

一种基于转交地址池的层次移动 IPv6 改进协议

官俊, 陈健, 陈炯, 潘雪增

(浙江大学计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310027)

(zjugary@sohu.com)

摘要: 层次移动 IPv6 协议中, 链路转交地址和区域转交地址的重复地址检测操作需要的时间占 IP 层切换延时的绝大部分。提出了一种层次移动 IPv6 改进协议, 引入链路转交地址池和区域转交地址池, 从地址池直接获取转交地址, 避免了重复地址检测操作。实验表明, 相比层次移动 IPv6 协议, 有效缩短了切换延时。

关键词: 层次移动 IPv6 协议; 重复地址检测; 转交地址池

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A

Improved hierarchical mobile IPv6 protocol based on Care-of address pool

GUAN Jun, CHEN Jian, CHEN Jiong, PAN Xue-zeng

(College of Computer Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China)

Abstract: In Hierarchical Mobile IPv6 (HMIPv6) protocol, the Duplicate Address Detection (DAD) operations for the On-link Care-of Address (LCoA) and Regional Care-of Address (RCoA) greatly impair the mobile node's inner-MAP and inter-MAP handover performance. The HMIPv6 protocol based on care-of address pool which introduced LCoA pool and RCoA pool into HMIPv6 was proposed, care-of addresses were got from the pools directly, and therefore the DAD operations for the LCoA and RCoA were avoided. The experiment results show that the proposed protocol greatly reduces the handover latency.

Key words: HMIPv6 (Hierarchical Mobile IPv6); DAD (Duplicate Address Detection); care-of address pool

0 引言

为了满足网络设备日益普遍的移动需求, IETF 提出了移动 IPv6 (Mobile IPv6, MIPv6) 协议^[1]之后, 又提出层次移动 IPv6 (Hierarchical Mobile IPv6, HMIPv6) 协议^[2], 通过引入移动锚点 (Mobility Anchor Point, MAP) 来改善 MN 在 MAP 域内的切换性能。移动 IP 需要承载大量交互和多媒体应用, 这些服务通常要求切换时通讯的中断时间在 200ms 以内, 而 MIPv6 和 HMIPv6 都无法达到这个要求。

本文通过实验测试发现 HMIPv6 的 IP 层切换延时绝大部分来自对链路转交地址 (On-link Care-of Address, LCoA) 和区域转交地址 (Regional Care-of Address, RCoA) 进行重复地址检测 (Duplicate Address Detection, DAD) 操作所需要的时间。要改善 HMIPv6 的切换性能一个很关键的方面是减少 DAD 对切换造成的影响。目前已经有一些针对 IPv6 DAD 的优化方案, 如 optimistic DAD^[3] 和 advance DAD^[4], 这些方法应用到 HMIPv6 中还需要进一步改进。文献[5]提出了在 FMIPv6^[6] 中使用地址池获得转交地址的方法, 但未能解决 HMIPv6 中的 DAD 延时问题。为此, 我们提出了一种基于转交地址池的 HMIPv6 (Care-of Address Pool Based HMIPv6, CoAP-HMIPv6) 改进协议。该协议能够避免 HMIPv6 中对 LCoA 和 RCoA 的 DAD 操作, 从而有效改善了 HMIPv6 的 IP 层切换性能。

1 HMIPv6 协议概述

1.1 移动节点 (Mobility Node, MN) 的绑定更新

MN 进入一个 MAP 域内会收到包含 MAP 信息的路由器通告 (Router Advertisement, RA), MN 需要配置两个转交地址: 区域转交地址 (RCoA) 和链路转交地址 (LCoA)。MN 需要对 LCoA 进行 DAD 操作, 成功后发送本地绑定更新 (Local Binding Update, LBU) 消息给 MAP。MAP 收到该 LBU 后, 对 RCoA 进行 DAD 操作, 然后返回本地绑定确认 (Local Binding Acknowledgement, LBA) 消息。MN 收到成功的 LBA 消息之后会向 HA 注册其新的转交地址 RCoA。协议操作如图 1 所示。

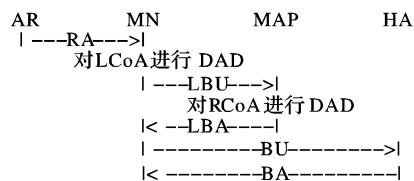


图1 HMIPv6 协议操作流程 (域间切换)

如果 MN 是在 MAP 域内发生了切换, 如改变了接入路由器 (Access Router, AR), 这时 MN 的 RCoA 不变, 只是 LCoA 重新配置, 但 MN 也需要对该 LCoA 进行 DAD 操作, 成功之后向 MAP 注册该 LCoA。MAP 不需要对 RCoA 进行 DAD 操作。

1.2 CoA 的配置和 DAD 操作

MN 通常采用无状态地址配置协议^[7]来配置 CoA。收到

路由通告后, MN 根据其中的路由前缀信息和 MAP 前缀信息以及接口的标志号配置 LCoA 和 RCoA。尽管地址重复的概率非常低, 协议仍然要求对地址进行 DAD 操作, 以确保地址的唯一性。

为了避免同一链路多个节点同时进行 DAD 操作可能造成的网络拥塞, 需要等待一段随机时间 (0ms ~ 1 000ms) 后才开始 DAD。节点发送一个邻居请求 (Neighbor Solicitation, NS), 如果一段时间内 (本文称为“DAD 等待延时”, RFC 2462^[7] 建议值 1s), 未收到已使用该地址的主机发出的对该地址的邻居公告 (Neighbor Advertisement, NA) 或其他主机对该地址的 DAD 消息, 则 DAD 成功。

可见 DAD 延时 TDAD = 随机等待时间 Trand_wait + DAD 等待延时 TDAD_delay。其中 Trand_wait 的期望是 0.5s, TDAD_delay 为 1s, 因此 TDAD 的期望为 1.5s, 最坏情况为 2s。

2 DAD 操作对 HMIPv6 切换性能的影响

通过以上分析, 知道 DAD 操作需要很长时间, 这必然会对 HMIPv6 的切换性能带来负面影响, 下面通过实验来分析 DAD 操作对 HMIPv6 切换性能造成的影响。

HMIPv6 实验床网络拓扑如图 2 所示。存在两个 MAP, 其中和 MAP1 相连的有两个接入路由器 AR1 和 AR2, 和 MAP2 相连的有一个接入路由器 AR3。MN 沿着虚线方向移动将依次接入到 AR1、AR2 和 AR3, 并发生切换, 其中 AR1 到 AR2 的切换是 MAP1 域内切换, AR2 到 AR3 是 MAP1 到 MAP2 的域间切换。软件环境为 Red Hat Linux 8.0, 2.4.19 内核版本, Radvd 0.7.2, MIPL 0.9.4, Monash HMIPv6 0.3。

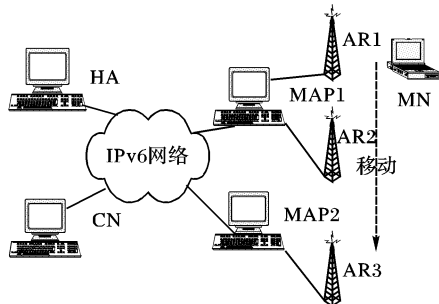


图2 HMIPv6 测试实验床

2.1 MN 在 MAP 域内移动

表1 MN 在 MAP 域内移动的时序分析 (HMIPv6)

时间序列 1	时间序列 2	时间序列 3	事件分析
2.330 504	2.330 504	2.330 504	MN 收到 AR2 的路由通告
2.543 718	2.330 827	3.331 037	NS (MN 开始对 LCoA2 的 DAD)
3.550 317	3.332 583	4.332 104	DAD 成功, MN 发送 LBU(1)
3.553 784	3.336 491	4.335 429	MN 收到 MAP1 发来的 LBA(1)

首先分析 MN 从 AR1 移动到 AR2 的情况, MN 收到 AR2 的路由通告, 配置链路转交地址 LCoA2, 随机等待一段时间后开始对 LCoA2 进行 DAD 操作, 大约 1s 后, DAD 成功, 然后向 MAP1 发送 LBU, 之后 MN 收到 MAP 发送的 LBA。表 1 给出了 3 组切换测试数据, 对应 Trand_wait 其分别为 0.213s、0s、1s (为了便于比较, 将 MN 收到路由通告的时间调整为相同值, 下同)。分析切换时间最短即 Trand_wait 等于 0s 的情况, MN 域内切换共耗时 1.006s, DAD 相关操作延时 1s, 占总延时的 99.4%, 而本地绑定的网络延时和处理延时仅占 0.6%。而最坏情况下 (第 3 组测试数据) DAD 操作延时近 2s。可见

DAD 操作对 MN 在 MAP 域内移动的切换性能造成了严重影响。

2.2 MN 在 MAP 域间移动

考虑 MN 从 AR2 移动到 AR3 的情况, 这时发生域间切换, MN 配置 LCoA3 和 RCoA2, 对 LCoA3 进行 DAD 操作, 成功后向 MAP2 发送 LBU。MAP2 收到 LBU 后对 RCoA2 进行 DAD 操作, 然后回应 LBA。表 2 给出了实验中 3 组测试数据, 平均切换延时 3.280s, 其中 DAD 相关操作延时占 95% 以上。MN 可以在配置好 LCoA3 和 RCoA2 后马上发送 LBU, 这样 LCoA 和 RCoA 的 DAD 操作可以并行进行, 但整个切换延时仍然高达 1s ~ 2s^[8]。

表2 MN 在 MAP 域间移动的时序分析 (HMIPv6)

时间序列 1	时间序列 2	时间序列 3	分析
3.635 690	3.635 690	3.635 690	MN 收到 AR3 的路由通告
4.274 912	4.501 492	4.019 827	NS (MN 开始对 LCoA3 的 DAD)
5.281 501	5.502 034	5.020 927	DAD 成功, MN 发送 LBU(2)
6.687 973	7.205 472	6.542 495	MN 收到 MAP2 发来的 LBA(2)
6.688 384	7.205 943	6.542 724	MN 向 HA 发送 BU(3)
6.792 016	7.310 018	6.646 389	MN 收到 HA 发来的 BA(3)

3 基于转交地址池的 HMIPv6 改进协议

HMIPv6 中通过无状态地址配置协议配置的 LCoA 和 RCoA 存在地址冲突的概率极小, 仅为 $1/(2^{62})$ ^[9], 因此 DAD 绝大多数情况下都能成功, 而 MN 却花费 1s 多的时间等待, 代价过高, 要改善 HMIPv6 的切换性能关键是减少 DAD 对切换造成的影响。

本文提出的基于转交地址池的 HMIPv6 (CoAP-HMIPv6) 改进协议能够避免 HMIPv6 对 LCoA 和 RCoA 的 DAD 操作, 从而显著减少 HMIPv6 域内和域间切换延时。CoAP-HMIPv6 要求 AR 维护一个无冲突的 LCoA 地址池, MAP 维护一个无冲突的 RCoA 地址池, MN 需要新的 CoA 时只需要向相应的地址池请求 CoA, 而不再需要对该 CoA 进行 DAD 操作。同时 CoAP-HMIPv6 也兼容 HMIPv6 协议。

3.1 修改路由通告消息

CoAP-HMIPv6 对 MIPv6 定义的路由通告消息格式进行了修改, 增加了 L 标志位 (LCoA Address Pool Flag), 如图 3 所示, 表示该路由器支持 CoAP-HMIPv6 协议, 维护了 LCoA 地址池, 能够向 MN 提供可用的 LCoA。

Type	Code				Checksum
Cur Hop Limit	M	O	H	L	Reserved
Router Lifetime					
Reachable Time					
Retrans Timer					
Options ...					

图3 路由通告消息格式

3.2 增加 LCoA 消息

MN 为了向 AR 请求 LCoA 需要发送转交地址请求 (LCoA Request, LCoA-Req) 消息, AR 发送转交地址确认 (LCoA Acknowledge, LCoA-Ack) 消息。LCoA 具有一定的生存周期, MN 应在 LCoA 过期之前向 AR 发送转交地址刷新 (LCoA Refresh, LCoA-Ref) 消息, MN 回应 LCoA-Ack 消息。LCoA 消息属于 ICMP 消息, 格式定义如图 4 所示, Type 值表示 LCoA 消息, Code 值区分上述 3 种消息。Status 表示地址确认的状

态,如是否成功等。MN 需要检查之前发送的请求和 RA 回应的确认的 Identifier 值是否匹配。

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1		
Type	Code	Checksum
Status	Reserved	Identifier
LCoA		

图 4 LCoA 消息格式

3.3 MAP 域内切换协议操作

MN 收到新的 AR 发送的路由通告后,需要检查路由通告的 L 标志位,如果该标志位被置位,则表明该 AR 支持 CoAP-HMIPv6 协议,MN 向该 AR 发送 LCoA-Req 消息请求一个可用的 LCoA,AR 在其维护的地址池中分配一个可用的 LCoA,并通过 LCoA-Ack 消息返回该地址。MN 收到 LCoA-Ack 消息后,不需要对其中的 LCoA 进行 DAD 操作,可以直接利用该 LCoA 发送 BU。之后的操作和 HMIPv6 协议相同。

3.4 MAP 域间切换协议操作

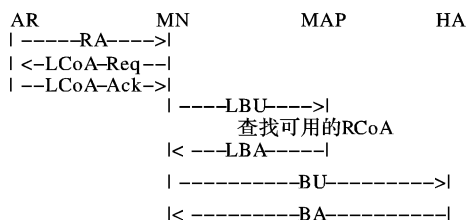


图5 CoAP-HMIPv6 协议操作流程(域间切换)

CoAP-HMIPv6 协议中 MAP 域间切换的流程如图 5 所示。MN 移动到一个新的 MAP 域后,首先按照上述操作获得一个可用的 LCoA,然后利用该 LCoA 向 MAP 发送 LBU 消息。考虑到和 HMIPv6 协议的兼容性我们在 LBU 消息中增加了一个新的标志位 R (Request RCoA Flag),如图 6 所示,仅当 R 位置位时 MAP 和 MN 才进行 CoAP-HMIPv6 协议处理。同时,由于 MN 不知道 MAP 是否支持 CoAP-HMIPv6 协议,它必须根据 HMIPv6 协议配置一个 RCoA,并通过 LBU 发送给 MAP。

						Sequence#	
A	H	L	K	M	R	Reserved	Lifetime
Mobility Options							

图 6 LBU 消息格式

MAP 收到 MN 发送的 LBU 后,首先检查标志位 R 是否被置位。如果没有,则按照 HMIPv6 协议的流程进行处理,需要对 LBU 中的 RCoA 进行 DAD 操作。如果 R 被置位,那么忽略 LBU 中的 RCoA,从维护的 RCoA 地址池中分配一个可用的 RCoA,并在 LBA 中以家乡地址 (Home Address) 选项的形式发送给 MN。类似的,在 BA 中增加一个新的标志位 R 以区分是否为包含可用 RCoA 的 LBA,如图 7 所示。

	Status	K	R	Reserved
Sequence #	Lifetime			
Mobility options				

图7 LBA 消息格式

MN 收到 MAP 发送的 LBA 后,首先检查标志位 R 是否被置位。如果没有,则按照 HMIPv6 协议进行处理。如果 R 被置位,那么解析其中的家乡地址选项,获得 RCoA,之后 MN 就可以用该 RCoA 向 HA 和 CN 进行绑定。

3.5 CoA 地址池的维护

CoAP-HMIPv6 要求 AR 负责维护 LCoA 地址池,MAP 负责维护 RCoA 地址池,确保其中的地址的唯一性。AR 或 MAP 可以将地址池中的地址分配给相应接口,这样,IPv6 底层协议就能够自动维护地址的有效性。AR 或 MAP 应当为每个分配出去的地址设定一个定时器,如果这个地址一段时间未被使用(AR 未收到 LCoA-Ref 消息,MAP 未收到 LBU 消息),AR 或 MAP 应当收回该地址。考虑地址池耗尽的情况,此时 AR 不应在路由通告中设置 L 标志位,这样 MN 认为该 AR 是普通 AR 不能提供 LCoA;MAP 则应按照 HMIPv6 处理 LBU。

4 CoAP-HMIPv6 协议性能分析

按照本文提出的 CoAP-HMIPv6 协议,我们对相关软件进行了修改,并按照图 2 的实验床对 CoAP-HMIPv6 协议进行了测试。其中 AR2 和 AR3 分别维护了各自的 LCoA 地址池, MAP2 维护了 RCoA 地址池。

4.1 MN 在 MAP 域内移动

首先分析 MN 从 AR1 移动到 AR2 的情况, MN 收到 AR2 的路由通告, 发现路由通告中的 L 位被置位, 于是向 AR2 发送 LCoA-Req 消息请求 LCoA, AR2 在地址池中分配一个可用的 LCoA 并通过 LCoA-Ack 消息发送给 MN。MN 马上用该地址发送 LBU。表 3 给出了其中的 3 组数据。这种情况下, MN 不再需要对 LCoA2 进行 DAD 操作(而该操作在 HMIPv6 协议中占总延时的 99% 以上), 使得 MAP 域内切换延时减少到 12.4ms, 而 2.1 节中 HMIPv6 协议 MAP 域内切换延时最短需要 1.006s, 相比延时缩短近 98%。

表3 MN在MAP域内移动的时序分析(CoAP-HMIPv6)

时间序列 1	时间序列 2	时间序列 3	分析
5.545927	5.545927	5.545927	MN 收到 AR2 的路由通告
5.546301	5.546211	5.546101	LCoA-Req(MN 请求 LCoA2)
5.553967	5.553767	5.554074	LCoA-Ack(AR2 返回可用的 LCoA2)
5.554394	5.554370	5.554301	MN 发送 LBU(1)
5.558501	5.557961	5.558476	MN 收到 MAP1 发来的 LBA(1)

4.2 MN 在 MAP 域间移动

考虑 MN 从 AR2 移动到 AR3 的情况,这时发生域间切换,MN 从 AR3 获得 LCoA3,然后向 MAP2 发送 LBU,MAP2 从 RCoA 地址池中为 MN 分配一个可用的 RCoA,再向 MN 发送 LBA。表 4 给出了其中的 3 组数据。由于 CoAP-HMIPv6 协议避免了 HMIPv6 中占切换总延时 95% 以上的对 LCoA 和 RCoA 的 DAD 操作,切换性能有了大幅度的提高,延时减少到平均 119.9ms,而 2.2 节 HMIPv6 平均延时为 3.280s,相比减少近 96.3%。

表4 MN在MAP域间移动的时序分析(CoAP-HMIPv6)

时间序列 1	时间序列 2	时间序列 3	分析
2.764243	2.764243	2.764243	MN 收到 AR3 的路由通告
2.764672	2.764594	2.764614	LCoA-Req(MN 请求 LCoA3)
2.772171	2.772237	2.770572	LCoA-Ack(AR3 返回可用的 LCoA3)
2.772910	2.773081	2.770942	MN 发送 LBU(2)
2.776981	2.777012	2.774716	MN 收到 MAP2 发来的 LBA(2)
2.777317	2.777281	2.774927	MN 向 HA 发送 BU(3)
2.880831	2.881004	2.876187	MN 收到 HA 发来的 BA(3)

4.3 实验结果

测试表明 CoAP-HMIPv6 相比 HMIPv6 避免了对 LCoA 和

RCoA 的 DAD 操作,从而减少了 95% 以上的 IP 层切换延时,不过需要指出的是这种改善是有一定代价的。MN 维护 LCoA 相比 HMIPv6 需要多发送 LCoA-Req 和 LCoA-Ack 消息以及定期发送 LCoA-Ref 消息,但 LCoA-Ref 消息的发送频率不会很高。AR 和 MAP 维护地址池需要消耗处理时间,一定程度上会增加网络的负荷。但是通常的实际情况是,一个 AR 或 MAP 上连接的 MN 数量有限,所维护的地址池也不需要很大,因此地址池维护的代价较小。

5 结语

在 HMIPv6 协议中,对 LCoA 和 RCoA 的 DAD 操作所需要的时间占切换延时的绝大部分(95% 以上),CoAP-HMIPv6 协议在 AR 引入 LCoA 地址池,在 MAP 引入 RCoA 地址池,从而不再需要对 LCoA 和 RCoA 进行 DAD 操作,缩短切换延时 96% 以上,显著改善了 IP 层切换性能。CoAP-HMIPv6 协议的域内平均切换延时 12.4ms,域间平均切换延时 119.9ms,加上 IP 层以下的切换延时(40ms ~ 50ms^[10]),总体切换延时能够控制在 200ms 以内,满足 MN 的实时应用对切换延时的要求。今后我们将改进地址池维护算法,提高地址池维护效率,减少地址池维护所需要的网络信令,支持更大的地址池。

参考文献:

- [1] JOHNSON D, PERKINS C, ARKKO J. Mobility Support in IPv6 [EB/OL]. IETF RFC 3775. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3775.txt>, 2004.
 - [2] SOLIMAN H, CATELLUCCIA C, EL MALKI K, *et al.* Hierarchical Mobile IPv6 mobility management (HMIPv6) [EB/OL]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc4140.txt>, 2005.
 - [3] MOORE N. Optimistic Duplicate Address Detection for IPv6 [EB/OL]. <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-ipv6-optimistic-dad-06.txt>, 2005.
 - [4] HAN Y, CHOI J, PARK S. Advance Duplicate Address Detection [EB/OL]. <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-han-mobility-adad-01.txt>, 2003.
 - [5] YOUNG JUNG H, JOO KOH S, YOUNG KIM D, Address Pool based Stateless NCoA Configuration for FMIPv6 [EB/OL]. <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-jung-mipshop-stateful-fmipv6-00.txt>, 2003.
 - [6] KOODLI R. Fast Handovers for Mobile IPv6 [EB/OL]. <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-mobileip-fast-mipv6-06.txt>, 2003.
 - [7] THOMSON S. IPv6 Stateless Address Autoconfiguration [EB/OL]. IETF RFC 2462, <http://www.ietf.org/rfc/rfc2462.txt>, 1998.
 - [8] NELSON R, DALEY G, MOORE N. Implementation of Hierarchical Mobile IPv6 for Linux [A]. Proceedings of The Sixth International Symposium on Communications Interworking (IFIP Interworking 2002) [C]. 2002.
 - [9] BAGNULO M, SOTO I, GARCIA-MARTINEZ A, AZCORRA A. Random generation of interface identifiers [EB/OL]. <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-soto-mobileip-random-iids-00.txt>, 2002.
 - [10] SCHMIDT T, WAHLISCH M. Roaming Real-Time Applications-Mobility Services in IPv6 Networks [EB/OL]. <http://www.rz.fhtw-berlin.de/projekte/mipv6/terena03.pdf>, 2003.
-
- (上接第 298 页)
- 真表明新的算法具有较好的性能、较高的灵活性和健壮性,在一定程度上改善了网络的性能。下一步问题是如何更好的达到无线传感器网络路由算法时延和节能的折衷。
- 参考文献:
- [1] TILAKK S, ABU-GHAZALEH NB, HEINZELMAN W. A taxonomy of wireless micro-sensor network models [J]. Mobile Computing and Communications Review, 2002, 1(2): 1-8.
 - [2] ESTRIN D, GOVINDAN R, HEIDEMAN J, *et al.* Next century challenges: Scalable Coordination in Sensor Networks [A]. In: Proc. of the 5th annual ACM/IEEE international Conference on Mobile computing and networking [C]. Seattle, Washington, 1999. 263-270.
 - [3] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络 [J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1290.
 - [4] AKYILDIZ IF, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, *et al.* A Survey on Sensor Networks [J]. IEEE Communications Magazine, August 2002, 40(8): 102-114.
 - [5] 林亚平, 王雷. 传感器网络中一种分布式数据汇聚层次路由算法 [J]. 电子学报, 2004, 32(11): 1801-1805.
 - [6] GANESAN D, GOVINDAN R, SHENKER S, *et al.* Energy-Efficient Multipath Routing in Wireless Sensor Networks [J]. Mobile Computing and Communications Review, 2001, 5(4): 11-25.
 - [7] HONG X, GERLA M, WANG H. Load Balanced, Energy-Aware Communications for Mars Sensor Networks [A]. In Proceedings of IEEE Aerospace 2002 [C]. Mar. 2002.
 - [8] CHOI W, DAS SK, BASU K. Angle-based Dynamic Path Construction for Route Load Balancing in Wireless Sensor Networks [A]. Proc. of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) [C]. May 2004.
 - [9] MAO S, HOU YT. BeamStar: A new low-cost data routing technology for wireless sensor networks [A]. in Proceedings of IEEE GLOBECOM 2004 [C]. Dallas, TX, Nov./Dec. 2004.
 - [10] HEINZELMAN WR, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks [A]. In Proceedings of the 33rd HICSS'00 [C]. Jan. 2000.
 - [11] LINDSEY S, RAGHAVENDRA C. PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems [J]. in IEEE Aerospace Conference, March 2002, 3: 3-1130.
 - [12] INTANAGONWIWAT C, GOVINDAN R, ESTRIN D. Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks [A]. In Proceedings of MOBI-COM'00 [C]. 2000. 56-67.
 - [13] KRISHNAMACHARI B, ESTRIN D, WICKER S. The Impact of Data Aggregation in Wireless Sensor Networks [A]. In Proceedings of the 22nd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW'02) [C]. 2002. 575-578.
 - [14] KRISHNAMACHARI B, ESTRIN D, WICKER S. Modelling Data-Centric Routing in Wireless Sensor Networks [A]. In Proceedings of the 21th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies [C]. New York, NY, USA, June 2002.