

基于网络编码的无线物联网 多中继协作切换机制

黄 辰¹, 张 伟¹, 李可维², 杨维明¹, 黄本雄³, 戴 彬³

(1. 湖北大学 物理学与电子技术学院, 湖北武汉 430062; 2. 武汉第二船舶设计研究所, 湖北武汉 430064;
3. 华中科技大学 电信系, 湖北武汉 430074)

摘 要: 本文针对网状结构的无线物联网中的多跳切换场景, 提出了一种基于网络编码的多中继协作切换机制 MRH. MRH 机制中采用了基于势能场的路由探测算法, 通过中继协作的方式, 将移动终端同时注册到多个漫游域上. 配合网络编码, MRH 机制使移动终端建立了到多个无线物联网接入点之间的灵活、可靠的切换连接, 实现了在多个无线物联网间的平滑切换.

关键词: 网络编码; 物联网; 切换

中图分类号: TP301

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2012) 10-1954-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.10.008

Network Coding Based Multi-relay Cooperative Handover Mechanism in Wireless Internet of Things

HUANG Chen¹, ZHANG Wei¹, LI Ke-wei², YANG Wei-ming¹, HUANG Ben-xiong³, DAI Bin³

(1. Faculty of Physical and Electronics, Hubei University, Wuhan, Hubei 430062, China;

2. Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan, Hubei 430064, China;

3. Department of Electronic and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: In this paper, we propose a network coding based multi-relay cooperative handover mechanism MRH, for multi-hop handover scenario in wireless internet of things. MRH adopts a route detection algorithm based on potential energy field. One mobile terminal can register on multiple roaming area through intermediate cooperation. Based on network coding, mobile terminal establishes reliable, flexible handover connections with multiple network access points, then smooth handover between multiple internet of things can be realized.

Key words: network coding; internet of things; handover

1 引言

宽带移动互联网的技术演进, 无线移动终端的硬件升级, 推动了无线物联网的快速发展. 为了保证在无线物联网中数据传输的实时性和准确性, 接入物联网的移动终端必须适应各种异构无线网络及协议, 从而能够在无线物联网中漫游. 一旦移动终端发起切换, 多跳连接也将相应地切换到新的网络接入点上. 这种多跳切换的缺陷在于, 终端之间的相对移动频繁, 带来了切换连接的频繁建立, 多跳切换的可靠性大幅度降低, 维护多跳切换连接不仅开销较大, 切换的实时性也得不到保障.

针对移动终端在无线物联网漫游执行多跳切换操作所遇到的问题, 本文提出一种基于网络编码的多中继协作切换机制 MRH (Multi-Relay Cooperative Handover). 该机制支持移动终端通过中继协作, 建立到多个网络接入点的切换连接. 移动终端同时向位于多个漫游域的网络接入点发出切换请求, 从而注册到多个漫游域. 这样即便在移动过程中个别切换连接断链, 移动终端还能够维持剩下的多条切换连接, 而不必重新发起切换请求. MRH 机制采用网络编码, 整个网络将以一定的冗余编码数据包为代价换取网络传输的可靠性.

2 相关研究工作

切换技术是无线通信技术的关键技术之一,目前已有大量的文献提出各种基于网络层、传输层和应用层的切换方案^[1].这些切换方案大多数都是基于 *always best connected*^[2],即任何时候总是维持一条最好的通信连接链路,要在切断旧的连接之后再建立新的连接,因而这些切换方案不可避免地存在一定的切换时延. Manoj 等人^[3]提出一种 *always all connected* 架构,即通过会话层的带宽汇聚机制来得到更高的端到端吞吐量和动态选择端到端路径数目.

上述切换算法主要应用在单跳蜂窝网中,而无线物联网主要形态是多跳蜂窝网络^[4].传统的切换方案却不能直接应用于无线物联网,因为单跳蜂窝网切换不需要多中继的协作.在多中继环境下引入网络编码^[7],可以有效控制通信连接和编码数据包的冗余度.提高多中继连接的可靠性.将网络编码与协作通信相结合^[8-10],可以在不明显增加网络开销的基础上,大幅度提高协作通信的效率.

3 多中继协作切换

3.1 基于多跳势能场的路由探测算法

整个切换过程分为两个阶段:路由探测阶段以及漫游切换阶段.

(1) 路由探测阶段

$W = \{w_1, \dots, w_{n-1}, w_n\}$, $n > 1$ 是网络接入点集合. E 是无向图的边,代表邻居节点之间的无线链路.每条边都有一个权值作为传输代价,边 (v_i, v_j) 的传输代价为 $c_{i,j}$,影响传输代价的因素包括发送时延、节点发射功率、信道干扰、丢包率等,传输代价将最终影响到编码数据包的传输时延.定义任意节点 v_i 都有场势能 $e_i \geq 0$,网络接入点的场势能为 0.每个节点都要维护一个势能场路由表,该表记录了以下表项:

- 中继节点的场势能 e : 中继节点相对于每个可达的网络接入点均维护一个场势能值,场势能值初始化为无穷, $e = +\infty$;
- 中继节点的阶数 $order$: 阶数代表了中继节点距离可达网络接入点的跳数,以控制路由探测的半径,并使其低于预设的最大阶数 MAX_ORDER ;
- 邻居节点 ID 列表: 将编码包传输给可达网络接入点所需经过的下一跳邻居节点 ID,以及链路传输代价;
- 时间戳 t : 该时间戳用于区别网络接入点发送的每一轮路由探测包 RDP(Route Detect Packet),每轮探测周期结束之后,该时间戳会递增.

每隔一个周期 T ,网络接入点广播路由探测包

RDP,中继节点 v_j 收到来自于 v_i 的 RDP 包后执行以下流程:

a) 检查 RDP 包的时间戳,如果该时间戳小于自身关于网络接入点的时间戳 $t_i < t_j$,则丢弃该 RDP;如果 $t_i > t_j$,则更新时间戳 $t_i = t_j$,同时更新场势能 $e_j = \infty$,进入步骤 b);如果 $t_i = t_j$,则进入步骤 b);

b) 比较自身的阶数同 RDP 包的阶数,如果 $order_{own} < order_{RDP}$,则丢弃该 RDP;如果 $order_{own} > order_{RDP}$,则更新 $order_{own} = order_{RDP}$, v_j 的势能路由表中原有的对应网络接入点的邻居节点列表会被清空, v_j 将 v_i 的 ID 加入关于网络接入点的邻居节点列表. RDP 包的阶数加 1,进入步骤 c);

c) v_j 计算 $e_i + c_{i,j}$,如果 $e_j > e_i + c_{i,j}$,则更新 $e_j = e_i + c_{i,j}$,将更新后 v_j 的场势能值写入 RDP 的场势能值字段,并将该 RDP 包广播出去;如果 $e_j \leq e_i + c_{i,j}$, v_j 的场势能值不变,直接将该值写入 RDP 包的场势能值字段,并将该 RDP 包广播出去.

(2) 漫游切换阶段

路由探测结束之后,中继节点的势能场路由表将记录该中继节点可达网络接入点的 ID、相对于网络接入点的阶数和场势能,以及到达网络接入点经过的邻居节点 ID.在漫游切换阶段,携带切换信息的编码数据包将从移动终端开始,一级一级向势能最低,阶数最低的网络接入点传输.

3.2 冗余度分析

(1) 基于可靠度信赖值的冗余度分析

最终切换是否发动将依据两个因素,一个是移动用户预测自身移动距离超过一个设定的最低门限距离,并且导致切换失败的概率 P_{mo} ;一个是移动用户进入到两个邻接域的切换区间的概率 P_{SM} ,这两个概率决定了最终的切换发动成功概率.移动用户成功发动切换的概率为 $P_{ho} = (1 - P_{mo}) \cdot P_{sm}$.

定义无线链路丢包率均为 p .成功发动切换的概率为可靠度信赖值.定义移动终端向下一级势能场的中继节点发送 S_M 个编码数据包,将这 S_M 个编码数据包的发送看做一个随机试验的 S_M 次事件.考虑到链路的丢包以及传输过程中编码数据包可能产生的错误,实际发生的试验次数为 $S_M(1-p)$.实验成功计为 1,否则计为 0,通过历史统计数据,可以获得该随机试验的样本均值 μ 和样本方差 σ^2 .记随机变量 S_A 为成功传输事件的和,即 $S_M(1-p)$ 个样本的和,根据中心极限定理,当样本数量足够大, S_A 的分布等同为正态分布.将 S_A 的分布转换为标准正态分布,如式(1)所示

$$\tilde{S}_A = \frac{S_A - S_M(1-p)\mu}{\sqrt{S_M(1-p)\sigma}} \sim N(0, \sigma^2) \quad (1)$$

为了分析编码数据包的传输下限,即 S_M 的最小取值,保证移动终端能够成功发动切换,将成功发动切换的概率 P_{ho} 作为对发包数量的可靠度信赖值,如式(2)所示

$$\begin{aligned} P(\tilde{S}_A \geq x_p) &\geq P_{ho} = P_{mo} \cdot P_{sw} \\ \Rightarrow P(S_A \geq x_p \cdot \sqrt{S_M(1-p)}\sigma + S_M(1-p)\mu) & \\ \geq P_{mo} \cdot P_{sw} & \end{aligned} \quad (2)$$

由于下级势能场从移动终端收到的编码数据包数量不能低于数据代的大小 G ,因此要求移动终端至少要向第一级中继节点发送编码数据包数量为

$$\begin{aligned} G &= x_p \cdot \sqrt{S_M(1-p)}\sigma + S_M(1-p)\mu \\ \Rightarrow S_M &= \frac{(2\mu G + x_p^2\sigma^2) + \sqrt{(2\mu G + x_p^2\sigma^2)^2 - 4\mu^2 G^2}}{2\mu^2(1-p)} \end{aligned} \quad (3)$$

(2)基于丢包率的冗余度分析

势能场 L_i 的中继节点 v_i 向下一级势能场 L_{i+1} 的 K 个邻居节点发送编码数据包.定义 N_k 为下一级中继节点 v_k 收到 G 个编码数据包,上一级中继节点所需发送的编码数据包数量, N_k 符合巴斯卡分布^[6],即

$$P\{N_k = n\} = \binom{n-1}{G-1} (1-p)^G p^{n-G}, n \geq G \quad (4)$$

定义 S_N 为下一级所有的中继节点均收齐 G 个编码数据包,上一级中继节点的编码数据包发送数量. S_N 的期望为

$$E[S_N] = E[\max_{1 \leq k \leq K} N_k] \quad (5)$$

直接基于式(5)的巴斯卡分布表达式难以计算 $E[S_N]$,需要将 N_k 作为 G 个独立同分布的巴斯卡随机变量之和.定义巴斯卡随机变量 J_n^k 为:当下一级中继节点 v_k 收到第 m 个线性无关的编码数据包 ($1 \leq m \leq G$),上一级中继节点所需发送的编码数据包的数量.因此有

$$\begin{cases} N_k = J_1^k + \dots + J_G^k \\ P\{J_G^k = i\} = \binom{i-1}{m-1} (1-p)^m p^{i-m} \end{cases} \quad (6)$$

式(4)代入式(5),并取 G 趋于无穷,有

$$\begin{aligned} \lim_{G \rightarrow \infty} E[S_N] &= \lim_{G \rightarrow \infty} E[\max_{1 \leq k \leq K} (J_1^k + \dots + J_G^k)] \\ &= E[\max_{1 \leq k \leq K} \lim_{G \rightarrow \infty} (J_1^k + \dots + J_G^k)] \end{aligned} \quad (7)$$

由于 J_n^k 为独立同分布随机变量,且根据巴斯卡分布的特性,由 $E[J_m^k] = \frac{m}{1-p}, 1 \leq m \leq G$,可得

$$\lim_{G \rightarrow \infty} (J_1^k + \dots + J_G^k) = \frac{(1+G)G}{2(1-p)}$$

采用巴斯卡分布的最大统计量^[11]分析 $E[N]$ 的渐进性,代入式(7),有

$$\lim_{G \rightarrow \infty} E[N] = E\left[\max_{1 \leq k \leq K} \frac{(1+G)G}{2(1-p)}\right] = \Theta\left(\frac{(1+G)G}{2(1-p)} \log K\right) \quad (8)$$

4 仿真结果与分析

本节在仿真软件 OMNet ++ 4.0 平台上模拟现实环境下的无线环境,对 MRH 机制的性能进行验证,并和传统的多中继切换机制 Takeover^[5]进行比较.

(1)平均切换时延

图1研究的是平均切换时延与丢包率的关系,对移动终端的速度分别是 20m/s 和 50m/s 的两种情况进行仿真. MRH 机制受丢包率的影响较小,受终端移动速度的影响也较小.而 Takeover 机制在丢包率较低时还能保持较低的切换时延水平,当丢包率超过 40% 的时候,时延将急剧上升.这主要是因为网络编码增强了数据的耦合程度,网络接入点只要收到的编码数据包数量达到一个预定的门限值(编码数据代大小 G),就可以成功解码.

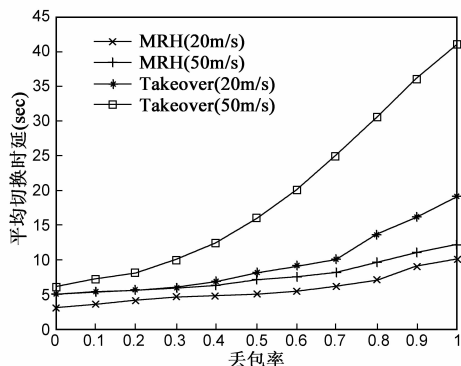


图1 平均切换时延与丢包率的关系

(2)编码数据包平均发送数量

图2研究的是中继节点的平均编码数据包发送数量与丢包率之间的关系,其中对 MRH 机制的两种实现方式:集中式和分布式,分别进行了仿真. MRH 机制的平均编码数据包发送数量要低于 Takeover 机制,且受丢包率上升的影响较小,这主要是由于基于网络编码的

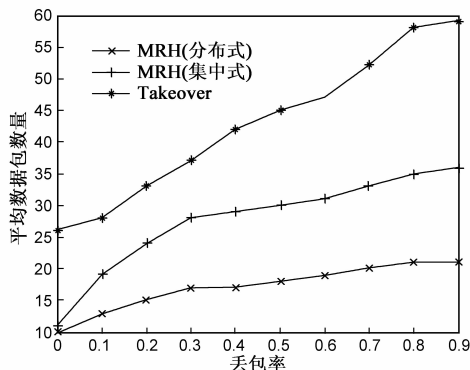


图2 平均数据包发送数量与丢包率的关系

MRH 机制即便发生了丢包,也不需要通过 ARQ 消息通知上一级中继重传,从而大大降低了发送次数以及网络数据包的数量.单个中继节点的发包数量可以不高于编码数据代的大小,只要同一级势能场的发包数量之和不低于编码数据代大小即可,进一步减少了编码数据包的发送数量.

5 结束语

本文提出了一种基于网络编码的多中继协作切换机制 MRH. MRH 机制采用网络编码,在无线物联网中建立移动用户与多个网络接入点之间的切换连接.本文对 MRH 机制的平均切换时延和数据包冗余度等性能参数进行理论建模分析和仿真实验,证明相比传统的单跳切换或者多跳切换算法,MRH 机制可以建立灵活、可靠的切换连接,实现高速运动状态下的平滑切换.

参考文献

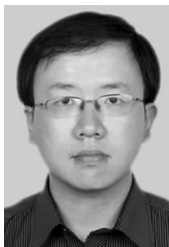
- [1] Akyildiz, I, et al. A survey of mobility management in next-generation all-IP-based wireless systems [J]. IEEE Wireless Communications, 2004, 11(4): 16 – 28.
- [2] Gustafsson E, et al. Always best connected [J]. IEEE Wireless Communications, 2003, 10(1): 49 – 55.
- [3] Manoj B, et al. A new dynamic end-to-end connection management scheme for multihomed mobile hosts [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2005, 3741: 524 – 535.
- [4] Ying-Dar L, et al. Multihop cellular: A new architecture for wireless communications [A]. Proceedings of INFOCOM 2000 [C]. USA: IEEE Press, Vol. 3, 2000. 1273 – 1282.
- [5] Choi H, et al. Takeover: A new vertical handover concept for next-generation heterogeneous networks [A]. Proceedings of VTC05 [C]. USA: IEEE Press, Vol. 4, 2005. 2225 – 2229.
- [6] Katti S, et al. The Poisson Pascal distribution [M]. Biometrics, 1961. 527 – 538.
- [7] Li S, et al. Linear network coding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(2): 371 – 381.

- [8] 黄辰,戴彬,王芙蓉,杨军,杨维明.基于网络编码的无线网络分布式协作通信机制 [J]. 电子学报, 2010, 36(10): 2302 – 2308.

Huang Chen, et al. Network coding based distributed cooperative communication mechanism in wireless network [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 36(10): 2302 – 2308. (in Chinese)

- [9] 徐峰,岳殿武.分布式协作通信网络中一种新的跨层设计方案 [J]. 电子学报, 2009, 37(7): 1434 – 1439.
- Xu Feng, et al. A novel cross-layer design scheme for distributed cooperative communication networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(7): 1434 – 1439. (in Chinese)
- [10] 邓卫华,王闻今,等.一种利用软信息网络编码在双向中继网络进行估计转发的方法 [J]. 电子学报, 2012, 40(2): 308 – 312.
- Deng Wei-hua, et al. An estimate-and-forward scheme for two-way relay networks with soft network coding [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(2): 308 – 312. (in Chinese)
- [11] Mantel N, et al. Evaluation of survival data and two new rank order statistics arising in its consideration [J]. Cancer Chemotherapy Reports, Part 1, 1966, 50(3): 163 – 170.

作者简介



黄 辰 男, 1983 年出生, 福建龙岩人. 博士, 湖北大学讲师, 主要研究方向为物联网及网络编码.

E-mail: szo094@qq.com

张 伟 男, 1979 年出生, 湖北武汉人. 博士后, 湖北大学讲师, 主要研究方向为无线传感器网络.

E-mail: 17890521@qq.com