

基于统计学的无线 Mesh 网络路由协议

王宏飞¹ 牟荣增¹ 阎跃鹏^{1,2}

(中国科学院微电子研究所 北京 100029)¹ (中科院微电子研究所昆山分所 昆山 215347)²

摘要 传统的无线 Mesh 网络(WMN)路由协议利用路由管理帧携带的路由信息来维护路由。无线环境的不稳定性可能导致路由管理帧丢失,使路由协议无法及时获取正确的路由信息,从而降低网络性能。介绍了一种基于统计学原理的无线 Mesh 网络路由协议 B. A. T. M. A. N. (Better Approach To Mobile Ad-hoc Networking)。该协议通过统计路由管理帧的投递成功率来选择最优路径,消除了路由管理帧丢失对路由协议的影响。通过与 OLSR 的测试对比表明,B. A. T. M. A. N. 在无线 Mesh 网络中有更好的性能表现,更适用于移动网络。

关键词 路由协议,无线 Mesh 网络,B. A. T. M. A. N., OLSR

中图分类号 TP393.02 **文献标识码** A

Wireless Mesh Network Routing Protocol Based on Statistics

WANG Hong-fei¹ MU Rong-zeng¹ YAN Yue-peng^{1,2}

(Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)¹

(Kunshan Branch, Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Kunshan 215347, China)²

Abstract Traditional routing protocols for wireless mesh network(WMN) use the routing information carried by management frames to calculate, compare and choose route. However the necessary routing information is not available because the management frames can be lost due to the instability of wireless environment, which degrades the performance of network. This paper introduced a new routing protocol named B. A. T. M. A. N. (Better Approach To Mobile Ad-hoc Networking) based on statistics. The loss of management frames makes sense because this protocol decides best paths according to the packets delivery rate of management frames. Experiment shows that B. A. T. M. A. N. outperforms OLSR in wireless mesh network and achieves greater advantages in mobile network.

Keywords Routing protocol, Wireless mesh network(WMN), B. A. T. M. A. N., OLSR

1 引言

随着无线应用要求的日益增多,无线 Mesh 网络已经成为下一代网络技术的发展重点^[1,2]。路由协议是无线 Mesh 网络中的核心技术,为其提供多跳转发功能。现有的路由协议主要分为先验式路由和按需式路由。先验式路由的代表 OLSR(Optimized Link State Routing)^[3]是一种表驱动的链路状态路由协议,节点周期性地交互拓扑信息来同步链路状态并生成路由表。按需式路由的代表 AODV(Ad-hoc On-demand Distance Vector routing)^[4]是一种距离向量路由协议,节点在有数据通信时交互 RREQ 和 RREP 生成路由表。不论是先验式路由还是按需式路由,都需要根据路由管理帧携带的路由信息来生成路由表,以选择最优路径。在无线 Mesh 网络中,环境的时变不确定性、节点的随机移动和负载的变化都会影响链路质量^[5],可能导致路由管理帧丢失,影响路由协议的正常工作;OLSR 中链路状态无法同步,导致路由环

路^[6];AODV 中源节点无法找到可用路由,增大了传输时延或者直接丢包。现有路由协议大都采用笨拙的重传机制来解决路由管理帧的丢失问题,存在以下两点不足:

- 1)在重传成功之前路由协议无法正常寻路;
- 2)无法保证重传成功。

为了从根本上解决上述问题,研究人员从统计学的角度出发设计了 B. A. T. M. A. N. (Better Approach To Mobile Ad-hoc Networking)。B. A. T. M. A. N. 是一种先验式距离向量路由协议,利用了蚁群算法的思想,其特点是:路由维护不依赖于网络拓扑信息和节点状态信息,路径选择不依赖于路由管理帧中携带的元数据;路由管理帧投递成功率的统计数据是其路由维护和路径决定的唯一方法和依据,保证了最优路径的数据包投递成功率最高。B. A. T. M. A. N. 的路由管理帧仅携带极少的有效信息,该帧的丢失不会影响路由协议的正常工作,所以 B. A. T. M. A. N. 非常适用于传输质量不稳定的无线 Mesh 网络^[7]。

到稿日期:2012-07-27 返修日期:2012-12-25 本文受核高基重大专项(2009ZX01031-002-008-002),国家科技重大专项(2010ZX03006-003-02)资助。

王宏飞(1985-),男,博士生,主要研究领域为无线传感器网络,E-mail:wanghf_ime@163.com;牟荣增(1972-),男,博士生,研究员,主要研究领域为无线传感器网络;阎跃鹏(1963-),男,研究员,博士生导师,主要研究领域为通信系统与信息科学。

2 B. A. T. M. A. N

2.1 B. A. T. M. A. N. 路由管理帧

B. A. T. M. A. N. 的路由功能完全通过路由管理帧 OGM (Originator Message) 的交互来实现。OGM 封装在以太网帧中,格式如图 1 所示。其中,子类型区分不同的管理帧;版本区分不同的无线 Mesh 网络;标志域标识了与邻居节点的链路状态;Gateway 标志标识了网关的配置; T_q (Transmit quality) 是路径质量的量化值。序列号机制可以区分 OGM 的新旧程度,避免节点处理重复 OGM 或是过时 OGM,保证了路由无环路。所有地址域存储的信息均为 MAC 地址,源地址存储了该 OGM 源节点的 MAC 地址,前一发送地址存储了该 OGM 发送节点的上一跳节点的 MAC 地址。

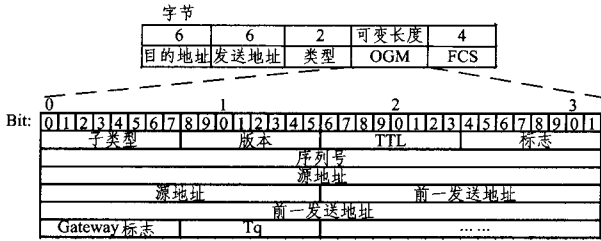


图 1 OGM 在以太网中封装的格式

B. A. T. M. A. N. 需要节点完成以下两部分工作来维护路由:

1) 节点周期性地生成 OGM 并广播,每广播一次将 OGM 的序列号加 1。

2) 节点在接收到 OGM 后,按照以下步骤判断其合法性,并决定处理方式:

a) 若子类型以及版本与协议的设置不匹配,则丢弃该 OGM;

b) 若发送地址与自己的 MAC 地址相同或为广播地址,则丢弃该 OGM;

c) 若源地址与自己的 MAC 地址不同,但前一发送地址与自己的 MAC 地址相同,则丢弃该 OGM;

d) 否则,该 OGM 按照以下步骤处理:

i. 根据 OGM 的序列号计算路由,并更新路由表;

ii. 更新 OGM 的前一发送地址、生存时间和 T_q ,若生存时间大于 0,则以广播方式转发该 OGM。

节点通过周期性广播 OGM 和接收其它节点发送的 OGM 来维护路由,这保证了网络中任意一个节点都拥有到其它节点的最优路径,但 B. A. T. M. A. N. 不记录完整路径,仅记录最优路径中的下一跳节点 MAC 地址。

2.2 T_q 估计

路由协议总是利用特定的路由判据来比较不同路径的优劣。 T_q 是 B. A. T. M. A. N. 的路由判据^[8],反映了路径的 OGM 投递成功率,该值越大,代表路径质量越好。 T_q 随着 OGM 在节点之间的转发不断被更新,当 OGM 通过某条路径到达某一节点后,该节点便可计算出通过该路径到达 OGM 源节点的总 T_q 。由于 OGM 可以通过多条不同的路径到达该节点,节点计算出所有可能路径的总 T_q ,并从中选出最优路径。

2.2.1 邻居节点之间的 T_q 计算

邻居节点之间的 T_q 计算方法如图 2 所示。假设 A、B 两

节点互为邻居(见图 2(a)),现在需计算链路 $B \rightarrow A$ 的 T_q 。

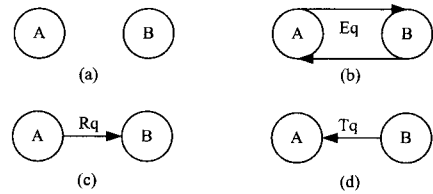


图 2 两点之间的 T_q 计算

1) B 产生一个 OGM 并广播, A 收到后处理并转发, B 再收到 A 转发的 OGM。以上流程是一个完整的闭环流程,要完成这个流程必须保证在 A、B 之间的双向链路上 OGM 可成功投递。图 2(b)中 E_q 表示回环概率,即 OGM 经历 $B \rightarrow A$ 及 $A \rightarrow B$ 之后被 B 成功接收的概率。

2) A 产生一个 OGM 并广播, B 收到后统计单向链路 $A \rightarrow B$ 的 OGM 投递成功率,即 A 发出的 OGM 被 B 成功接收的概率,在图 2(c)中用 R_q 表示。

3) 图 2(d)中 T_q 表示单向链路 $B \rightarrow A$ 的 OGM 投递成功率,即 B 发出的 OGM 被 A 成功接收的概率。 E_q 、 R_q 和 T_q 之间存在如式(1)所示关系。通过统计一段时间内接收到的 OGM 的序列号, B 可以计算 E_q 与 R_q ,并利用式(1)得到 T_q 。

$$T_q = \frac{E_q}{R_q} \quad (1)$$

2.2.2 非对称惩罚机制

由于存在隐藏节点和暴露节点等问题,无线通信中可能出现非对称链路,即一条链路的正向传输质量与反向传输质量相差巨大。B. A. T. M. A. N. 实质上用丢包率来反映链路的传输质量,只要正向链路或反向链路中任意一个丢包率较大, B. A. T. M. A. N. 就认为该链路为非对称链路。为了在选择最优路径时避开非对称链路, B. A. T. M. A. N. 在计算 T_q 时加入了非对称惩罚机制,如式(2)所示。

$$T_q = \frac{E_q}{R_q} (1 - (1 - R_q)^3) \quad (2)$$

从实现角度考虑, B. A. T. M. A. N 在 Linux 内核中实现,所有计算都受限于内核的整型运算法则:当 R_q 大于 53% 时,式(2)的计算结果与式(1)相同,非对称惩罚失效,该链路为对称链路;当 R_q 小于或等于 53% 时,式(2)的计算结果小于式(1),非对称惩罚生效,该链路为非对称链路。由此可见,对于非对称链路, T_q 在式(1)所得结果的基础上进一步减小,从而降低了包含该链路的路径被选为最优路径的可能性。

2.2.3 路径总 T_q 计算

一条完整的路路由若干条链路组成, B. A. T. M. A. N. 通过比较路径总 T_q 来决定最优路径。路径总 T_q 反映了从该路径的一端至另一端的 OGM 投递成功率,为组成该路径的各条链路的 T_q 乘积。如图 3 所示,源节点 A_1 在产生 OGM 时初始化 T_{q1} 为 255, T_{qi} ($i > 1$) 为由式(2)计算所得的链路 $A_i \rightarrow A_{i-1}$ 的 T_q , T_{qi} 为在 A_i 处计算所得的路径 $A_i A_1$ 的总 T_q , 则路径 $A_n A_1$ 的总 T_q 为

$$T_{qn1} = T_{qn} T_{q(n-1)1} = T_{qn} T_{q(n-1)} T_{q(n-2)1} = \dots = \prod_{i=1}^n T_{qi} \quad (3)$$

为了能够计算式(3),节点在转发 OGM 前更新其 T_q 域,将自己到源节点的总 T_q 填入 OGM 的 T_q 域中,例如 A_i 应该将 T_{qi} 装入 OGM 的 T_q 域中,然后再将 OGM 转发。

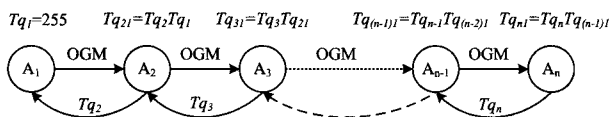


图3 路径 $A_i A_1$ 总 T_q 计算

2.2.4 窗口机制

为了准确地估计 T_q , B. A. T. M. A. N. 利用滑动窗口机制来计算 E_q 和 R_q 。滑动窗口长度为 N , 记录了最新的 N 个序列号对应的 OGM 的接收数量, 如图 4 所示。图 4 中接收情况为 1 表示该 OGM 已被成功接收, 为 0 表示该 OGM 未被成功接收。B. A. T. M. A. N. 计算滑动窗口内接收到的 OGM 数量(接收情况为 1 的数量)与窗口长度 N 的比值得到 E_q 和 R_q 。OGM 的接收数量由节点根据接收到的 OGM 序列号进行更新。

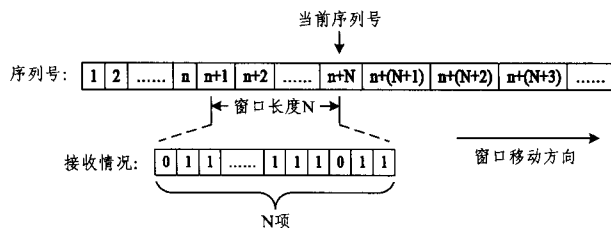


图4 滑动窗口机制

3 B. A. T. M. A. N 性能分析

由于物理层及 MAC 层建模的固有限制和灰区问题的存在^[9], 仿真软件无法对无线 Mesh 网络路由协议的实际表现做出准确估计, 不同的仿真软件所得到的仿真结果也缺乏一致性^[10]。目前国际上对于路由协议的主流研究方式是利用仿真软件进行行为分析, 利用实际测试获取性能数据^[11]。与国际上的主流研究方式相同, 本文采用实际测试的方法对 B. A. T. M. A. N. 进行性能评估, 并与较为流行的 OLSR 进行性能对比。

3.1 测试网络及配置

7 个节点组成无线 Mesh 网络, 如图 5 所示, 布置在不受控的室内无线环境中, 节点分别编号为 A~F。节点采用相同的测试平台: 基于 S3C2440 的 ARM 平台, 无线网卡芯片为 rt2573, 配置为 802.11b/g 混合模式, 工作在 2.4GHz。所有平台均运行嵌入式 Linux 系统, 内核版本为 2.6.39.1, 协议版本分别为 batman-adv-3.0(B. A. T. M. A. N.) 和 oslrd-0.6.1(OLSR)。测试平台如图 6 所示。

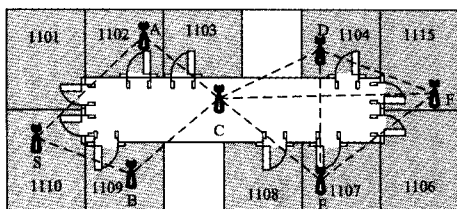


图5 节点在实际环境中的排放位置及拓扑

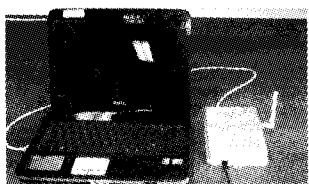


图6 基于 S3C2440 的 ARM 测试平台

B. A. T. M. A. N 关键参数配置如下:

- OGM interval: 1 秒
- TTL: 255
- Window Size: 64

OLSR 关键参数配置如下:

- HELLO Interval: 1 秒
- Hello Validity Time : 20 秒
- TC Interval: 1 秒
- Fisheye: 开启, 2 跳限制
- ETX: 关闭, 路由判据为跳数
- TC redundancy: 所有邻居节
- MPR coverage: 4

3.2 测试描述

本文建立了两种测试场景来评估路由协议的性能表现。

1) 第一种测试场景中 S 为源节点, A, C, D, F 分别为目的节点。测试指标及方法如下:

带宽: 利用 iperf 程序从源节点 S 向不同目的节点发送 UDP 负载进行测试, 测试时间为 10 分钟。

回路时延、包投递概率(数据包的投递成功率, 包投递概率 + 丢包率 = 1) 及最优路径切换次数: 在网络有少量负载的情况下(利用 iperf 在 S 与 F 之间施加 20kbps 的 UDP 负载), 利用 fping 发送 ICMP 数据包进行测试, 发送频率为每秒 1 个, 测试时间为 10 分钟。利用 fping 记录最优路径切换的情况并统计总切换次数。

2) 第二种测试场景中 S 为源节点, C 为目的节点, 网络空载, 测试指标及方法如下:

通信恢复时间: 利用 fping 发送 ICMP 数据包进行测试, 发送频率为每秒 10 个。在数据传输过程中, 关闭当前路径正在使用的路由节点(A 或 B), 通过计算关闭前最后一个 ICMP 序列号与恢复通信后第一个 ICMP 序列号之差来估计通信恢复时间。为了使结果更加平稳, 测量 10 次取平均值。

3.3 测试结果及分析

带宽测试结果如图 7 所示。可以看到, B. A. T. M. A. N 在 4 种情况下的带宽都高于 OLSR。B. A. T. M. A. N 和 OLSR 都是周期性维护的先验性路由协议, 节点需要洪泛管理帧来维护路由。由于 B. A. T. M. A. N 的管理帧仅有 OGM, 而 OLSR 的管理帧有 HELLO 帧与 TC 帧, 因此 B. A. T. M. A. N 的路由维护开销要小于 OLSR, 这是其带宽较高的原因。虽然可以通过修改 TC redundancy 和 MPR coverage 参数来降低 OLSR 的路由管理开销, 但这样做会减少可选路径的数量, 可能丢失最优路径。在一般情况下, 必须优先保证 OLSR 有较多的可选路径, 而不是仅仅降低其路由管理开销。

从图 8 可知, 当目的节点为 A, C 时, B. A. T. M. A. N 与 OLSR 的包投递概率几乎是一致的, 两者都接近 100%, 而当目的节点为 D, F 时, B. A. T. M. A. N 的包投递概率明显高于 OLSR。这是因为此时可选路径数量增加, B. A. T. M. A. N 采用了 OGM 的投递成功率作为路由判据, 所以能够找到包投递概率最高的路径, 但无法保证最优路径的距离最短; 而 OLSR 以跳数作为路由判据, 只能找到最短路径, 无法保证路径的数据传输质量。也正是因为上述原因, 从图 9 可以看出, OLSR 的回路时延要小于 B. A. T. M. A. N。另外, OLSR 的路由机制基于网络拓扑信息的同步, TC 帧的丢失会对 OLSR 的正常工作产生严重的影响, 造成其最优路径不断地改变, 如

表 1 所列。频繁的路径改变也进一步恶化了 OLSR 的性能表现,降低了带宽,增大了丢包率。由于 OGM 的丢失对 B. A. T. M. A. N 的路由策略不会造成影响,因此 B. A. T. M. A. N 的路由稳定程度要好于 OLSR。

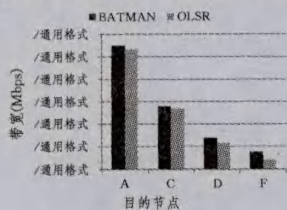


图 7 带宽对比

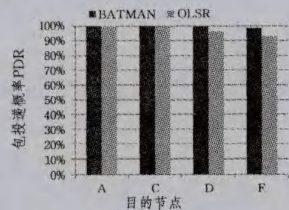


图 8 低负载下的包投递概率 PDR

表 1 通信恢复时间及最优路径切换次数

路由协议	目的节点	最优路径切换次数	通信恢复时间(s)
B. A. T. M. A. N	A	0	2.4
	C	12	
	D	13	
	F	21	
OLSR	A	0	4.2
	C	14	
	D	27	
	F	41	

图 10、图 11 是在网络中加入较高 UDP 负载(300kbps)情况下的包投递概率和回路时延。可以看到,随着网络负载的增加,信道的可用资源减小,节点的转发处理压力增大,一方面增大了网络丢包率(包投递概率减小),另一方面增大了回路时延。在较高负载下,OLSR 的包投递概率急剧下降,在目的节点为 F 时,甚至仅有 50%左右,比低负载时下降了约 40%,极大地影响了通信的可靠性。HELLO 帧和 TC 帧的丢失造成网络拓扑信息无法成功同步是包投递概率下降的主要原因。B. A. T. M. A. N. 可以更好地容忍网络中的较高负载。相比低负载的情况,包投递概率最多也仅下降了 10%左右(当目的节点为 F 时,包投递概率约为 88%),这得益于 B. A. T. M. A. N. 统计管理帧丢失的路由策略。

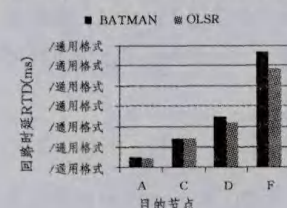


图 9 低负载下的回路时延 RTD

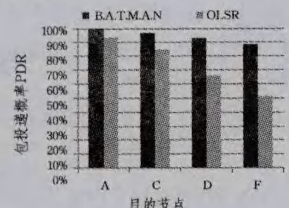


图 10 高负载下的包投递概率 PDR

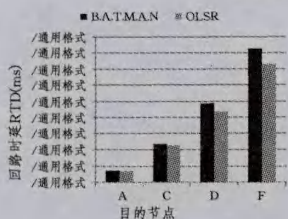


图 11 高负载下的回路时延 RTD

通信恢复时间的测试结果如表 1 所列。可以看到, B. A. T. M. A. N 比 OLSR 的通信恢复时间更短。OLSR 无法主动检测到链路断开,只能依靠超时无效机制被动等待,直到拓扑信息更新同步完成才能切换路径,恢复通信。相比 OLSR, B. A.

T. M. A. N 通过周期性地发送 OGM 检测链路的丢包率变化并感知目前的链路状态,及时地根据路由判据结果切换最优路径,缩短了通信的恢复时间,使整个机制更加主动。由此可见, B. A. T. M. A. N 比 OLSR 更加适合于有较高移动性的网络。

结束语 本文介绍了一种较新的无线 Mesh 网络路由协议——B. A. T. M. A. N. 该协议利用统计学的思想将路由管理帧的投递成功率作为路由判据,消除了路由管理帧的丢失对路由策略的影响,非常适合于不稳定的无线环境。本文介绍了 B. A. T. M. A. N 的工作机制并利用测试网络将其与 OLSR 进行了对比。结果显示, B. A. T. M. A. N 在带宽以及包投递概率上优于 OLSR,并且能够容忍更大的网络负载,虽然在回路时延上没有优势,但是 B. A. T. M. A. N 显然更适合于以数据传输为主的无线网络应用。未来的工作是完善测试网络,并将 B. A. T. M. A. N 与流行的路由协议(HWMP、BABEL 等)进行对比测试,以进一步了解其性能。

参考文献

- [1] 方旭明. 下一代无线因特网技术: 无线 Mesh 网络[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006: 1-31
- [2] Abolhasan M, Hagelstein B, Wang J C-P. Real-world performance of current proactive multi-hop mesh protocols[C]// Proceedings of 2009 15th Asia-Pacific Conference on Communications, APCC 2009, Shanghai, China, 2009: 44-47
- [3] Clausen T, Jacquet P. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) [EB/OL]. <http://datatracker.ietf.org/doc/rfc3626/>, 2003-10
- [4] Perkins C, Belding-Royer E, Das S. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing [EB/OL]. <http://datatracker.ietf.org/doc/rfc3561/>, 2003-07
- [5] Neumann A, Aichele C, Lindner M, et al. Better Approach To Mobile Ad-hoc Networking (B. A. T. M. A. N.) [EB/OL]. <http://datatracker.ietf.org/doc/draft-wunderlich-openmesh-mesh-routing/>, 2008-04-07
- [6] Leonard B, Makoto I, De Marco Giuseppe, et al. Performance analysis of OLSR and BATMAN protocols considering link quality parameter[C]// Proceedings of 2009 International Conference on Advanced Information Networking and Applications, AINA 2009, Bradford, United Kingdom, 2009: 307-314
- [7] Wang J C-P, Hagelstein B, Abolhasan M. Experimental Evaluation of IEEE 802.11s Path Selection Protocols in a Mesh Testbed[C]// Proceedings of 2010 4th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS). Gold Coast, Australia, 2010
- [8] Hundebøll M, Ledet-Pedersen J. Inter-Flow Network Coding for Wireless Mesh Networks [D]. Aalborg University, 2011
- [9] Lundgren H, Nordström E, Tschudin C. Coping with communication gray zones in IEEE 802.11 based ad hoc networks[C]// Proceedings of the 5th ACM International Workshop on Wireless Mobile Multimedia, WOWMOM 2002, Atlanta, GA, United States, 2002: 49-55
- [10] Johnson D, Ntlatlapa N, Aichele C. A simple pragmatic approach to mesh routing using BATMAN[C]// Proceedings of 2nd IFIP International Symposium on Wireless Communications and Information Technology in Developing Countries, CSIR, Pretoria, South Africa, 2008
- [11] Bialkowski K, Portmann M. Design of Testbed for Wireless Mesh Network [C]// Proceedings of Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2010 IEEE, Toronto, Ontario, Canada, 2010: 2010