

移动 IPv6 协议中移动节点的可执行测试序列生成方法研究

李 华 叶新铭 刘 静 刘 龙

(内蒙古大学计算机学院 呼和浩特 010021)

摘 要 移动 IPv6 可以为主机移动提供便利,使得它可以以一个永久的 IPv6 地址连接到任何链路上。对于它的测试研究可以保证协议的实现与说明的一致性。在移动 IPv6 中共有移动节点、家乡代理以及对端节点 3 个角色。分析了移动节点的控制流模型以及它的基于控制流的测试序列,基于该序列重构并形成了扩展有限状态机,其中考虑加入数据流,构建了可执行的测试序列,然后基于可执行测试序列提取了测试例,此方法可以减缓甚至避免爆炸问题。通过测试实践展示了本方法的有效性,最后给出了结论。

关键词 移动 IPv6,移动节点,一致性测试,可执行测试序列

中图法分类号 TP393.06 **文献标识码** A

Research on Executable Test Sequence Generation of Mobile Node of Mobile IPv6

LI Hua YE Xin-ming LIU Jing LIU Long

(School of Computer Science, Neimongol University, Hohhot 010021, China)

Abstract Mobile IPv6 can offer convenient for host and make it connected to any link by a permanent IPv6 address. The conformance testing can guarantee the consistence between the specification and its implementation. In Mobile IPv6, there are three roles, mobile node, home agent, correspondence node. In this paper, the control flow model of mobile node was analyzed and the part test sequences were generated. An EFSM(Extended Finite State Machine) was re-constructed from FSM by consideration of addition of data flow and the executable test sequences were generated at the same time. This method can reduce or avoid state exploding. Some test case obtained from an executable test sequence was performed to display the validity of the method. The conclusion and the research work in the future were introduced.

Keywords Mobile IPv6, Mobile node, Conformance testing, Executable test sequence

1 引言

目前因特网已经为人们生活与工作带来了很多的便利,使得人们希望可以在任何地方将自己的计算机连到网上,即不改变自己的 IPv6 地址而可以在世界的任何地方连入因特网,于是 IETF 提出了支持 IPv6 移动的协议 MIPv6^[1]。但是对于该协议的测试研究工作并不多,MIPv6 的特点是该协议的 RFC 并没有提供形式描述模型,例如有限状态机,并且它的协议说明是以节点所处的角色进行描述的,导致关于它的建模方法以及相关的可执行测试序列的生成方法需要重新进行考虑。目前协议描述的发展趋势是没有状态机描述,一般协议的头部变得简单,易自动处理(如 IPv6),但是为了给实现者更灵活的功能扩展,扩展头部增多,选项增多,导致测试组包琐碎,自动化程度降低。

本文基于移动节点的状态机模型对可执行测试序列的推导方法进行研究。第 2 节介绍相关工作;第 3 节介绍一种新

的 MIPv6 的可执行测试序列的生成方法;第 4 节为测试实践介绍;最后是结论。

2 相关工作比较

关于测试序列的产生方法有很多,可以分为基于控制流的、基于数据流的以及基于二者相结合的方法。基于协议说明产生对应的形式模型如有限状态机(Finite State Machine, FSM)^[2]、Petri Net^[3]等,然后基于某种控制流覆盖标准^[2,3]生成测试序列和测试路径;还有一些文章的研究考虑到基于控制流的测试路径不能反映协议的数据特征,所以直接基于 EFSM 或 Petri Net 的可达图^[4]根据某一数据流标准^[5]产生测试序列。而基于控制流和数据流相结合的方法考虑到测试序列的可执行问题,产生的测试序列也对于控制与数据部分而言都是可执行的,关于这方面已有文章加以研究^[5-7]。

目前关于 MIPv6 的一致性测试研究^[8-10]中,张玉军等人基于协议中的角色进行了建模研究,该方法的优点为建模是

到稿日期:2008-11-14 返修日期:2009-08-19 本文受国家自然科学基金项目(60863015),内蒙古自然科学基金重点项目(200711020803, 20080404ZD20),内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJ09012)资助。

李 华 教授,硕士生导师,CCF 会员,主要研究方向为分布式系统与网络计算,E-mail: cslhua@rocket. imu. edu. cn;叶新铭 教授,博士生导师,主要研究方向为计算机网络和分布式系统;刘 静(1978-),女,硕士,主要研究方向为计算机网络协议测试;刘 龙(1981-),男,硕士研究生,主要研究方向为计算机网络协议测试。

从协议说明的局部出发进行的,减小了建模工作的复杂性,缺点是没有考虑测试序列的可执行性,因此建模之后到真正的可执行测试序列的生成全部变为手工生成,降低了测试的自动化过程^[8]。施新刚等人分析了 MIPv6 一致性测试需求,采用 FSM 建立协议的行为模型,基于该模型利用 ADS(Adaptive Distinguish Sequence)进行测试序列的自动生成,最后手工完善得到最终测试例。从算法流程图可以看出其测试序列的生成只考虑了控制流而没有考虑数据流,即没有考虑测试序列的可执行性,因此后续手工生成可执行测试序列以及测试例的工作量仍会很大^[9]。赵达观等人从 HA(Home Agent, 家乡代理)的角度讨论一致性测试集的生成,首先对 HA 进行状态机建模,简单分析了状态机所描述的行为,并进行了测试实践,文中虽然在分析协议行为时考虑了数据,但是没有给出具体的测试序列的生成方法,特别是可执行测试序列,使得方法的使用与推广都有一定的局限性^[10]。

本文以 MIPv6 协议的移动节点(Mobile Node, MN)为例进行测试建模分析以及可执行测试序列的生成方法探讨。通过对测试序列加数据进行细化得到可执行测试序列,其优点是易于该序列很容易生成可执行测试例并且是符合控制流和数据流覆盖标准的测试例。

3 移动节点的可执行测试序列生成

3.1 移动节点的形式模型

根据 MIPv6 的 RFC3775,可以对于 MIPv6 基于角色进行建模,在 MIPv6 中,其模型可以分为移动节点、通信节点以及家乡代理三个角色。有限状态机模型的概念如下。

定义 1(有限状态机, FSM) 有限状态机 M 是一个五元组 (S, s_0, I, O, T) , 其中, S 表示状态集; s_0 表示初始状态, $s_0 \in S$; I, O 分别表示输入、输出集合, 输出空用 ϵ 表示; T 表示变迁的集合, T 中每个变迁 t 可以表示为 $(s, s', x/y)$, $s \in S$ 为变迁的初状态, $s' \in S$ 为变迁的末状态, x/y 为实现变迁的输入/输出, $x \in I, y \in O$ 。

移动节点是在 MIPv6 中最活跃的一个角色,它可以在网络上进行移动,但是其 IPv6 地址固定,在 MIPv6 的 RFC 中并没有给出形式模型描述,因此对于它的测试研究首先需要建模,已有文献对于它进行了建模方面的探索,得到的形式模型如图 1 所示^[8]。

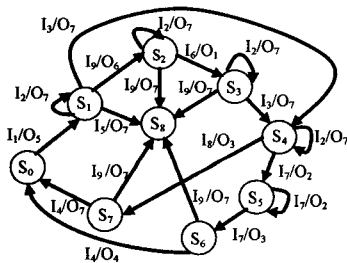


图 1 移动节点的状态机

3.2 基于数据流考虑的建模方法

在常规的测试生成研究方法中,一般基于控制流模型加数据,其优点是直接利用控制流模型,缺点是较早带来状态爆炸问题,因为就控制流而言,它几乎囊括了协议中所有的重要行为,因此抽象性较高,当引入数据,特别是基于数据包的字段进行考虑时,它的规模的增长会非常快。因此本文在基于

有限状态机所产生的抽象测试序列的基础上引入数据流,依据协议一致性测试的数据流选择标准^[12]来生成移动节点的一致性测试的可执行测试序列,减弱甚至消除状态爆炸。

定义 2 变量在 EFSM 中的出现只有两种情况:变量的定义和变量的使用。

(1)变量的定义:如果变量 x 的定义出现在转换 t 中,则称转换 t 有一个变量 x 的定义,用 $DEF(x)$ 表示。

(2)变量的使用情况比较多,分为输出使用、谓词使用和计算使用,用 $USE(x)$ 表示^[12]。

对得到的这些测试序列中每个序列包含的输入事件,根据协议描述,分析数据包的语法格式,得出每个数据包有哪些字段,这些字段相当于变量,有定义域和条件,按照字段的定义域和条件选取测试目的取值。选取的一般规则是,选取定义域内的典型数据和定义域外部的值,作为测试目的的取值,选取测试序列中所有满足数据定义域条件的序列作为测试序列。在实际情况下,如果没有条件限制,则认为条件为永真。

例如,基于图 1,可以得到多条测试序列^[8],例如 $TS_1 = S_0 I_1 O_5 S_1 I_2 O_7 S_1 I_5 O_7 S_8$ 和 $TS_7 = S_0 I_1 O_5 S_1 I_2 O_7 S_1 I_3 O_7 S_1 I_2 O_7 S_1 I_7 O_2 S_7 I_7 O_2 S_5 I_8 O_3 S_5 I_4 O_3 S_0$ 是移动节点的两条抽象测试序列。采用在该序列的状态机上引入数据流的方法细化构成一个扩展有限状态机(EFSM),假设状态机中的自环仅执行一次,引入数据后的扩展有限状态机如图 2 所示。

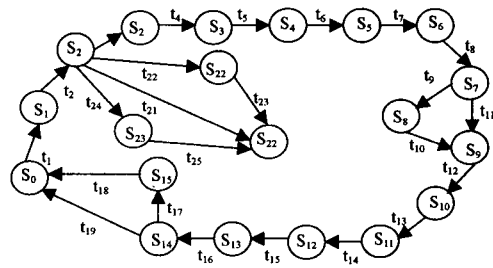


图 2 移动节点的 EFSM

定义 3 一个扩展有限状态机 M 是一个五元组 (S, s_0, Σ, X, T) 。其中, S 是状态的有限集合; $s_0 \in S$ 是初始状态; Σ 是有限的字符表; $X = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ 是一个向量,表示一个变量的有限集合; T : 变迁集合,对于 T 中任意一个元素 $t, t = \langle s, i, P, A, s' \rangle$ 。其中 s 是变迁的起始状态, I 是输入, P 是变迁的条件(它是由 X 中的变量或者常数参与的逻辑表达式), A 是变迁的动作(它是 X 中的变量或者常数参与的,对 X 中的变量的赋值语句集合), s' 是变迁的到达状态。

当 M 处于某一个状态 s 的时候,收到一个输入 i ,如果存在一个 $t \in T$ 与 s, i 对应,并且使 P 的值为真,则 M 执行 A 中的动作并移到状态 s' 。

在图 2 中,变迁表示了移动节点运行中的输入、输出信息以及条件判断。表 1 和表 2 对图 2 中部分变量的定义和使用情况进行了说明。

表 1 一些变量的定义和使用情况

活动	变量 x	变量 z	变量 v	变量 w	变量 m	变量 a
t1	DEF					
t2	USE	DEF	DEF	DEF	DEF	
t3		USE				
t21		USE				

t22	USE	USE	
t24			USE
t8			DEF
t9			USE
t11			USE

表 2 一些变量的说明

活动	变量定义及使用说明	变量注解
t1	x	家乡注册时绑定更新消息中的序列号
t2	y = x	绑定确认消息中的序列号等于绑定更新消息中的序列号
t3	TRUE(z)	判断绑定确认消息中的校验和正确
t21	FALSE(z)	判断绑定确认消息中的校验和不正确
t22	FALSE(v) TRUE(w! = 59)	绑定确认消息中的头长度错误或者负载协议类型不是 59
t24	FALSE(m)	绑定确认消息中的移动报头类型错误
t8	a	一般注册时绑定更新消息中的确认位
t9	TRUE(a == 1)	一般注册时绑定更新消息中的确认位为 1, 需返回绑定确认消息
t11	TRUE(a == 0)	一般注册时绑定更新消息中的确认位为 0, 不需返回绑定确认消息

在 MIPv6 协议中, 移动节点运行过程的数据包的典型格式如图 2 所示。我们对每个数据包的典型字段进行了详细分析。不同的字段有不同的取值类型、取值范围, 通过具有代表性的取值, 根据 all-du-paths 覆盖标准^[11]来生成可执行测试序列。

根据所选取的数据流标准, 生成的每一条测试序列都是一条路径, 所以测试序列除了包括被测活动的 du-path 序列以及验证尾状态的 UIO 序列外, 还需加入前导序列和后续序列, 使测试序列成为状态图的一条可执行的测试序列。表 3 为基于图 1 的所有抽象测试序列生成的可执行测试序列。

表 3 移动节点的可执行测试序列

可执行前导序列	Du-path	UIO 序列	可执行测试序列
Null	t1, t2	t3	t1, t2, t3
t1	t2, t3	t4	t1, t2, t3, t4
t1	t2, t21	r	t1, t2, t21, r
t1	t2, t22	t23	t1, t2, t22, t23
t1	t2, t24	t25	t1, t2, t24, t25
t1, t2, t3, t4, t5, t6, t7	t8, t9	t10	t1, t2, t3, t4, t5, t6, t7, t8, t9, t10
t1, t2, t3, t4, t5, t6, t7	t8, t11	t12	t1, t2, t3, t4, t5, t6, t7, t8, t11, t12

由于本方法采用了分而治之的策略去生成可执行测试序列, 因此得到的图规模要简约, 易于分析并可进行可执行测试序列的生成。

4 测试实践

在测试过程中, 需要构建 MIPv6 数据报, MIPv6 的包格式如图 3 所示。

Payload Proto	Header Len	MH Type	Reserved
Checksum			
Message		Data	

图 3 移动报头的结构

图 3 中每个字段的含义如下:

有效载荷协议(Payload Proto): 8bit, 规范规定的域值是 IPPROTO_NONE(59)

报头长度(Header Len): 8bit 整数, 表示 MH 的长度, 单位为 8 字节, 不含第一个 8 字节。

MH 类型(MH Type): 8bit, 识别特定的移动报文。不可识别的 MH 类型值会引起错误的发送。

保留段(Reserved): 8bit, 保留为将来使用。发送者初始化为 0, 接收者忽略。

校验和(Checksum): 16bit, 无符号整数, 移动头的校验和。

消息数据(Message Data): 长度可变, 应为 8-octet 的整数倍, 包含 MH 的特定数据。

MH 的对齐要求与 IPv6 头的一样, 也就是说, 它们必须对齐到 8-octet。

通过对可执行测试序列的分析, 可以提取出抽象测试例, 抽象测试例经过编译, 即生成可执行的代码^[12], 图 4 所示的是测试例 TestCase MIPv6_MN_TC-2_BU 的执行结果, 此测试例中由 TriSend 操作负责发送的消息就是移动 IPv6 协议数据包, 该数据包是移动节点从家乡链路移到外地链路后给家乡代理发送的绑定更新消息, 数据包解码后内容为 3b010500b7310000c00009c401020000, Mobile Header 域的值为 5, Acknowledge 域的值为 1, 分别用数组 string[0]和 string[1]表示这两个域。显然此测试例的运行结果判定为 pass。表 3 给出部分移动 IPv6 协议一致性测试报告。

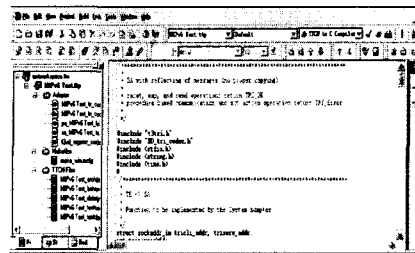


图 4 测试例执行结果示例

表 3 部分移动 IPv6 协议一致性测试报告

测试例标号	测试例名称	结果标注
TC_1_12	Unrecognized MH Type value	PASS
TC_2_3	Valid Binding Update(A=1)	PASS
TC_2_4	Processing Mobility Headers _ Payload Proto	FAIL The Payload Proto field Must be 59. Otherwise, the MRMust discard the message and send ICMP with code 0
TC_2_12	Processing Mobility Header_Len	FAIL The checksum Must be verified as per Section 6.1 of RFC 3775. Otherwise, the MRMust send ICMP with code 0

结束语 在协议测试过程中, 测试序列的推导一直是研究的焦点。特别是可执行测试序列的推导更是因为它可用于指导可执行测试例的生成而备受关注, 因此对它的研究一直是测试研究的重点。本文以移动 IPv6 中的移动节点为例, 基于已有的控制流模型进行分析, 从测试序列角度出发结合考虑数据流而进行了可执行测试序列的推导, 采用测试实践展示了本文方法的有效性。下一步的研究将探索基于角色的测试方法, 提高测试覆盖率。

参考文献

[1] Johnson D. RFC 3775, Mobility Support in IPv6. June 2004

- [2] Lee D, Yannakakis M. Principles and methods of testing finite state machines-a survey [C] // Proceedings of The IEEE 84. 1996;1090-1123
- [3] 李华,叶新铭. 基于 Petri 网的测试路径选择标准[J]. 内蒙古大学学报:自然科学版,2007,38(1):88-93
- [4] Li hua, Ye Xinming. Generating Executable Test Sequences Based on Petri-net for Combined Control and Data Flow of Communication Protocol [C] // ICCT'98 International Conference. 1998
- [5] Parrish A S, Zweben S H. On the Relationships Among the Alluses, All-DU-Paths, and All-Edges Testing Criteria [J]. IEEE Transaction on Software Engineering, 1995, 21(12)
- [6] Chen W H. Executable test sequence for the protocol control and data portions [C] // Proc. of IEEE Int'l Conference on Communications. New Orleans, U. S. A. , 2000
- [7] Miller R E, Paul S. Generating Conformance Test Sequences for Combined Control and Data Flow of Communication Protocols [C] // Proceeding of Protocol Specifications, Testing and Verification (PSTV'92). Florida, USA, June 1992
- [8] 张玉军,李忠诚. 移动 IPv6 测试中的层次化协议描述和测试生成方法[J]. 电子学报, 2004, 32(12A): 30-34
- [9] 施新刚,尹霞. 移动 IPv6 协议一致性测试研究与实践[J]. 计算机工程, 2007, 33(11), 116-118
- [10] 赵达观,谢高岗,张大方. Mobile IPv6 Home Agent 协议一致性测试集的设计与实现
- [11] Hang Y S, Ural H U. Dependence Testing; Extending Data Flow Testing with Control Dependence [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, Volume 3502, 2005
- [12] 刘静. 基于 TTCN-3 的移动 IPv6 协议一致性测试研究[D]. 呼和浩特:内蒙古大学, 2008

(上接第 105 页)

时间演化的情况。

图 3 中显示度值较高的两个节点集平均度随时间缓慢下降,这与图 1 及图 2 的情形类似,即高度值的节点随网络整体度值的下降,自身度值也在下降。图中二者变化曲线的形状十分接近,与图 1 相比也很类似,这说明网络中平均度值的下降主要是由于高度值节点的度值下降所致。

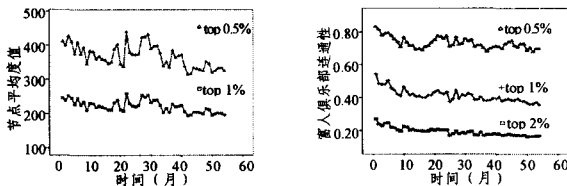


图 3 高度值节点平均度随时间的统计变化图 图 4 富人俱乐部连通性随时间的统计变化图

网络中存在度值较高的“富”节点,富人俱乐部性质体现了其相互之间具有很大的连接倾向性,富人俱乐部连通性则对该性质做了量化度量;其值越大,“富”节点间的联系越紧密。考察 AS 网络中度值最大的 0.5%, 1% 以及 2% “富”节点集,图 4 给出其各自富人俱乐部连通性的演化趋势。三个节点集的连通性均随时间变化有所下降,且下降趋势基本一致,说明该现象是受到同一因素影响所致。

富人俱乐部性质主要是由高度值节点间的连接倾向形成的,其连通性下降说明此类节点间的连接逐渐减少,结合图 3 所示结论可知,高度值节点集合整体平均度值下降,同时伴随着集合内连接的减少。依文献[9]所述,网络中低度值节点的邻居大部分是高度值节点,而高度值节点表现出紧密连接的富人俱乐部性质,这使得低度值节点的局部聚集系数很高,从而提高了整个网络的聚集系数。

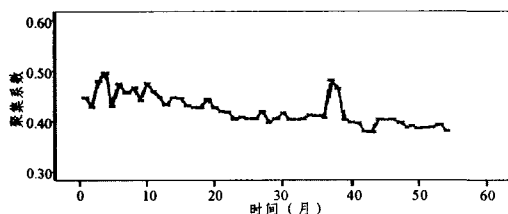


图 5 聚集系数随时间的统计变化图

随着高度值“富”节点间连接的减少,富人俱乐部连通性降低,网络的聚集系数也应有所下降。图 5 给出聚集系数随时间的变化情况,可见其下降趋势十分明显,验证了之前的分析。

连通性分析表明,AS 网络中高度值节点之间的连接在逐渐减少,并由此导致了网络中无论是“富”节点之间还是普通邻居节点之间的连通性均有所下降,但网络整体仍表现出明显的富人俱乐部性质与聚集性。

结束语 通过对 AS 级 Internet 拓扑特征量的演化分析发现,度值大节点对于其它节点的影响力在下降,也可以说节点间连接能力的差距呈减小趋势。与此同时,网络中度值大节点之间以及普通邻居节点之间的连通性也有所下降。

参考文献

- [1] Willinger W, Doyle J. Robustness and the Internet: Design and evolution [EB/OL]. <http://netlab.caltech.edu/Internet/>, 2002
- [2] Li J, Sung M, Xu J, et al. Large-scale IP traceback in high-speed Internet; practical techniques and theoretical foundation [C] // Proceedings of the IEEE Symposium on Security and Privacy. California, USA, 2004
- [3] Subramanian L, Padmanabhan V N, Katz R H. Geographic properties of Internet routing [C] // Proceedings of the USENIX Annual Technical Conference. 2002
- [4] Akella A, Seshan S, Balakrishnan H. The impact of false sharing on shared congestion management [C] // Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Network Protocols, 2003
- [5] Jose M, Barcelo, Juan I, et al. Study of Internet autonomous system interconnectivity from BGP routing tables [J]. Computer Networks; The International Journal of Computer and Telecommunications Networking, 2004, 45(3): 333-344
- [6] 王大东,王洪军,王瑞军,等. 一种基于 AS 的 Internet 拓扑模型 [J]. 计算机工程, 2005, 31(4): 23-25
- [7] West D B. 图论导引 [M]. 北京:机械工业出版社, 2006: 1-47, 339-348
- [8] Munkress J R. 拓扑学 [M]. 北京:机械工业出版社, 2006: 2-52
- [9] 张国强,张国清. Internet 网络的关联性研究 [J]. 软件学报, 2006, 17(3): 490-497