

抑制 CMT 中乱序程度的路径优化方案

王振朝^{1,2} 侯欢欢¹ 连蕊¹

(河北大学电子信息工程学院 河北保定 071002)¹ (河北省数字医疗工程重点实验室 河北保定 071002)²

摘要 为减轻并行多路径传输(CMT)中接收端的乱序程度,文中提出了一种新的路径优化方案。该方案以MPTCP协议为基础,在三维笛卡尔坐标系下建立基于路径往返时延、丢包率和带宽的路径评价模型,将二分法与改进的基于密度的聚类分析方法相融合,根据所需路径数在坐标系下选择出一组带宽大、丢包率小且时延差也小的路径作为活跃路径。仿真结果显示,本方案与基于权重的路径选择方案相比降低了接收端的乱序长度与重传数据包个数,从而可以提高吞吐量与数据包传输速率。

关键词 异构网络, CMT, 乱序, 二分法, 聚类分析

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.04.019

Path Optimization Scheme for Restraining Degree of Disorder in CMT

WANG Zhen-chao^{1,2} HOU Huan-huan¹ LIAN Rui¹

(College of Electronic Information Engineering, Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China)¹

(Key Laboratory of Digital Medical Engineering of Hebei Province, Baoding, Hebei 071002, China)²

Abstract In order to lighten the disorder degree at the receiving side in concurrent multipath transfer(CMT), a new path optimization scheme was proposed in this paper based on MPTCP protocol. In this scheme, a geometric path evaluation model is established based on path delay, packet loss rate and bandwidth in three-dimensional cartesian coordinate system(3D). In order to select a set of active paths with large bandwidth, small packet loss rate and small delay-difference from the geometric path evaluation model according to the required number of paths, the dichotomy is combined with the improved density-based clustering analysis method. Simulation results demonstrate that the proposed scheme can reduce the disorder length and the number of retransmission packets, and can improve the throughput and packet transmission rate.

Keywords Heterogeneous network, CMT, Disorder, Dichotomy, Clustering analysis

1 引言

为了提高用户的满意度,解决网络负载均衡问题,异构网络中的并行多路径传输(CMT)技术成为近年来关注的热点^[1-3]。IETF互联网工程任务组提出的多路径传输控制协议^[6-7](Multipath Transport Control Protocol, MPTCP)是异构网络并行多路径传输中应用得最广泛的协议,它通过扩展TCP实现端到端的多路径同时传输,并兼容TCP及其中间件,与单路径TCP协议相比能够获得更高的吞吐量。但由于异构网络中同时存在多个接入网,使得每条路径的时延、丢包率等路径参数动态变化且差异性较大,在接收端就可能会出现数据包乱序、接收缓存阻塞等问题。

影响接收端乱序程度的主要因素不仅包括路径时延差,还包括带宽和丢包率。因此对参与数据传输的路径必须有所选择来缩小路径间的时延差,提高带宽利用率,减小数据包的丢包率。在选择路径的过程中,首先需要确定路径数量,然后从备用路径中按一定规则选择出相应数量的路径作为活跃

路径。文献[4]研究了如何确定使网络状态最佳的路径数量,而本文主要研究如何从备用路径中选择一定数量的最优路径。

Bong-Hwan等人针对路径时延对接收端乱序的影响,提出了一种基于延迟约束的主动调度算法^[8],其算法思想是当路径时延小于设定的阈值时,则认为路径可用,但是这种算法忽略了丢包率和带宽在实际网络中与乱序的制衡关系,而且也不能保证可用路径是全部路径中相互时延差最小的路径集合。杜文峰等人为了体现路径的发送能力,同时考虑时延和丢包率等多个参数,并引入发送窗口与接收端收到全部确认数据包所需时间的比值的函数 $Q(W)$,当可能出现乱序时,选择性能最好的路径发送数据,防止接收缓存阻塞^[10]。但是这种算法降低了网络的资源利用率,更适合单一路径选择,而非多路径选择。刘鹏等人提出了一种使用层次分析法的路径性能量化方法来定量分析路径性能的优劣,将多个参数乘以对应的权重得到路径性能的量化值,利用此量化值来进行多路径选择^[9,11],从而将多参数优化问题转换为单参数优化问题,使得分析计算更加简单。但该算法无法保证活跃路径的每个

到稿日期:2017-01-03 返修日期:2017-05-16 本文受河北省自然科学基金项目(F2014201168)资助。

王振朝(1958—),男,博士,教授,主要研究方向为下一代移动通信网与工业数据通信, E-mail:wangzhenchaohbdx@163.com(通信作者);侯欢欢(1990—),女,硕士生,主要研究方向为异构无线网络, E-mail:houbhu@163.com;连蕊(1991—),女,硕士生,主要研究方向为无线自组网。

路径参数都是最优的,而且也不能保证活跃路径间的时延差最小,从而导致评估结果失真。

本文针对加权选择算法的不足提出了一种新的路径优化方案,在接收缓存有限的前提下,分别考虑各路径参数对路径质量的影响,建立基于路径时延、带宽和丢包率的几何路径评价模型。然后利用基于二分法和改进的基于密度的聚类分析方法^[12-13]相融合搜索方案,在此模型中搜索出一组带宽大、丢包率小并且时延差小的路径作为活跃路径。此搜索方案将传统聚类分析方法中的密度计算范围从全部数据点缩减为部分数据点集合,降低了计算复杂度。

2 基于几何路径评价模型的路径搜索方案

2.1 几何路径评价模型

假设 MPTCP 建立的连接中,发送端到接收端之间存在 n 条备用路径,本文主要考查路径的带宽、丢包率和路径时延对系统性能的影响。将上述参数分别用 b, l 和 t 表示。由于 3 个参数对路径传输性能的影响程度不同,因此我们引入权重对 3 个参数作如下变形。

$$\begin{cases} B = \alpha * b \\ L = \beta * l \\ T = \chi * t \end{cases} \quad (1)$$

其中, α, β, χ 分别表示带宽、丢包率和路径时延的权重,并同时满足以下两个条件: 1) $0 \leq \alpha \leq 1, 0 \leq \beta \leq 1, 0 \leq \chi \leq 1$; 2) $\alpha + \beta + \chi = 1$ 。不同应用场景中,权重分配不同,本文参考文献^[9]取 $\alpha = 0.10472, \beta = 0.63699, \chi = 0.25829$ 。 B, L, T 分别表示带宽、丢包率和路径时延经过权重修正后的值。

以 B, L 和 T 为坐标轴建立三维笛卡尔直角坐标系,则任意路径 $i (1 \leq i \leq n)$ 的性能参数组成的有序数组 (B_i, T_i, L_i) 就对应于该坐标系中的点 $P_i (B_i, T_i, L_i)$, 那么由有序数组表示的 n 条备用路径都可以表示成坐标系中的一个点,从而路径的性能可以根据其在坐标系中的空间位置进行评价。由于各参数的取值范围为 $(0, +\infty)$, 若将坐标原点取为 $(0, 0, 0)$, 则所有备用路径全部位于第一卦限。在仿真中用随机生成的一些点来模拟所有备用路径,仿真结果如图 1 所示。

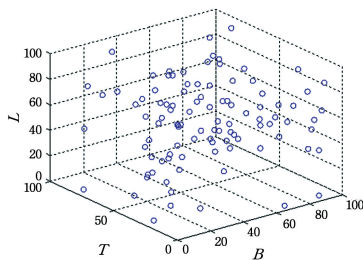


图 1 三维坐标系下的路径评价模型
Fig. 1 Path evaluation model in 3D coordinate system

2.2 路径搜索方案

建立几何路径评价模型以后,搜索最佳路径的过程就变成了在三维空间中确定一个区域并在此区域内搜索所需路径的过程。显然,该区域在 L 轴上应尽量靠近坐标原点,在 B 轴上应尽量远离坐标原点,在 T 轴上应尽量覆盖密度大的区域。当数据量增大时,传统穷搜法的工作量很大,本文对穷搜法进行改进,将二分法与基于密度的聚类分析方法相结合,给出一个三维搜索方案以减少搜索工作量。

2.2.1 搜索空间的确定

所有备用路径在以 $[B_{\min}, B_{\max}], [T_{\min}, T_{\max}], [L_{\min}, L_{\max}]$ 为最外边界的立方体 ABCD-EFGH 内。在几何路径评价模型中,以过点 $M (B_{\min} + (B_{\max} - B_{\min})/2), T_{\min}, L_{\min}$ 并且平行于 TOL 平面的平面以及过点 $N (B_{\min}, T_{\min}, L_{\min} + (L_{\max} - L_{\min})/2)$ 并且平行于 BOT 平面的平面为分界面,将立方体 ABCD-EFGH 等分为 4 个大小和形状都相同的子空间。根据方案目标,我们选取 4 个子空间中带宽最大并且丢包率最小的一个子空间为初始搜索空间,此初始搜索空间的范围可以表示成如下形式:在 B 轴上的范围: $[B_{\min} + (B_{\max} - B_{\min})/2, B_{\max}]$; 在 L 轴上的范围: $[L_{\min}, L_{\min} + (L_{\max} - L_{\min})/2]$; 在 T 轴上的范围: $[T_{\min}, T_{\max}]$ 。在仿真中,将各参数的最值设置为 $B_{\min} = 2, B_{\max} = 10, T_{\min} = 20, T_{\max} = 80, L_{\min} = 0.1, L_{\max} = 1$ 时的仿真结果如图 2 所示,阴影部分即为坐标系下的初始搜索空间。

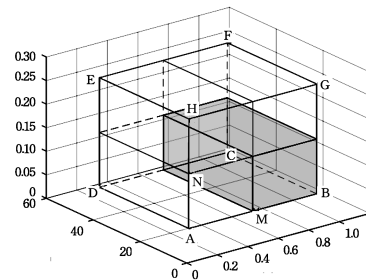


图 2 三维坐标系中的初始搜索空间
Fig. 2 Initial search space in 3D coordinate system

统计初始搜索空间内的路径数量 m , 并与所需路径数 N 进行比较,若满足 $m \geq N$, 则此初始搜索空间即为最终的搜索空间 S ; 若 $m < N$, 则将初始搜索空间按如下顺序依次扩大: 1) 第一次扩大。在 B 轴和 L 轴上同时将搜索空间扩大到如下范围,即在 B 轴上的范围为 $[B_{\min} + (B_{\max} - B_{\min})/4, B_{\max}]$, 在 L 轴上的范围为 $[L_{\min}, L_{\min} + 3(L_{\max} - L_{\min})/4]$, 并更新此时搜索空间中的路径数量 m 。2) 第二次扩大。在 B 轴和 L 轴上同时将搜索空间扩大到如下范围,即在 B 轴上的范围为 $[B_{\min} + (B_{\max} - B_{\min})/8, B_{\max}]$, 在 L 轴上的范围为 $[L_{\min}, L_{\min} + 7(L_{\max} - L_{\min})/8]$, 并更新此时搜索空间中的路径数量 m 。3) 第 k 次扩大。在 B 轴和 L 轴上同时将搜索空间扩大到如下范围,在 B 轴上的范围为 $[B_{\min} + (B_{\max} - B_{\min})/2^{k+1}, B_{\max}]$, 在 L 轴上的范围为 $[L_{\min}, L_{\min} + (2^{k+1} - 1)(L_{\max} - L_{\min})/2^{k+1}]$, 并更新此时搜索空间中的路径数量 m , 直到 $m \geq N$, 此时的搜索空间即为最终的搜索空间 S 。

2.2.2 密度峰值点的计算

确定搜索空间 S 后,考虑 S 内的 m 条路径的路径时延对路径性能的影响,然后结合所需路径数 N 在搜索空间 S 内选择出一组路径时延差最小的路径作为活跃路径。在探索空间 S 内有如下定义:

1) 任意两条备用路径 i 和 j 对应的点 P_i 和点 P_j 在 T 轴上的距离 d_{ij} 的计算式为:

$$d_{ij} = |T_i - T_j| \quad (2)$$

其中, T_i 和 T_j 分别表示点 P_i 和点 P_j 在 T 轴上的坐标值。

2) 任意备用路径 i 对应的点 P_i 的局部密度 ρ_i 的计算式为:

$$\rho_i = \sum_{j \in S} \chi(d_{ij} - d_c) \quad (3)$$

其中,如果 $d_{ij} < d_c$, 那么 $\chi(d_{ij} - d_c) = 1$, 否则 $\chi(d_{ij} - d_c) = 0$ 。

d_c 为截断距离,实质是指在搜索空间中剩余路径与路径 i 的距离小于 d_c 的路径条数。一般将所有备用路径在几何路径评价模型中的相互距离按升序排列的 2% 位置的距离数值定义为 d_c 。本文将传统密度计算范围从整个区域集缩减为搜索空间 S ,这样得到的局部密度仅与此搜索空间有关,更能反映路径 i 在搜索空间中的局部信息。

3)任意备用路径 i 对应的点 P_i 的 δ_i 是 P_i 到局部密度比它大的备用路径的距离的最小值:

$$\delta_i = \min_{j: \rho_j > \rho_i} (d_{ij}) \tag{4}$$

对于局部密度 ρ_i 最大的备用路径 i ,其 $\delta_i = \max_j d_{ij}$ 。

4)定义一个将 ρ 值和 δ 值综合考虑的量 γ_i :

$$\gamma_i = \rho_i \delta_i, i \in S \tag{5}$$

显然, γ 值越大,其越有可能是密度峰值点。

因此,只需要对搜索空间 S 内的所有备用路径的 γ_i 值进行比较, γ_i 值最大的点 P_i 即为密度峰值点。

针对路径传输性能动态可变的情况,有以下两种解决方案:1)周期性地对路径参数值进行更新;2)实时监测参数值变化,当变化范围超过设定阈值时,对其进行更新。

2.2.3 方案执行步骤

本方案的设计目标是从 n 条备用路径中通过几何路径评价模型和搜索方案选择出 N 条最优路径。执行步骤如下:

1)获取路径参数,设置 n 条备用路径均为活跃路径,发送端采用轮询算法在 n 条备用路径上发送数据,获取各条备用路径的相关参数。

2)将每条备用路径对应的带宽、丢包率和路径时延的值经式(1)修正后组成三维有序数组并与坐标系中的点一一对应,得到几何路径评价模型。

3)利用 2.2.1 节的方法得到搜索空间 S 。

4)由式(2)~(5)计算搜索空间 S 中的密度峰值点 P_i 。

5)计算 S 中密度峰值点 P_i 与剩余 $(m-1)$ 条备用路径对应的点在路径时延轴上的距离(规定 $d_{ij} = d_{ji}$),并将此距离按升序排列组成集合 A ,集合 A 中由前向后选取 N 条所需路径作为活跃路径。

3 仿真及仿真结果分析

为了验证本文算法的有效性,采用基于 Linux 操作系统的 NS-3^[16] 网络仿真器对本文中的路径选择方案和基于加权算法的路径选择方案进行仿真分析。将 MPTCP 工作组提供的 MPTCP 传输层开源模块添加到 NS-3 中并对套接字进行修改,来评估异构网络环境中的 MPTCP 协议加入路径管理策略后的性能。

3.1 仿真条件的设定

使用图 3 所示的网络拓扑图构建无瓶颈链路的仿真环境。

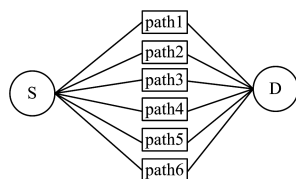


图 3 仿真拓扑图

Fig. 3 Simulation topology

其中主机 S 为具有 6 个 IP 的多宿主发送端,主机 D 为具有 6 个 IP 的多宿主接收端,主机 S 和主机 D 之间总共建立了 6 条路径。所有路径的性能参数如表 1 所列。

表 1 路径参数

Table 1 Path parameters

编号	path1	path2	path3	path4	path5	path6
B/Mbps	5	4	4	3	2	1
L/%	1	1	2	5	5	8
T/ms	55	45	45	40	40	80

仿真中设置数据调度算法使用轮询算法,拥塞控制算法使用 Linked Increases 算法,所需路径数为 3,共享接收缓冲区容量^[16]为 3.04 Mb。

RFC4737 中定义了多条衡量数据乱序的准则^[17],本文选择其中的乱序长度作为相同场景下两种路径选择方案的主要评价指标。该标准中有如下定义:

s :发送端分配给分组的序列号;

i :分组到达接收端的位置索引;

$s[i]$:第 i 个到达接收端的分组的序列号。

当发送端分配给分组的序列号不等于分组到达接收端的位置索引时就认为分组在传输过程中发生了乱序。分组 $s[i]$ 的乱序长度 $\mu = i - j (1 \leq j < i)$,其中, j 为使得 $s[j] > s[i]$ 的最小的整数。乱序长度的单位为 packets。

3.2 仿真结果及其分析

图 4 给出了在仿真次数为 50 的情况下,在发送端分别采用本文路径选择方案和基于加权算法的路径选择方案发送 20,40,60,80 个数据分组时,各自总的乱序长度的平均值。从图中可以看出,随着发送数据分组个数的增加,总的乱序长度也随之增加,但是使用本文的路径选择方案的乱序长度的增长速度比基于加权算法的路径选择方案的乱序长度的增长速度缓慢得多;并且随着传输分组个数的增多,本算法的优势更加明显。其主要原因是本文分开考虑各路径参数对路径性能的影响,选择出的活跃路径具有带宽大、丢包率小且时延差小的特点,是备用路径中的一组最优路径,因此按序发送的数据包能在较短时间内全部到达接收端,乱序长度较短。但是加权算法中只是使路径参数的加权值达到最大,并不能保证每个参数都是最优的,更容易引起数据乱序,乱序长度相对较长。

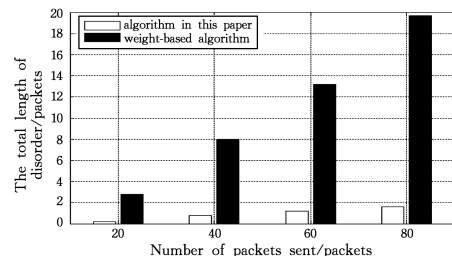


图 4 仿真次数为 50 时的平均总乱序长度

Fig. 4 Average total disorder length when the number of simulations is 50

图 5 显示的是在相同数量的路径下发送端以 10 packet/s 的速率发送数据包时两种方案的重传数据包个数随时间变化的曲线。由曲线的走势可以看出,在 0~6s 时间段内,

两种方案重传数据包的个数相差不大并且重传的个数较少,随着时间的增加,系统使用本文方案时的重传数据包的个数明显低于使用基于加权算法的路径选择方案时重传数据包的个数,并且仿真时间越长,个数差距越大。其主要原因是加权算法不能保证参与数据传输的路径的丢包率最小并且时延差也最小,这样就容易引起数据包的丢包重传和超时重传,导致重传数据包个数增加,接收端乱序的可能性增加。本文方案对路径参数分别进行优化,保证了参与数据传输的活跃路径的性能最优,使得按序发送的数据包的丢包率降低,重传数据包的个数减少,产生乱序的可能性降低。

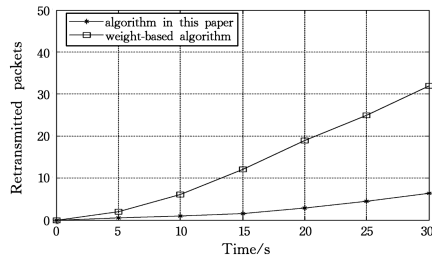


图 5 重传数据包的个数

Fig. 5 Number of retransmitted packets

通过仿真分析可得,本文提出的算法在 MPTCP 多路径并行传输数据方面优于基于加权算法的路径选择方案。

结束语 本文首先根据各路径的路径参数值建立几何路径评价模型,然后在此模型中利用二分法与基于密度的聚类分析方法相结合的搜索方案搜索出一组带宽大、丢包率小并且时延差小的路径作为活跃路径。相对于基于加权算法的路径选择方案中采用加权方式将多参数问题转化为单参数问题的方法,本文方案分开考虑各参数对路径性能的影响,保证了所选路径的路径参数是最优的,从而使选择出的活跃路径具有带宽大、丢包率小和时延差小的特点。由 NS3 的仿真结果可知,本文方案与基于加权的路径选择方案相比,减少了接收端的乱序长度与重传数据包的个数,从而可提高吞吐量与数据包传输速率。

参 考 文 献

- [1] AGAPI M, FERRAN A, LUIS A, et al. Energy efficient user association in cognitive heterogeneous network [J]. IEEE Communication Magazine, 2014, 52(7): 22-29.
- [2] WANG J, LIAO J X, LI T H. OSIA: Out-of-order Scheduling for In-order Arriving in concurrent multipath transfer [J]. Journal of Network and Computer Application, 2012, 35(2): 633-643.
- [3] ZHAN X Y. A research on multipath communication in heterogeneous network [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013. (in Chinese)
战鑫洋. 异构网络环境中的多路径通信研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2013.
- [4] WANG J Y. Game-theoretic model of asymmetrical multipath selection in pervasive computing environment [J]. Pervasive and Mobile Computing, 2016, 27(C): 37-57.
- [5] SHAIENDRA S, BHATTACHARJEE R, BOSE S K. A multipath variant of SCTP with optimized flow division extension [J]. Computer Communications, 2015, 67: 56-65.
- [6] FORD A, RAICIU C, HANDLEY M, et al. Architectural Guidelines for Multipath TCP Development [R]. IETF: International, 2011: 1-28.
- [7] NAKASAN C, ICHIKAWA K, UTHAYOPAS P. Performance Evaluation of MPTCP over Open Flow Network [J]. IPSJ SIG Notes, 2014, 2014(30): 1-6.
- [8] OH B H, LEE J Y. Constraint-based proactive scheduling for MPTCP in wireless networks [J]. Computer Network, 2015, 91(14): 548-563.
- [9] LIU P. The Research of Path Management Based on MPTCP [D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2013. (in Chinese)
刘鹏. 基于 MPTCP 的路径管理研究 [D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2013.
- [10] DU W F, WU Z. Data Distribution Algorithm with Out-of-order Feedback for CMT over Diversity Network [J]. Computer Science, 2015, 42(3): 60-64. (in Chinese)
杜文峰, 吴真. 基于乱序反馈的差异化多路径并发传输模型数据分配算法 [J]. 计算机科学, 2015, 42(3): 60-64.
- [11] LI X M. The Design and Implementation of an Optimized MPTCP Data Scheduling Algorithm [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 519-520: 170-176.
- [12] SHENG H, ZHANG G Z. A clustering method combining K-means and fast search algorithm of density peaks [J]. Computer Application and Software, 2016, 33(10): 260-264. (in Chinese)
盛华, 张桂柱. 一种融合 K-means 和快速密度峰值搜索算法的聚类方法 [J]. 计算机应用于软件, 2016, 33(10): 260-264.
- [13] XIE J Y, GAO H C, XIE W X. A fast search clustering algorithm with peak density based on K-neighborhood optimization [J]. Scientia Sinica Informations, 2016, 46(2): 258-280. (in Chinese)
谢娟英, 高红超, 谢淮信. K 邻域优化的密度峰值快速搜索聚类算法 [J]. 中国科学: 信息科学, 2016, 46(2): 258-280.
- [14] WANG J Y, LIAO J, LI I, et al. Correlation-aware multipath selection to enhance path diversity in ubiquitous computing environment [J]. International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing, 2012, 11(4): 246-257.
- [15] CHEN S, YUAN Z, MUNTEAN G M. An Energyaware Multipath TCP-based Content Delivery Scheme in Heterogeneous Wireless Networks [C] // Proceedings of 2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Shanghai, China, 2013: 1291-1296.
- [16] MPTCP implementation for NS-3 [OL]. <http://code.google.com/p/mptcp-ns3>.
- [17] RFC4737. Packet Reordering Metrics [S]. 2006.