

一种多路由器多接口的移动网络多宿方案

尹 星^{1,2} 张三峰¹

(东南大学计算机科学与工程学院 南京 210096)¹ (江苏大学电气信息工程学院 镇江 212013)²

摘 要 为了解决移动网络中移动路由器易出现的单点失效和性能瓶颈的问题,针对现有多宿方案不能同时处理多路由器和多接口混合多宿,以及需要修改网络内部节点等不足,提出了一种可以适用于混合多宿场景的移动网络多宿方案 MM-NEMO。该方案定义了移动路由器外部接口常用的重要属性以及这些属性的维护方法,并通过多播技术在移动路由器之间动态地交换接口属性,使移动网络中所有外部接口的信息都以分布式存储的形式保存在每个移动路由器中;然后移动路由器对内部节点发起的通信使用基于信息熵的多属性决策机制进行最佳接口的选择、分配或重定向。特性分析表明,该方案可以同时满足多路由器、多接口以及混合场景的需求,并且对网络内部节点保持透明。仿真结果表明,该方案具有较低的端到端时延和较高的总吞吐量。

关键词 移动网络,移动路由器,多宿,接口选择

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.5.028

Multihoming Scheme for Mobile Networks with Multiple Interfaces and Multiple Routers

YIN Xing^{1,2} ZHANG San-feng¹

(School of Computer Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)¹

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)²

Abstract To solve the common problems of single point of failure and performance bottleneck in mobile routers of the mobile network, this paper analyzed the inability of most existing multihoming schemes to achieve optimal route selection in the multi-interface hybrid multihoming scenario and proposed MM-NEMO, a multihoming method that can be applied in the hybrid multihoming scenario. By defining major common attributes of external interfaces on the mobile router and their maintenance methods and by dynamically exchanging interface attributes between mobile routers using the multicast technology, MM-NEMO enables the mobile routers to maintain the attributes of all external interfaces in the mobile network. Then, the communication initiated by internal nodes uses the comentropy-based multiple attribute decision making (MADM) algorithm to perform the selection, assigning and redirection of the optimal interface. Characteristic analysis indicates that MM-NEMO provides internal nodes in the mobile network with a transparent mechanism for optimal route selection in the hybrid multihoming scenario. Simulation results show that MM-NEMO features low end-to-end delay and high overall throughput.

Keywords Network mobility(NEMO), Mobile router, Multihoming, Interface selection

1 引言

随着各种无线通信技术的发展,很多移动网络设备集成了多种通信接口,并希望通过使用不同的接入技术同时接入 Internet。例如当车辆移动过程中,为车内所有节点提供接入服务的车载移动路由器既能始终保持与 4G 网络的连接,又可以在车辆接近路边基础设施时通过 WLAN 技术接入 Internet。IETF 提出的移动 IPv6 (MIPv6)^[1] 和网络移动性 (Network Mobility, NEMO) 基本支持协议^[2] 可以分别为移动主机和移动网络提供持续的 Internet 接入,但上述两个协议 (以下称为基本协议) 无法解决移动节点同时使用多个网络接

口进行通信的问题;而且 NEMO 协议只使用一个移动路由器来负责维持整个网络内部所有节点的通信,因此易出现单点失效和网络瓶颈问题^[3],该问题在嵌套移动网络中会更加明显^[4]。此外,无线链路本身存在带宽较低、稳定性较差等不足,因此,解决移动网络的单路由器、单接口形式所带来的可靠性和性能问题就显得尤为重要。

IETF 提出的多宿技术已成为解决主机移动和网络移动中可靠性问题的最有效的方案^[5]。多宿是指主机或者子网通过多个接口同时连接到 Internet 接入网^[6],移动网络采用多宿技术可以提高可靠性,实现持久的普适接入,还可以实现数据流的分配或重定向,以及负载共享和负载均衡^[7]。但由于

到稿日期:2014-06-04 返修日期:2014-08-25 本文受国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(2013AA013503),国家自然科学基金资助项目(61272532,61300200)资助。

尹 星(1980—),男,博士生,讲师,主要研究方向为移动互联网、车联网、下一代网络体系结构等,E-mail:staryin@126.com;张三峰(1979—),男,博士,讲师,主要研究方向为 P2P 网络、移动自组网、车联网等。

移动网络的通过程较复杂,因此其多宿通信的配置形式存在多样性。文献[8]使用三元组 (x, y, z) 来表示不同的多宿配置方式中移动路由器 MR 的个数、家乡代理 HA 的个数和移动网络前缀 MNP 的个数。这种配置方式的不足在于忽略了 MR 外部接口的个数。在日常应用中,移动网络最常见的多宿形式主要有如下 3 种:(1)像多宿移动主机^[9]那样使移动路由器具备多个外部接口的多接口多宿;(2)在移动网络中设置并同时使用多个移动路由器的多 MR 多宿;(3)上述两种方式并存的混合多宿。其中多接口多宿仅可以解决由于 MR 外部接口失效而导致的可靠性问题,对于 MR 本身失效或其内部接口失效而引起的单点失效问题则必须通过多 MR 多宿来解决^[3]。因此,一个完整的移动网络多宿方案应该同时支持上述 3 种常见的多宿形式,以提高移动网络的可靠性和通信性能。

目前已有的移动网络多宿方案部分侧重于解决多 MR 多宿问题,比如 Huang 等人提出的 SMART 方案^[10]使用 AR 树模型生成一个应用于嵌套移动网络的最佳 MR 选择机制来实现故障恢复和负载均衡。Kuntz 等人在文献^[11]中提出了一种依据路由器的带宽占用比进行默认路由器选择的机制,从多个 MR 选择一个分配给内部节点,用以实现流量分配和负载均衡。但上述两个多 MR 多宿方案的不足在于都没有考虑 MR 具有多个接口时的接口选择问题,且上述两个多宿方案都需要移动网络内部节点参与到路径选择的过程中。

另一部分移动网络多宿方案则侧重于解决多接口多宿问题。例如,Hossain 等人提出了一个基于 MCoA^[9]的多宿方案 M-NEMO^[12],该方案使 MR 为其多个外部接口分别配置不同的转交地址 CoA,并将这些地址向 HA 注册,然后以信号强度作为判断依据来进行接口的选择和切换,从而实现无缝移动。但该方案没有考虑到移动网络中具有多个 MR 时的路由器选择问题,也没有考虑移动网络嵌套和路由优化的情况。Sousa 等人提出的 MeTHODICAL^[13]方案也是一种多接口多宿场景下基于多属性决策的接口选择机制,该方案侧重于研究属性权重的生成算法,但接口的选择仍由网络内部的端节点自行执行。此外,该方案同样没有考虑多 MR 多宿问题。

综上所述,已有的移动网络多宿方案普遍存在如下问题:(1)只考虑了多 MR 或多接口中的一种情况,没有考虑混合场景下的多宿问题;(2)多宿方案需要内部节点的参与,这种对内部节点不透明的特性使得多宿方案原本就存在的不易部署、不易优化的问题^[14]更加严重;(3)没有综合多种接口客观属性和用户主观偏好,因此所选接口并非最佳。

本文针对标准协议中的单 MR 单接口的移动网络存在的可靠性问题和性能瓶颈问题,以及现有移动网络多宿方案存在的上述不足,提出一种多 MR、多接口混合场景下的移动网络多宿方案 MM-NEMO。该方案中所有多宿相关处理工作均由移动网络内的多个 MR 共同负责,无需内部节点的参与,因此对内部节点保持透明。此外,在方案的设计过程中综合考虑了网络接口的常见重要客观属性和用户的主观偏好,使得所提多宿方案尽可能地全面完整,并以此提高移动网络的整体性能。

2 移动网络混合多宿模型

典型的移动网络多宿模型如图 1 所示,其中移动网络 NEMO1 仅有一个移动路由器 MR1,且该路由器仅有一个外部接口 EIF1 接入 Internet。BSP 协议中所描述的移动网络就是 NEMO1 这样的单 MR、单接口的单宿移动网络。

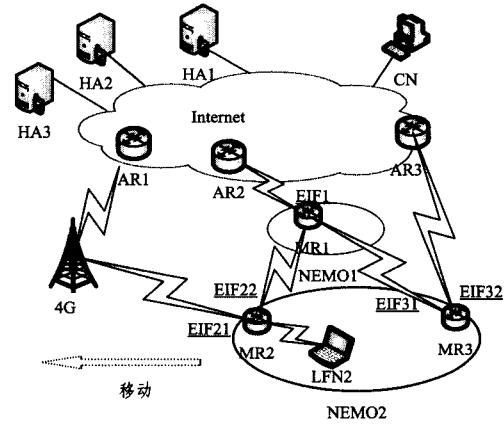


图 1 典型的移动网络多宿模型

在图 1 中,移动网络 NEMO2 具有两个移动路由器 MR2 和 MR3,且各具有两个外部接口。MR2 的一个接口 EIF21 通过 4G 网络基站连接到 AR1 并接入 Internet,其另一个接口 EIF22 则使用 WLAN 技术通过 MR1 间接地接入 Internet,这就形成了移动网络的嵌套结构。路由器 MR3 的一个接口 EIF31 也是以嵌套方式与 NEMO1 相连,而接口 EIF31 则使用 WLAN 技术直接与 AR3 连接。因此 NEMO2 是一个典型的多 MR 多接口混合多宿移动网络。从图 1 可见,移动网络 NEMO2 需要同时解决 MR 选择问题和接口选择问题。

3 移动网络多宿方案 MM-NEMO

为了在移动网络中实现混合多宿,当网络内部节点进行通信时,需要一种机制在所有 MR 的外部接口中选择一个最合适的来进行通信,而接口选择的依据是接口的属性。本文首先分析移动网络中 MR 外部接口的常见重要属性,并提出维护接口属性方法。接着,提出一种基于多播的接口属性交换机制,即通过扩展路由通告消息在各个 MR 之间进行接口属性的交换,以便 MR 根据接口属性和用户主观需求,按照一定的决策算法为内部节点选择最合适的外部接口进行通信。下面将分 3 个部分对本文提出的多 MR 多接口的移动网络多宿方案进行详细分析。

3.1 接口属性的选择与维护

由于网络接入技术的多样性,不同的外部接口会有不同的特点,从而适合不同的应用。比如 WLAN 的带宽较大但信号覆盖范围较小,而 4G 网络则正好相反。对于移动网络还必须考虑其特有的嵌套网络结构问题^[4]。除了接口客观属性外,终端节点或用户可能会提出主观偏好,因此接口的选择将由上述因素共同决定。移动路由器接口常见重要属性主要有以下几种。

(1)实际带宽(Actual Bandwidth, AB):接口当前实际的最大带宽,该属性值由接口所采用的接入技术和信号强度等因素决定。

(2)流量负荷(Flow Load, FL):该属性反映了接口已被占用的带宽。

(3)丢包率(Packet Loss Rate, PR):该属性反映了通信过程中接口的可靠性。

(4)接入时延(Access Delay, AD):该属性反映了从当前接口到 Internet(接入路由器)的最小时延。该属性由接口所采用的接入技术以及当移动网络存在嵌套结构时该接口所处的嵌套层数所决定。

由于每个 MR 会定期在其外部接口收到路由通告 RA 消息,因此 MR 可以在接收消息的过程中获取 AB、FL 和 PR 的属性值。虽然 MR 也可以获取其上层路由器到该接口的链路时延,但当移动网络存在嵌套结构(见图 1)时,MR 就无法获知到达接入路由器的时延。为此,本文通过在 MR 生成的 RA 消息的保留字段中携带时延信息,并通过逐层累加的方式,来传递和获取接入时延属性。MR 在某个外部接口上收到 RA 消息后,首先判断该消息的类型,若是标准协议中定义的 RA 消息,则表明该接口直接与 AR 相连,例如 MR1 的 EIF1 接口。此时 MR1 会接收并处理标准 RA 消息,然后用接收该 RA 消息时在接口上获取的相关属性值更新接口属性列表中 EIF1 所对应的表项,且该接口的接入时延就是链路时延。为了便于下层的 MR2 获取接入时延,MR1 在生成 RA 消息时,需要将接口 EIF1 的接入时延放入 RA 消息中前缀信息选项的 32 位保留字段中,并将该消息向下层传递。MR2 在其 EIF22 接口收到 MR1 通告的 RA 消息后,可使用 RA 消息中保存的接入时延再加上 EIF22 接口所接链路的时延,即可生成接口 EIF22 的接入时延。此后,MR2 也以同样的方式更新接口属性列表并在子网内通告新的 RA 消息。

在获取了各个接口的属性后,为了便于 MR 在收到移动网络内部节点发出的数据流时尽快获取接口属性信息并进行计算和决策,本文通过在每个 MR 上都维护一个接口属性列表的方法,来保存其所获取的外部接口属性值。以图 1 中的 MR2 为例,其接口属性列表的格式如表 1 所列,表中各栏的含义如下:

(1)接口 ID:用于在一个移动网络内唯一标识一个外部接口,接口 ID 是将对应的外部接口的 MAC 地址取 16 位 Hash 值。将该项设置为 16 位是为了便于在邻居发现协议的报文中携带接口 ID。为了便于分析,本文在表 1 中使用接口名称来代替接口 ID。

(2)所属 MR:表示该外部接口所属的 MR。若该接口属于当前 MR,则该项为全 0,即“::”;若该接口属于移动网络内其它 MR,则该项为接口所属 MR 的内部接口的链路本地 IPv6 地址。该地址来源于当前 MR 在内部接口收到的 RA 消息的源地址。

(3)状态:表示接口当前的工作状态。本方案中接口的状态有 3 种:①“在线 on-link”,表示接口正常且与外界有网络连接,用 3 位二进制数 001 来表示;②“无连接 off-link”,表示接口正常但与外界暂无网络连接,用 010 表示;③“失效 failure”,表示该外部接口处于失效状态,用 011 表示。

(4)属性 AB~AD:即上文中定义的 4 个接口属性的数值。各属性可根据实际应用需求使用不同的位数。

表 1 MR2 的接口属性列表

接口 ID	所属 MR	状态	AB(Mbps)	FL(Mbps)	PR	AD(s)
EIF21	::	001	5	1	10 ⁻⁴	1
EIF22	::	001	50	5	10 ⁻³	2
EIF31	MR3	001	40	10	10 ⁻⁴	2
EIF32	MR3	001	40	10	10 ⁻⁴	2

3.2 基于多播的移动路由器间接口属性交换机制

为了使 MR 可以从整个移动网络的所有外部接口中选择最合适的进行通信,每个 MR 除了要在接口属性列表中维护属于自己的接口的属性,还需要一种机制在多个 MR 之间交换各自的接口属性和状态,以便当某个接口属性发生改变(或变化量大于一定阈值)甚至是接口发生故障时,将相关信息通告给其它 MR,从而实现接口信息的分布式存储和动态更新。

在本方案中,每个 MR 除了与标准协议一样需要定期在移动网络内通告包含前缀信息选项的 RA 消息,还需要在其外部接口属性或状态变化时通过组播包含接口属性信息的路由通告消息来向本子网内其它 MR 通告接口的变化情况。为此,本文定义了一种新的路由通告消息选项,即图 2 所示的 TLV 格式的接口信息选项。MR 可以通过其内部接口在子网内组播一个包含接口信息选项的 RA 消息,用以向其它 MR 通告该自身接口的变化信息。

类型(8 位)	长度(8 位)	接口 ID(16 位)
状态和属性(96 位)		

图 2 接口信息选项

为了使包含接口信息选项的 RA 消息能被同一个移动网络内的其它 MR 在内部接口正确接收,同时还能使该消息不被子网内部节点或嵌套在当前子网内的下层 MR 接收,MR 在通告此类 RA 消息时,不再像标准协议那样使用所有路由器的多播地址作为 RA 消息的源地址,而是采用文献[15]定义的多播地址生成机制,将该 MR 所在移动网络的前缀 MNP 映射成唯一的一个多播地址,即按照图 3 所示的基于前缀的 IPv6 多播地址格式生成一个多播地址。

8 位	4 位	4 位	8 位	8 位	64 位	32 位
11111111	标志	范围	保留	前缀长度	网络前缀	多播组 ID

图 3 基于前缀的 IPv6 多播地址格式

仍以图 1 中的移动网络 NEMO2 为例,若该子网的前缀 MNP2 为 68E6:3C64::/64,则按照图 4 的格式生成 NEMO2 的多播地址为 FF32:0040:68E6:3C64::1。由于本方案中每个移动网络仅需一个多播组,因此将 32 位的多播组 ID 设置为 1 即可。子网内任何 MR 启动时都会根据 MNP2 生成上述多播地址,并自动加入该多播组。此后,MR2 和 MR3 之间都会以该多播地址作为包含接口信息选项的 RA 消息的地址,并且 MR2 和 MR3 都会在各自己的内部接口监听并接收以该多播地址为目的地址的 RA 消息,从而实现外部接口的属性和状态的交换。

对于外部接口失效问题,上述方法可使 MR 将接口失效信息通过接口信息选项中的接口状态值通告给其它 MR,以便其它 MR 更新接口属性列表中对对应接口的状态栏,然后采取相应的故障恢复措施。对于 MR 本身失效或 MR 内部接口失效问题,仍以图 1 为例,若 MR3 在一段时间内一直没有在其内部接口监听到由 MR2 发出的任何 RA 消息,则会在内

部接口主动向 MR2 发出一个路由器请求 RS 消息进行探询;若再等待一段时间仍然没有收到 MR3 回复的 RA 消息,则 MR3 会认为 MR2 本身或其内部接口发生故障。此时 MR3 就会将接口属性列表中“所属 MR”一栏为 MR2 的所有接口表项的状态都设置“失效”。当 MR3 在连续进行 3 次上述探询后仍没有收到 MR2 的回复,则会将上述表项删除,并用自己的任意外部接口的转交地址代替 MR2 的上述两个外部接口向家乡代理发送绑定更新。同时,移动网络内以 MR2 为默认路由器的节点也因为没有收到 MR2 的 RA 消息,而根据所接收的 MR3 的 RA 消息将 MR3 设为自己的默认路由器。

因此,本文提出的 MR 之间的接口信息交换机制不但可以进行接口属性的更新,而且还可以用于 MR 间的相互故障检测,对于 MR 的外部接口失效、内部接口失效和 MR 本身失效这 3 种可能引起 MR 单点失效的故障都可以及时发现,从而实现快速故障恢复。

3.3 基于信息熵的多属性决策接口选择算法

通过上述接口属性的维护和交换机制,移动网络中的每个 MR 都能在各自己的接口属性列表中维护当前子网的所有外部接口的状态和属性信息。此后,当 MR 收到该网络内部节点发起的通信后,都应该能根据接口属性列表中状态为“在线”的接口属性信息,以及内部节点可能提供的主观偏好信息,依据一定的算法在所有可用外部接口中选择一个最佳的接口为该数据流提供通信服务,同时 MR 也可以在内部节点没有提供主观偏好信息的情况下只根据接口的客观属性来选择一个最佳接口。为了实现这一目的,本文提出的多宿方案使用了基于信息熵的多属性决策算法(也称为熵值法)来进行接口的选择。熵值法的特点是既可以只根据客观属性信息构成的决策矩阵来计算属性的权重,也可以在提供主观偏好信息的情况下结合主观因素对权重向量进行修正得出综合权重向量^[16]。使用基于信息熵的多属性决策算法进行接口选择的具体步骤如下:

步骤 1 若移动网络内部某个节点发起新的通信,则该节点的默认路由器(即某个 MR)在收到新的数据流后,需要为本次通信选择一个最佳外部接口。若 MR 的接口属性列表中有 n 个状态为“在线”的外部接口,则所有可选方案(即可选外部接口)的集合定义为 $Y=(y_1, y_2, \dots, y_n)$,其中 $y_i(1 \leq i \leq n)$ 为可选方案集合中的任意一个接口。若每个接口都具有 m 个属性,则所有属性的集合为 $A=(a_1, a_2, \dots, a_m)$,其中 $a_j(1 \leq j \leq m)$ 为属性集合中的任意一个属性。

由上述 n 个可选方案和 m 个属性构成的多属性决策矩阵 $X=(x_{ij})_{n \times m}$ 如式(1)所示,矩阵 X 中共有 n 行,表示有 n 个可选方案,且每个方案都有 m 个属性。

$$X=(x_{ij})_{n \times m} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{pmatrix} \quad (1)$$

方案的属性值可以按照其特性分为效益型和成本型。效益型属性是指属性值越大越好的属性,成本型属性是指属性值越小越好的属性。本文中定义的上述属性中,效益型属性有实际带宽 AB ,成本型属性有流量负荷 FL 、丢包率 PR 、接入时延 AD 。为了消除这些属性量纲(即单位)的差异,以及

各属性之间的不可公度性,需要将不同量纲的属性转换成无量纲的标准化属性,这一过程称为决策矩阵的规范化^[17]。具体规范化过程如下。

对于效益型属性,需要按式(2)进行如下形式的变换:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_i x_{ij}}, i \in N \quad (2)$$

对于成本型属性,需要按式(3)进行如下形式的变换:

$$r_{ij} = \frac{\min_i x_{ij}}{x_{ij}}, i \in N \quad (3)$$

通过上述标准变换过程,得到的规范化矩阵如式(4)所示:

$$R=(r_{ij})_{n \times m} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{pmatrix} \quad (4)$$

步骤 2 将规范化矩阵 $R=(r_{ij})_{n \times m}$ 进行归一化处理,得到如式(5)所示的归一化矩阵:

$$\dot{R}=(\dot{r}_{ij})_{n \times m} \quad (5)$$

其中, $\dot{r}_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}}$ 。

由于各个属性的相对重要程度各不相同,多属性决策方法通过定义权重来对各属性的重要性进行度量,并通过加权来综合所有的单个属性的总体优劣程度,因此属性权重的估计是否准确在很大程度上决定了最终决策的准确性。属性的权重往往由主观因素和客观因素这两类因素所决定。我们首先计算属性的客观权重,以满足内部节点不提供主观因素时进行接口选择的需求,然后再考虑终端用户可以提供主观偏好(即主观权重)时,如何综合主观和客观因素生成综合权重并用于接口选择。

熵值法就是利用属性的信息熵来判断某个属性的差异程度。若某个属性 a_j 的信息熵越小,则它在不同方案中的属性值的差异越大,该属性在决策时对方案的总体评价所起作用就越大,所以应该赋予该属性的权重也就越大;反之赋予该属性的权重也就应该越小^[16]。因此可以利用属性的信息熵与其权重的反比关系来根据信息熵计算出各个属性的权重。

步骤 3 根据式(6)计算出属性 u_j 输出的信息熵:

$$E_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n \dot{r}_{ij} \ln \dot{r}_{ij}, j=1, 2, \dots, m \quad (6)$$

其中,常数 $K = \frac{1}{\ln n}$ 是为了使 E_j 处于 $[0, 1]$ 之间。

步骤 4 根据式(7)计算属性权重向量:

$$\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m) \quad (7)$$

其中, $\omega_j = \frac{1-E_j}{\sum_{j=1}^m (1-E_j)}$ 。

步骤 5 利用式(8)计算出各个方案(在本文中也就是可选接口)的综合评价,然后进行排序并作出决策,也就是选择综合评价价值最高接口的接口进行通信。

$$z_i(\omega) = \sum_{j=1}^m r_{ij} \omega_j \quad (8)$$

上面是只根据接口的客观属性进行接口选择的过程,若决策者事先确定的主观权重向量为 $\lambda=(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)^T$,则可

按照式(9)对权重进行修正:

$$\omega_j^0 = \frac{\lambda_j \omega_j}{\sum_{j=1}^m \lambda_j \omega_j} \quad (9)$$

经过上述修正后,即得到权衡了客观因素和主观因素后的综合权重,然后将该权重代入式(8)即可计算出各个接口的综合评价,从而选出最佳接口。

4 MM-NEMO 方案的通信过程

下面以图 1 中同时具有多个 MR 和多个接口的移动网络 NEMO2 为例,分析 MM-NEMO 方案为内部节点 LFN2 提供多宿方式通信的过程。

当子网内部节点 LFN2 向外部发起通信时,报文首先到达其默认路由器 MR2,MR2 可直接根据接口属性列表中的属性信息,按照 3.3 节定义的算法计算出最佳接口。若最佳接口就在 MR2 上,则直接使用该接口进行通信。若最佳接口在 MR3 上,则 MR2 只需向 LFN2 返回一个标准的重定向报文,并将 MR3 的内部接口的 MAC 地址放入重定向报文的选项部分。LFN2 收到重定向报文后,就会用 MR2 的内部接口地址更新自己的目的缓存,并在与当前对端 CN 的后续通信中将报文发往 MR2。MR2 收到 LFN2 发出的报文,则采用与 MR3 相同的方法计算出最佳接口,由于最佳接口就在 MR2 上,因此 MR2 直接使用最佳接口进行通信。移动路由器的内部接口处理流程如图 4 所示。

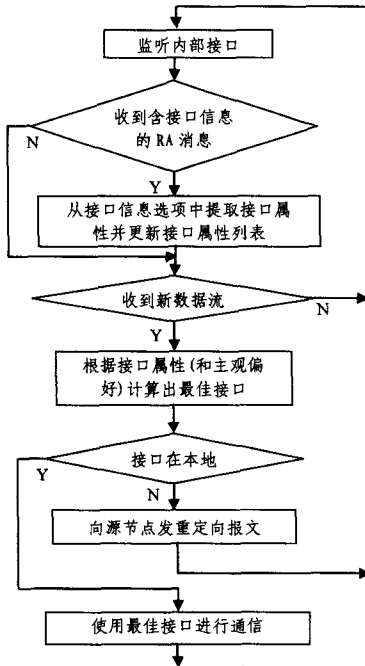


图 4 移动路由器的内部接口处理流程

5 性能分析

5.1 方案特性的分析与对比

为了更全面地体现 MM-NEMO 方案的特点和优势,本文选取了 3 个具有代表性的移动网络方案进行对比和分析。其中,PCS 方案^[11]和 MeTHODICAL 方案^[13]分别是多 MR 多宿方案和多接口多宿方案的最新典型代表。上述方案特性的对比如表 2 所列。

表 2 多宿方案特性比较

方案特性	PCS	MeTHODICAL	MM-NEMO
适用的多宿场景	多 MR	多接口	混合场景
对内部节点是否透明	N	N	Y
综合多种客观属性和主观偏好	N	Y	Y
考虑嵌套和路由优化	N	N	Y
考虑接口属性的动态变化和更新	N	N	Y
同时解决 MR 单点失效的 3 种情况	Y	N	Y

从表 2 可以看出,本文提出的 MM-NEMO 方案可以适用于多 MR 多接口混合多宿场景,当然也可以分别应用于多 MR 和多接口的情况。此外,本方案综合考虑了接口的多种客观属性和用户的主观偏好,也考虑了移动网络特有的嵌套和路由优化问题,因此是一种较为综合的多宿方案。该方案的另一个特点是所有多宿处理工作是由移动网络内的多个 MR 共同负责完成,既无需对内部节点作任何修改,也无需内部节点的参与,所以 MM-NEMO 方案对移动网络内部节点是透明的。此外,正是由于该方案考虑较为全面,因此可以对引起 MR 单点失效的 3 种情况都能及时加以处理,使得该多宿方案具有较高的可靠性。

需要说明的是,虽然每个 MR 都需要用接口属性列表维护所有接口的属性,并且需要根据这些接口属性进行基于多属性决策的接口综合指标的计算,这就需要在 MR 上占用一定的存储空间和计算资源,但由于考虑到一个移动网络的外部接口有限,且计算过程耗时远低于无线链路时延,因此上述这些因素对移动网络的整体通信性能的影响可以忽略。

5.2 仿真实验

为了分析和对比上述 3 种多宿方案的通信性能,本文在 OMNeT++ 平台上进行了仿真实验^[18]。各方案均参照图 1 所示的模型来构建网络拓扑,且各个接口的属性值参见表 1。相关仿真参数设置如表 3 所列。

表 3 仿真参数设置

参数	取值
有线网络端到端平均传播时延	5ms
WLAN 平均链路时延	10ms
4G 网络平均接入时延	100ms
节点的平均处理时延	0.1ms

在仿真过程中,网络内部节点 LFN2 每 10s 向 CN 发出一个占用带宽为 5Mbps 的新数据流,以此来模拟各方案的移动网络通信性能。

首先研究各个多宿方案对通信时延的影响。由于本方案既可以只使用接口的客观属性进行决策,也可以综合端节点的主观需求进行接口选择,比如在线视频会议等实时应用希望通信中端到端时延尽可能最小,因此会提出主观权重向量 $\lambda=(0.1,0.1,0.1,0.7)$ 。以 LFN2 发出的前两个序号分别为 1 和 2 的数据流为例,上述两种对比方案以及 MM-NEMO 方案在不引入和引入主观偏好情况下(分别用 MMNEMO 和 MMNEMO2 表示)的数据报文端到端时延如图 5 所示。

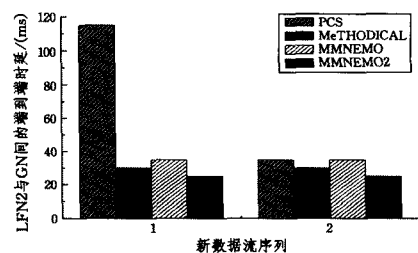
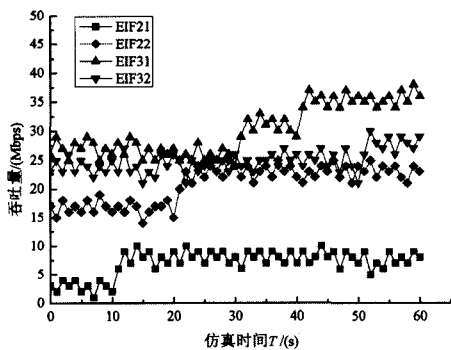


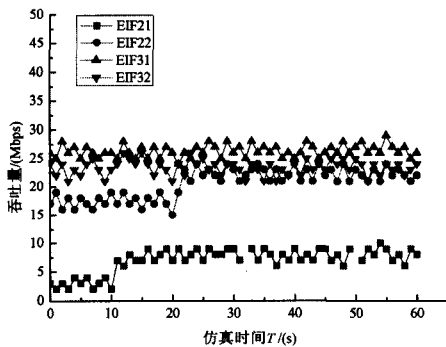
图 5 数据报文端到端时延

从图 5 中可以看出,对于只以 MR 的带宽占用比为唯一选择标准的 PCS 方案,其发出的两个数据流分别选择了接口 EIF21 和 EIF22,因此端到端时延都比较大,这种选择标准的单一性导致多 MR 选择方案 PCS 并不适用于对时延要求较高的通信。而多接口选择方案 MeTHODICAL 虽然也基于多属性决策机制,但是由于 LFN2 只能在其默认路由器 MR2 上进行接口选择,而不能选择其它 MR 上更好的接口,所以该方案所发出的两个新数据流都选择了接口 EIF22。而本文提出的 MM-NEMO 方案则根据子网的所有接口的多种属性来进行选择,LFN2 不提供主观偏好的 MMNEMO 选择了综合性能最优的接口 EIF31,而当 LFN2 提供偏好较低时延的主观权重向量后,MMNEMO2 则在两次通信中都选择了端到端时延最低的 EIF32 接口,这就体现了本方案可以根据用户的主观需求选择最佳接口的优势。

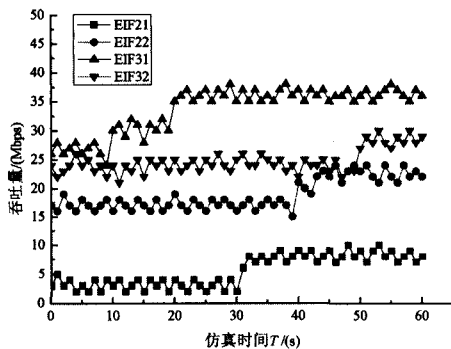
接着,分析 3 种多宿方案对移动网络总体通信性能的影响。当新的数据流不断产生并占用接口带宽时,移动网络 NEMO2 在 3 种不同方案中各个接口的吞吐量如图 6 所示。



(a) PCS 方案中各个接口的吞吐量



(b) MeTHODICAL 方案中各个接口的吞吐量



(c) MM-NEMO 方案中各个接口的吞吐量

图 6 不同方案中各个接口的吞吐量

从图 6(a)可知,PCS 方案首先会以带宽占用比为标准选择 MR2 作为 LFN2 的默认路由器,因此 MR2 的两个内部接

口 EIF21 和 EIF22 首先获取了数据流。当 MR2 的带宽不够时,该方案会按照同样的标准将 MR3 分配给 LFN2,虽然整个移动网络的总吞吐量也不断增加,但流量不能均衡地在各个 MR 间分配。从图 6(b)可知,MeTHODICAL 方案中的 LFN2 虽然能在其接入路由器 MR2 的两个接口上实现基于多属性的流量分配,但该方案没有提供多 MR 选择机制,因此无法有效地利用 MR3 的接口带宽进行通信。从图 6(c)中可以看出,本文提出的 MM-NEMO 方案为内部节点的数据流在子网的所有外部接口上进行基于多属性的接口选择,因此 4 个接口的吞吐量的上升更加均衡,既避免了 PCS 方案中各 MR 间流量分配不均的问题,又避免了 MeTHODICAL 方案只能在一个 MR 上进行接口选择而导致其它 MR 带宽闲置的问题。当时间 $T=60s$ 时,本方案中 4 个接口的总吞吐量与 PCS 相同,并且比 MeTHODICAL 方案高 18%。

综上所述,MM-NEMO 在同时对网络内所有接口进行多属性决策后,既具有较低的端到端时延,又能较为均衡地在网络各接口间进行数据流的分配,提高了移动网络的总带宽。因此该方案能更全面地提升移动网络的整体通信性能。

结束语 本文提出了一种多 MR、多接口混合多宿场景下的移动网络多宿方案 MM-NEMO,该方案根据每个 MR 上存储的所有外部接口的属性,为内部节点发出的数据流使用基于信息熵的多属性决策,以便从整个移动网络中选择一个最佳接口进行通信。因此 MM-NEMO 是一种考虑了多种客观、主观因素,且同时适用于多 MR、多接口和混合多宿 3 种常见场景的移动网络多宿方案,且方案的运行对内部节点保持透明。仿真结果说明,在内部节点提供或不提供主观偏好的情况下,MM-NEMO 方案都能在整个移动网络内选择出最佳接口进行通信,从而使整个移动网络具有较高的总吞吐量。

参考文献

- [1] Perkins C, Johnson D, Arkko J. Mobility Support in IPv6[S]. IETF RFC 6275. 2011
- [2] Devarapalli V, Wakikawa R, Petrescu A, et al. Network Mobility (NEMO) Basic Support Protocol[S]. IETF RFC 3963. 2005
- [3] Choi N, Ryu J, Paik E, et al. A transparent failover mechanism for a mobile network with multiple mobile routers[J]. Communications Letters, IEEE, 2007, 11(7): 604-606
- [4] Ng C, Thubert P, Watari M, et al. Network Mobility Route Optimization Problem Statement[S]. IETF RFC 4888. 2007
- [5] Gladisch A, Daher R, Tavangarian D. Survey on Mobility and Multihoming in Future Internet[J]. Wireless Personal Communications, 2014, 74(1): 45-81
- [6] Liu X, Xiao L. A survey of multihoming technology in stub networks; current research and open issues[J]. Network, IEEE, 2007, 21(3): 32-40
- [7] Abley J, Black B, Gill V. Goals for IPv6 Site-Multihoming Architectures[S]. IETF RFC 3582. 2003
- [8] Ng C, Ernst T, Paik E, et al. Analysis of Multihoming in Network Mobility Support[S]. IETF RFC 4980. 2007
- [9] Devarapalli V, et al. Multiple Care-of Addresses Registration [S]. IETF RFC 5648. 2009
- [10] Huang S, Wu X, Lu Y, et al. SMART: A strengthened model of access router tree for multihoming in nested mobile network[J]. Chinese Journal of Electronics, 2009, 18(1): 125-131
- [11] Kuntz R, Montavont J, Noel T. Multihoming in IPv6 Mobile

Networks; Progress, Challenges, and Solutions[J]. Communications Magazine, IEEE, 2013, 51(1):128-135

- [12] Hossain M S, Atiquzzaman M, Ivancic W. Performance evaluation of multihomed NEMO[C]//2012 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2012; 5429-5433.
- [13] Sousa B, Pentikousis K, Curado M. MeTHODICAL: Towards the next generation of multihomed applications[J]. Computer Networks, 2014, 65: 21-40
- [14] Sousa B M, Pentikousis K, Curado M. Multihoming management for future networks[J]. Mobile Networks and Applications, 2011, 16(4): 505-517

- [15] Boucadair M, Venaas S. Updates to the IPv6 Multicast Addressing Architecture[S]. IETF RFC 7371. 2014
- [16] 杨保安, 张科静. 多目标决策分析理论、方法与应用研究[M]. 上海: 东华大学出版社, 2008
- [17] 徐玖平, 吴巍. 多属性决策的理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006
- [18] OMNeT++ [EB/OL]. <http://www.omnetpp.org>
- [19] 万琳, 范秋灵, 胡海荣. 复杂网络路由策略优化设计[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(11): 103-105
- [20] 荆栋, 肖刚. 网络拓扑发现算法[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学版, 2012, 26(9): 90-95

(上接第 135 页)

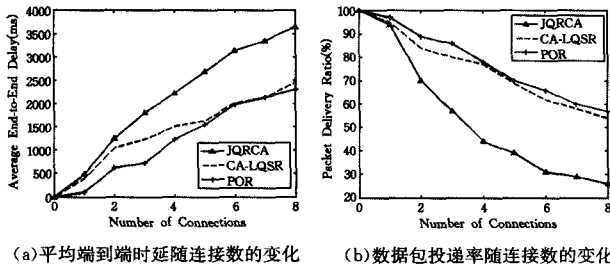


图 6 连接数对通信质量的影响

图 7(a)给出了网络中信道数目对平均端到端时延的影响情况。从图中可以看出,随着信道数目的增加,平均端到端时延越来越小。其中,POR的平均端到端时延始终是最小,这是因为POR在选择路径时依据的就是端到端时延这一指标。在信道数目较多的情况下,POR的平均端到端时延与JQRCA相比,降低了至少37%;与CA-LQSR相比,降低了15%以上。图7(b)显示随着信道数目的增多,数据包投递率呈上升趋势。这是因为网络中信道数目的增多,节点之间可以通信的链路也随之增多,从而提高了数据包成功投递率。

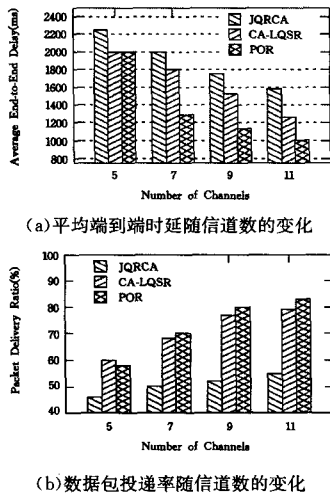


图 7 信道数目对通信质量的影响

结束语 本文提出了一种基于探测的多信道无线网状机会会路由(POR)算法。POR中提出了最佳通信信道集合的概念。节点根据自身受到的干扰能量,将干扰能量小于干扰能量阈值的信道添加到该节点的最佳通信信道集合。节点在进行路由选择时,分布式地寻找和构造端到端时延较小的候选链路集合,然后从中选择链路进行数据传输。最后通过一系列的仿真实验,对其性能进行了全面而详细的分析和评价。实验结果表明,POR可以降低平均端到端时延,提高数据包

投递率,为网络通信提供实时性和可靠性等 QoS 保障。

参考文献

- [1] Akyildiz I F, Wang X. A survey on wireless mesh networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(9): 23-30
- [2] Cicconetti C, Akyildiz I F, Lenzi L. Bandwidth balancing in multi-channel IEEE 802.16 wireless mesh networks[C]//26th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2007). IEEE, 2007: 2108-2116
- [3] Cicconetti C, Akyildiz I F, Lenzi L. FEBA: a bandwidth allocation algorithm for service differentiation in IEEE 802.16 mesh networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), 2009, 17(3): 884-897
- [4] Ning Z, Guo L, Peng Y, et al. Joint scheduling and routing algorithm with load balancing in wireless mesh network[J]. Computers & Electrical Engineering, 2012, 38(3): 533-550
- [5] Ajmal M M, Madani S A, Maqsood T, et al. Coordinated opportunistic routing protocol for wireless mesh networks[J]. Computers & Electrical Engineering, 2013, 39(8): 2442-2453
- [6] Nandiraju N S, Nandiraju D S, Agrawal D P. Multipath routing in wireless mesh networks[C]//IEEE international conference on Mobile adhoc and sensor systems (MASS), 2006. IEEE, 2006: 741-746
- [7] Tam W H, Tseng Y C. Joint Multi-Channel Link Layer and Multi-Path Routing Design for Wireless Mesh Networks[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM. IEEE, 2007: 2081-2089
- [8] Mohsenian-Rad A H, Wong V W S. Joint logical topology design, interface assignment, channel allocation, and routing for multi-channel wireless mesh networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(12): 4432-4440
- [9] Gardellin V, Das S K, Lenzi L, et al. G-PaMeLA: A divide-and-conquer approach for joint channel assignment and routing in multi-radio multi-channel wireless mesh networks[J]. Journal of parallel and distributed computing, 2011, 71(3): 381-396
- [10] Bakhshi B, Khorsandi S, Capone A. On-line joint QoS routing and channel assignment in multi-channel multi-radio wireless mesh networks[J]. Computer Communications, 2011, 34(11): 1342-1360
- [11] Yuan F, Li X, Liu K, et al. Distributed channel assignment combined with routing over multi-radio multi-channel wireless mesh networks[J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2012, 19(4): 6-13
- [12] Holland G, Vaidya N, Bahl P. A rate-adaptive MAC protocol for multi-hop wireless networks[C]//Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. ACM, 2001: 236-251