适用于 LoWPAN 的域间软切换移动 IPv6 协议

胡 峥，朱艺华

（浙江工业大学计算机科学与技术学院，杭州 310023）

摘要：提出一种适用于低功耗无线个域网（low-power wireless personal area network，LoWPAN）的域间软切换移动 IPv6 协议，以克服目前一些移动 IP 存在的缺陷：当移动节点（mobile node，MN）在 2 个移动锚点（mobile anchor points，MAPs）之间切换后，在新的 MAPs 完成对端注册前，MN 在线转交地址的改变造成 MN 与对端节点（correspondent node，CN）的通信中断。研究通过引入新的移动性选项，使 MAPs 及时发现 CN 的存在并完成对端注册，从而实现 MAPs 之间的软切换，降低了 MN 通信失败的概率。

关键词：计算机网络；移动性管理；软切换；移动 IP；物联网；低功耗无线个域网

中图分类号：TP393 **文献标识码**：A **文章编号**：1674-2850(2014)16-1626-07

Mobile IPv6 protocol with soft inter-domain handover for LoWPAN

HU Zheng，ZHU Yihua

(*School of Computer Science and Technology*，*Zhejiang University of Technology*，*Hangzhou* 310023，*China*)

Abstract：In this paper，a mobile IPv6 protocol with soft inter-domain handover，which is suitable for low-power wireless personal area network (LoWPAN) is presented. The proposed protocol is able to overcome the drawback in the existing MIPv6 protocols，i. e.，the communications between a mobile node (MN) and its correspondent node (CN) may be interrupted due to the fact that the MN's on-line care-of address changes before correspondent registration process is completed when the handover between mobile anchor points (MAPs) occurs. In this paper，a new mobility option is introduced for mobility signalings so that MAPs can discover the existence of CNs and complete the correspondent registration in time，which enables soft handover between MAPs and reduces the failure probability of the communications between the CN and the MN.

Key words：computer network；mobility management；soft handover；mobile IP；Internet of things；low-power wireless personal area network

0 引言

IEEE 针对 LoWPAN 制定了 IEEE 802.15.4 标准[1]，规定了其物理层和介质访问控制层（media access control，MAC）的标准，旨在为不同设备之间的短距离低速互连提供统一标准。基于 IEEE 802.15.4 标准的 LoWPAN 设备是物联网感知层的重要组成部分，为使其能与 Internet 节点通信，互联网工程任务组（Internet Engineering Task Force，IETF）在 RFC 4944[2]中提出了 6LoWPAN 协议，使得在 LoWPAN 中可以传输 IPv6 数据包。

在 LoWPAN 的一些应用（如实时监测网络[3~4]）中，由于一些节点是可移动的，所以需要对节点进行移动性管理，使 MN 在移动过程中保持通信连续性。目前，已有的国际著名移动 IPv6 协议有 MIPv6[5]，HMIPv6[6]和 FMIPv6[7].

基金项目：高等学校博士学科点专项科研基金（20123317110002）

作者简介：胡峥（1988—），男，硕士研究生，主要研究方向：移动 IP 协议

通信联系人：朱艺华，教授，主要研究方向：无线网络、物联网等. E-mail：yhzhu@zjut.edu.cn

根据 RFC 4919[8]，在 LoWPAN 网络中，物理层所能携带的 MAC 帧最大长度为 127 字节。除去 MAC 帧头部 25 字节以及链路层安全协议所需的多达 21 字节的开销，可用于携带网络层及其上层协议数据的负载只剩下 81 字节。在上述主流移动 IP 协议中，移动性管理的信令数据包长度大于 81 字节。因此，这些协议的移动性信令因长度太大而被分片在 LoWPAN 中传递，这导致较大的信令丢包概率和传递时延。换言之，现有的主流移动 IPv6 协议无法在 LoWPAN 网络上高效运行。因此，笔者提出了 WoMIPv6 协议[9]，其采用数据包头部压缩技术，将 MN 涉及的本地注册信令压缩到 60 字节以内，从而可以放在一个单独 LoWPAN 的 MAC 帧内传递，减少了 MN 及其他网络实体在本地注册过程中的通信开销，且减小了信令包丢失的概率。

然而，与当今一些主流的 MIPv6 协议一样，WoMIPv6 协议也存在以下缺陷：当 MN 在 2 个 MAPs 之间切换，即域间切换（inter-domain handover）时，由于新的 MAP 无法及时获得通信 CN 的信息，因此，不能及时代理 MN 完成对端注册。此时，MN 可能继续移动而导致与 CN 通信中断。这里致力于解决这一问题，主要工作与创新体现在：1）引入新的移动性选项（mobility option），使 MAPs 在域间切换出现后能够立即获得通信对端的信息，从而克服上述通信中断情况的出现，实现域间软切换；2）推导了 MN 在切换期间与 CN 的通信失败概率，通过分析获悉：在数据移动比（即节点每移动经过一个 LoWPAN 时发送给 CN 的数据包个数）大于 2 时，通信失败概率可以降低到 0.1 以下，而且在数据移动比大于 10 时，通信失败概率可以降低到 0.01 以下。

1 域间软切换移动 IPv6 协议

以图 1[9]为例，说明所研究的域间软切换移动 IPv6 协议。图 1 中，每个接入路由器（access router，AR）形成一个 LoWPAN 子网，每个子网拥有不同的个域网标识（PAN-ID）；MAP 由网关担任，同一个 MAP 所包含的 AR 总覆盖区构成一个域（domain）；MN 与 AR 单跳连接。当 MN 从 PAN11 经过 PAN12 移动到 PAN21 时，从 PAN11 移动到 PAN12 所发生的切换称为域内切换（intra-domain handover），从 PAN12 移动到 PAN21 所发生的切换称为域间切换。图 1 省略了归属代理（home agent，HA）和 CN.

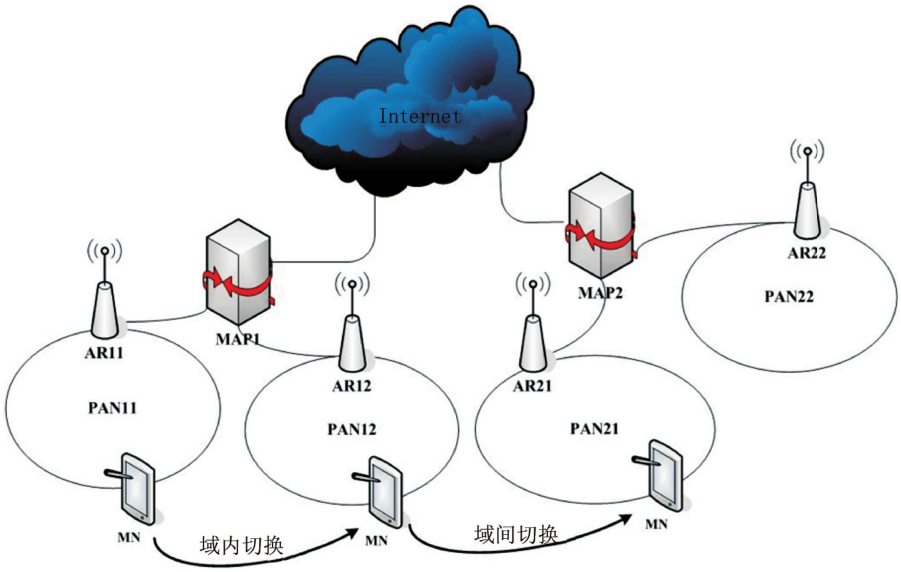

图 1 网络结构[9]
Fig. 1 Network topology[9]

1.1 切换过程

研究的域间软切换移动 IPv6 协议（以下简称“软切换协议”）是通过在之前提出的 WoMIPv6 协议[9]之上引入移动性选项“CN address”（参见下一节）获得。在“软切换协议”中，MN 的域间切换过程分为 2 类：离开归属域进入外埠域的域间切换和在 2 个外埠域之间的域间切换。

当 MN 离开归属域进入外埠域时，域间切换过程如图 2 所示[9]。图 2 中操作顺序按自上而下进行。MN 发给 AR 的关联请求中含有 MN 的归属网络前缀和归属代理地址；AR 转发给 MAP 的关联请求中含 MN 的归属地址和归属代理地址。由于这 2 个关联请求所含内容不同，故在图 2 中，MN 发送的关联请求用 A-Req 表示，而 AR 转发的关联请求用 A-Req* 表示。类似地，MN 与 AR 间交换的本地绑定更新和本地绑定确认不具有完整的区域转交地址，用 L-BU 和 L-BA 表示，而 AR 转发的本地绑定更新和本地绑定确认具有完整的区域转交地址，用 L-BU* 和 L-BA* 表示。

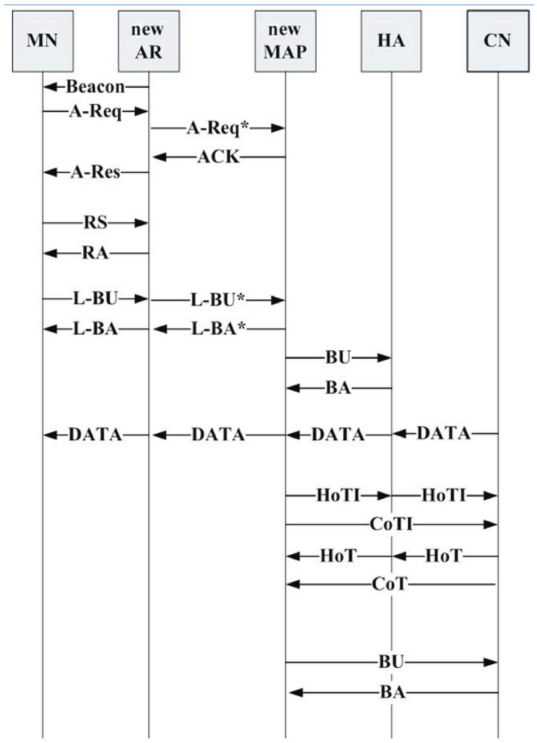

图 2 MN 移出归属网络时 HA 与 MAP 之间的切换[9]
Fig. 2 Handover between HA and MAP when the MN moves out of the home network[9]

图 2 的具体操作流程如下：

1）MN 根据 AR 的信标帧（Beacon）携带的 PAN-ID 判断自己是否发生 PAN 间移动。

2）MN 在发送的关联请求中携带自己的归属信息（归属网络前缀和归属代理地址），AR 在完成对关联请求的相关改动后将其转交给 MAP.

3）MAP 在成功收到 MN 的归属信息后，回复 ACK 同意关联请求，AR 发送关联回应（association response，A-Res）。

4）MAP 利用绑定缓存判断 MN 是否发生域间移动，并准备代表 MN 发送绑定更新做归属注册。

5）根据 RFC 6775[10]，MN 发送路由器请求以请求 AR 发送路由器公告。

6）MN 接收由 AR 单播发送的被请求的路由器公告后，利用路由器公告中包含的前缀信息配置区域转交地址和在线转交地址。

7）MN 进行本地注册，发送本地绑定更新给 AR. AR 对其做相关处理后将本地绑定更新转交给 MAP. 而对于 MAP 回应的本地绑定确认，在 AR 做相关处理后将其转交给 MN 以完成本地注册过程。

8）若本地注册成功，且 MAP 在第 4）步中已判断出 MN 确实发生了域间切换，则 MAP 代理 MN 进行归属注册，其注册的是 MN 归属地址和区域转交地址的绑定，并接收相应的绑定确认。

9）MAP 转发 MN 与 CN 之间的数据包有 2 种情况：① 当 MN 有数据包发往域外时，MAP 在转发前记录该隧道数据包内层头部的目的地址，并在绑定更新列表上检查该地址是否已经在 CN 注册。若是，则直接转发数据包给 CN；否则，先代表 MN 与 CN 进行返回可路由过程并完成对端注册，之后再将数据包转发给 CN. ② 当域外有数据包发往 MN 而被 MAP 拦截时，MAP 记录下该数据包的源地址后将数据包转给 MN，再利用绑定更新列表检查所记录的地址是否已进行对端注册，若否，则代表 MN 与该 CN 进行返回可路由过程并完成对端注册。图 2 下半部分描绘的是情况②. 上述过程中，MAP 发送的绑定更新的源地址、目的地址，以及归属地址目的地选项（home address destination option，HADO）和替换转交地址选项（alternate care-off address option，ACAO）的取值按表 1[9]设置。

表 1 图 2 中 MAP 发送的 BU 中的地址[9]

Tab. 1 Address in BU sent by MAP in Fig. 2[9]

注册对象	源地址	目的地址	HADO	ACAO
HA	MAP 地址	HA 地址	MN 的 HoA	MN 的 RCoA
CN	MAP 地址	CN 地址	MN 的 HoA	MN 的 RCoA

当 MN 在 2 个外埠域之间切换时，其切换流程如图 3 所示[9]。对于图 2 与图 3 中相同的步骤此处不再赘述，仅对不同之处进行解释：

1）MN 在发送给新 AR 的关联请求中携带的归属信息是 MN 的归属网络前缀、归属代理地址及原 MAP（previous MAP）地址。AR 转发的关联请求中携带的归属信息是 MN 的归属网络地址、归属代理地址及旧 MAP 地址。

2）新 MAP（new MAP）代表 MN 完成归属注册后将 MN 的归属地址与新在线转交地址的绑定以非压缩绑定更新的形式发送至原 MAP 处，原 MAP 收到该信令后读取其中的绑定信息，修改对应的绑定缓存条目，并发送绑定确认给新 MAP. 该过程中新 MAP 发送的绑定更新所包含的源地址、目的地址，以及 HADO 和 HCAO 中的取值按表 2[9]设置。

当 MN 发生域内切换时，MAP 不与外界交换移动性信令，其切换过程即为域间切换过程中的本地注册过程，即图 2 中从第 1 行“Beacon”开始到第 9 行“L-BA*”为止。

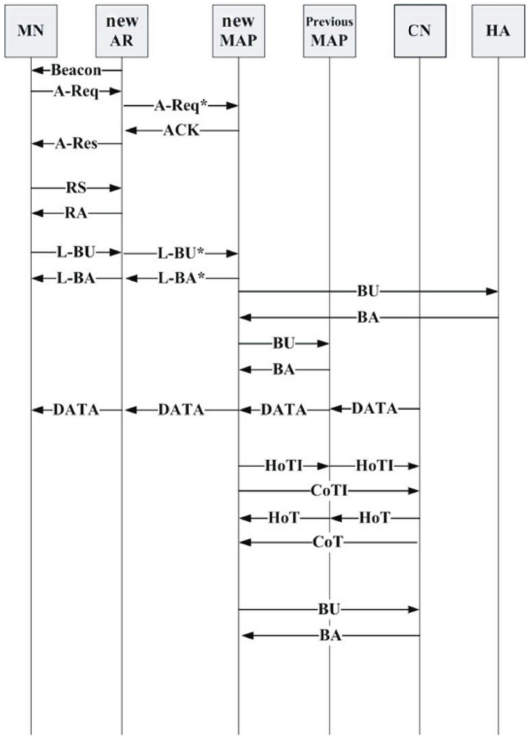

图 3 相邻 MAP 之间的切换[9]

Fig. 3 Handover between two neighboring MAPs[9]

可见，在 WoMIPv6 协议中，MN 只需要负责感知子网间的移动并进行本地注册，不需要感知是否发生域间移动。当发生域间移动时，代理 MN 完成相应的归属注册和对端注册，从而大大减少 MN 的通信负担。

表 2 图 3 中 MAP 发送的 BU 中的地址[9]

Tab. 2 Address in BU sent by MAP in Fig. 3[9]

注册对象	源地址	目的地址	HADO	ACAO
HA	新 MAP 地址	HA 地址	MN 的 HoA	MN 新 RCoA
CN	新 MAP 地址	CN 地址	MN 的 HoA	MN 新 RCoA
原 MAP	新 MAP 地址	原 MAP 地址	MN 的 HoA	MN 新 LCoA

1.2 域间软切换的实现

为解决 MN 在进行域间切换时因新 MAP 无法及时获得通信 CN 的信息而不能及时代理 MN 完成对端注册，从而导致 MN 与 CN 通信中断这一问题，定义新的移动性选项“CN Address”，放在原 MAP 发往新 MAP 的绑定确认中，以便将原 MAP 已知的 CN 地址及时告知新 MAP，使得新 MAP 能马上进行对端注册，实现越区软切换。该选项格式如图 4 所示。根据文献[5]，可取 Type＝6，Length 为 Message Data 的长度（单位：字节），Message Data 放置原 MAP 已知的 CN 地址。

根据 HMIPv6[6]，在绑定确认中，标志位“M”后有 11 个比特位保留，这里取紧跟在“M”后的一位，定义为“CA”位，即当该位取 1 时，说明该绑定确认含有“CN Address”选项，且位于所有选项的最后，当该位取 0 时，说明该绑定确认不含“CN Address”选项。

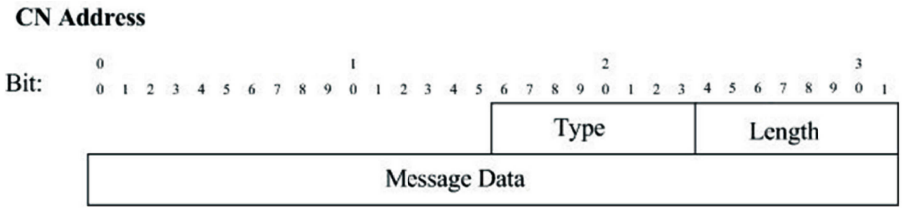

图 4　CN Address 选项
Fig. 4　CN Address option

2　软切换协议性能分析

如前所述，在未使用“CN Address”选项时，MN 经过一次域间切换之后，在有数据包发给 CN 或 CN 有数据包直接发往新的区域转交地址（例如通过人工配置的方式得到了新的区域转交地址）之前，新 MAP 因不能发现 CN 而无法进行对端注册。此时，若又出现 PAN 间切换，将导致原 MAP 与 MN 之间的隧道失效，造成丢包。此处，不考虑 CN 通过其他途径获得 MN 的新区域转交地址，即只能依靠 MAP 代理 MN 进行的对端注册来获得 MN 的区域转交地址。因此，在注册完成前，CN 发往 MN 的数据包将不会被新 MAP 拦截。这意味着，MAP 只能在 MN 主动向外发送数据包时发现 CN.

为计算 MN 与 CN 通信的失败概率 P_F，需要考虑 MN 在发生域间切换之后，且在向外发送数据包之前是否再次出现 PAN 间切换的概率。

根据文献[11]的思路，假设 MN 在每一个 PAN 内的驻留时间服从参数为 λ_m 的指数分布，发往 CN 的数据包服从参数为 λ_C 的泊松过程，即前后 2 个数据包的间隔为图 5 中的 t_C，时序图如图 5 所示。其中，t_{M_0} 为 MN 在域间切换之前的最后一个 PAN 内的驻留时间；t_m 为 MN 自前一个数据包到达以来的剩余驻留时间，根据指数分布的无记忆性可知，t_m 服从参数为 λ_m 的指数分布。此外，MN 做完该次域间切换后在各新的 PAN 中的驻留时间用 t_{M_i}（i=1，2，…，n）表示。这里，域间切换后出现的 PAN 间切换的情况不包括回到原 MAP 域的情况。根据泊松过程的性质可知，t_C 服从参数为 λ_C 的指数分布。

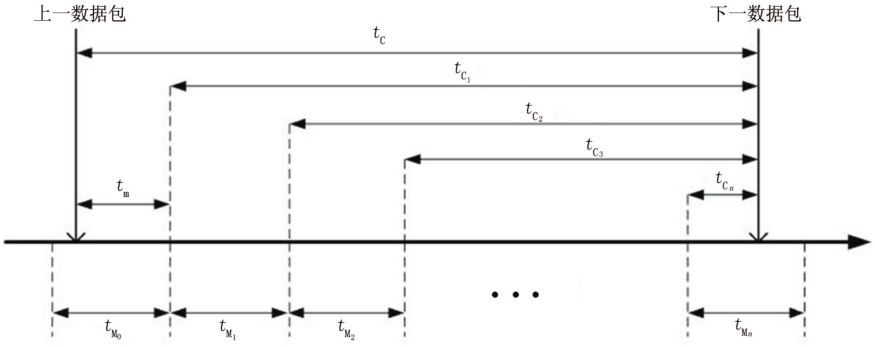

图 5　时序图
Fig. 5　Sequence diagram

这样，MN 发送第 2 个数据包时还未出现域间切换的概率 P_0 满足：

$$P_0 = \Pr\{t_C \leqslant t_m\} = \int_{t_m=0}^{\infty} [\int_{t_C=0}^{t_m} \lambda_C e^{-\lambda_C t_C} d(t_C)] \lambda_m e^{-\lambda_m t_m} d(t_m) = \frac{\lambda_C}{\lambda_C + \lambda_m}. \tag{1}$$

以随机变量 X 表示 MN 在域间切换之后所驻留过的 PAN 个数。根据文献[11]，有

$$\Pr\{X = n\} = \Pr\{t_C > t_m\}[\prod_{i=1}^{n-1} \Pr\{t_{C_i} > t_{M_i}\}]\Pr\{t_{C_n} \leqslant t_{M_n}\},\ n = 1, 2, \cdots \tag{2}$$

由式（1），有

$$\Pr\{t_C > t_m\} = 1 - P_0 = \frac{\lambda_m}{\lambda_C + \lambda_m}. \tag{3}$$

此外，

$$\prod_{i=1}^{n-1} \Pr\{t_{C_i} > t_{M_i}\} = \prod_{i=1}^{n-1} \int_{t_{M_i}=0}^{\infty} [\int_{t_{C_i}=t_{M_i}}^{\infty} \lambda_C e^{-\lambda_C t_{C_i}} d(t_{C_i})] \lambda_m e^{-\lambda_m t_{M_i}} d(t_{M_i})$$
$$= \prod_{i=1}^{n-1} \frac{\lambda_m}{\lambda_C + \lambda_m} = \left(\frac{\lambda_m}{\lambda_C + \lambda_m}\right)^{n-1}. \tag{4}$$

将式（3）和式（4）代入式（2），得

$$\Pr\{X = n\} = \left(\frac{\lambda_m}{\lambda_C + \lambda_m}\right)^n \frac{\lambda_C}{\lambda_C + \lambda_m},\ n = 1, 2, \cdots \tag{5}$$

对使用“CN Address”选项之前的切换方案，只要 MN 在域间切换之后、数据包发送之前发生了 PAN 间移动，就会出现通信失败，因此，与 CN 通信失败的概率为

$$P_F = \sum_{n=2}^{\infty} \Pr\{X = n\} = \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{\lambda_m}{\lambda_C + \lambda_m}\right)^n \frac{\lambda_C}{\lambda_C + \lambda_m} = \left(\frac{\lambda_m}{\lambda_C + \lambda_m}\right)^2 = \left(\frac{1}{1+\rho}\right)^2, \tag{6}$$

其中，$\rho = \lambda_C/\lambda_m$ 为数据移动比，它表示 MN 每移动经过一个 LoWPAN 时发送给 CN 的数据包个数。

图 6 和图 7 反映了未使用“CN Address”选项的情况下，$\rho<1$ 和 $\rho\geqslant1$ 时，通信失败概率 P_F 的变化情况。由这 2 个图可以看出：1）当 ρ 比较小时（如图 6 所示），即当数据包发送频率较低或者 PAN 间切换频率较高时，通信失败概率 P_F 接近于 1，即与 CN 的通信几乎失效；2）随着 ρ 的增大，通信失败概率 P_F 逐渐减小，也就是说，当数据包发送频率增大或者 PAN 间切换频率减小时，MN 与 CN 通信成功的概率增大。然而，在使用了“CN Address”选项后，由于 MAP 可以及时完成对端注册，在不考虑其他造成通信失败因素的情况下，域间切换及其之后的 PAN 间切换本身将不再造成 MN 与 CN 通信的失败。因此，使用“CN Address”选项后，尤其是 ρ 值较低（即数据包发送频率较小或者 PAN 间切换频率较高）时，使用所提出的“CN Address”选项，能有效降低域间切换后 MN 与 CN 通信失败的概率，从而实现域间软切换。由图 7 可以看出：在数据移动比 $\rho>2$ 时，通信失败概率可以降低到

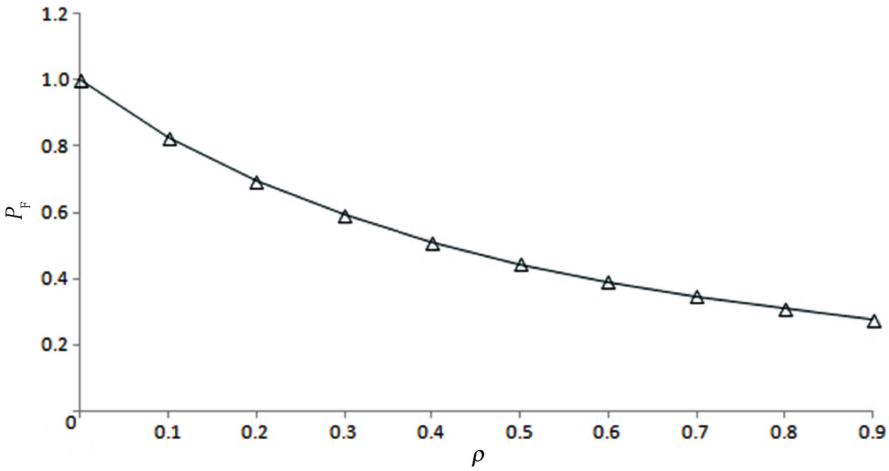

图 6 通信失败概率（$\rho<1$）
Fig. 6 Communication failure probability ($\rho<1$)

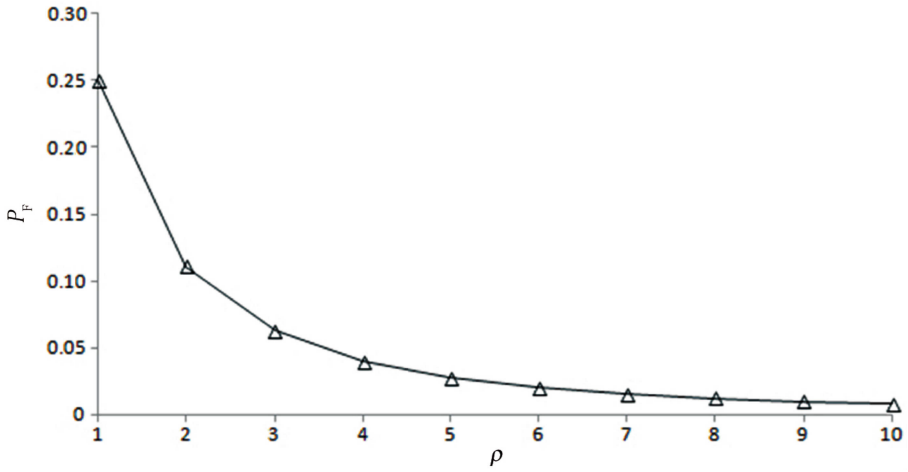

图 7 通信失败概率（$\rho \geqslant 1$）
Fig. 7 Communication failure probability ($\rho \geqslant 1$)

0.1 以下，而且在数据移动比 $\rho > 10$ 时，通信失败概率可以降低到 0.01 以下。这说明所提出的“软切换协议”在降低 MN 与 CN 通信失败概率方面是有效的。

3 结论

针对当今一些移动 IPv6 协议存在的缺陷：在 MN 域间切换后且在对端注册完成前，MN 的在线转交地址发生改变从而引起 MN 与 CN 通信中断。研究引入新的移动性选项，使 MAP 及时获得 CN 地址，及时完成对端注册，从而克服了上述缺点，降低了 MN 与 CN 通信中断的概率，实现了域间软切换。

[参考文献] (References)

[1] IEEE Computer Society. IEEE 802.15.4 Standard for wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (WPANs)[S]. Piscataway, NJ: IEEE, 2011.

[2] MONTENEGRO G, HUI J, CULLER D. RFC 4944 Transmission of IPv6 packets over IEEE 802.15.4 networks[S]. Internet Engineering Task Force, 2007.

[3] YAN T, HE T, STANKOVIC J A. Differentiated surveillance for sensor networks[C]//Proceedings of the First ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM, 2003: 51-62.

[4] ARAMPATZIS T, LYGEROS J, MANESIS S. A survey of applications of wireless sensors and wireless sensor networks[C]//Proceedings of 13th Mediterranean Conference on Control and Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 2005: 719-724.

[5] PERKINS C, JOHNSON D, ARKKO J. RFC 6275 Mobility support in IPv6[S]. Internet Engineering Task Force, 2011.

[6] SOLIMAN H, CASTELLUCCIA C, MARKRI K E, et al. RFC 5380 Hierarchical mobile IPv6 (HMIPv6) mobility management[S]. Internet Engineering Task Force, 2008.

[7] KOODLI R. RFC 5568 Mobile IPv6 fast handovers[S]. Internet Engineering Task Force, 2009.

[8] KUSHALNAGAR N, MONTENGERO G, SCHUMACHER C. RFC 4919 IPv6 over low-power wireless personal area networks (6LoWPAN): overview, assumptions, problem statement, and goals[S]. Internet Engineering Task Force, 2007.

[9] 朱艺华，胡峥，朱德庆，等. 一种适用于无线传感器网络的移动 IPv6 协议[J]. 软件学报，2013，24 (S1)：62-75.
ZHU Y H, HU Z, ZHU D Q, et al. Mobile IPv6 protocol for wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2013, 24(S1): 62-75. (in Chinese)

[10] SHELBY Z, CHAKRABARTI S, NORDMARK E, et al. RFC 6775 Neighbor discovery optimization for IPv6 over low-power wireless personal area networks (6LoWPANs)[S]. Internet Engineering Task Force, 2012.

[11] LIN Y B. Reducing location update cost in a PCS network[J]. IEEE/ACM Transaction on Networking, 1997, 5(1): 25-33.