德无线传感器网络移动节点定位算法研究[J].传感技术学报,2010,23(4):562-566.
- [9] 汪炀,黄刘生,吴俊敏,等.一种基于Monte Carlo的移动传感网络精确定位算法[J].小型微型计算机系统,2008,29(12):1637-1642.
- [10] 黎大鹏,程良伦,QUAN ZHU.基于VWMC的传感器网络移动节点定位算法[J].计算机工程与设计,2010,31(2):305-308.
- [11] HU LIANGXUAN, EVANS D. Localization for mobile sensor networks[C]// Proceedings of the Tenth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2004: 45-57.
- [12] 孙海燕,周梦.应用数理统计[M].北京:北京航空航天大学出版社,2008.
- [13] BAGTZOGLOU A C, NOVIKOV A. Chaotic behavior and pollution dispersion characteristics in engineered tidal embayment: A numerical investigation[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2007, 43(1): 207-209.
- [14] ZHOU ZHONG, CUI JUN-HONG, BAGTZOGLOU A. Scalable localization with mobility prediction for underwater sensor networks[C]// INFOCOM'08: Proceedings of the Twenty-seventh Conference on Computer Communications. Phoenix: IEEE Press, 2008: 2198-2206.
- [15] 刘林,范平志.一种降低定位误差的无线传感器网络节点定位改进算法[J].电路与系统学报,2007,12(2):1-4.

(上接第2688页)

- [12] de NEVE H, van IEGHEM P. TAMCRA: A tunable accuracy multiple constraints routing algorithm[J]. Computer Communications, 2000, 23(7): 667-679.
- [13] van MIEGHEM P, KUIPERS F A. Hop-by-hop quality of service routing[J]. Computer Networks, 2001, 37(3/4): 407-423.
- [14] van MIEGHEM P, KUIPERS F A. Concepts of exact QoS routing algorithms[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2004, 12(5): 851-864.
- [15] AHUJA R K, MAGNANTI T L, ORLIN J B. Network flows: Theory, algorithms, and applications[M]. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 1993.
- [16] PINSON M, WOLF S. An objective method for combining multiple subjective data sets[EB/OL]. [2012-01-10]. [http://wenku.](http://wenku.baidu.com/view/1f9a591f59eef8c75fbfb3f8.html?from=related)

[baidu.com/view/1f9a591f59eef8c75fbfb3f8.html?from=related](http://wenku.baidu.com/view/1f9a591f59eef8c75fbfb3f8.html?from=related).

- [17] WANG BIN, HOU J C. Multicast routing and its QoS extension: Problems, algorithms, and protocols[J]. IEEE Network, 2000, 14(1): 22-36.
- [18] KORKMAZ T, KRUNZ M. Multi-constrained optimal path selection[C]// INFOCOM'01: Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Anchorage: IEEE, 2001: 834-843.
- [19] ANDERSEN R, CHUANG F, SEN A, *et al.* On disjoint path pairs with wavelength continuity constraint in WDM networks[C]// INFOCOM'04: Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Anchorage: IEEE, 2004: 524-535.