

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.02.021

## 短波广域网中扩展 ARP 的跨层混合式路由协议研究

赵越超<sup>1</sup>, 杨帆<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077; 2. 总装备部驻绵阳地区军代室, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 针对短波通信传输距离远的特性, 为综合解决短波广域网控制开销大和时延高的问题, 根据跨层设计和混合式路由协议的思想, 在提出扩展地址解析协议(xARP)的基础上, 提出 DSR 协议的改进方案短波 DSR (HFDSR)。然后, 利用 OPNET 仿真软件实现了 xARP 和 HFDSR 协议, 并搭建了短波广域网的网络模型。在与标准 DSR 和 OLSR 路由协议的仿真比较后, 给出了 HFDSR 协议的性能分析。研究结果可为短波广域网路由协议的设计提供参考。

**关键词:** 短波广域网; 扩展地址解析协议; 短波动态源路由协议; 跨层设计; 混合式路由协议

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A

## Research on Composite Route Protocol with Cross Layer of Extended ARP for HF WAN

ZHAO Yue-chao<sup>1</sup>, YANG Fan<sup>2</sup>

(1. College of Telecommunication Engineering, Air Force Engineering University of PLA, Xi'an 710077, China;

2. PLA Military Representative Office in Mianyang Region, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** Aiming at the property of long distant transmission of short wave communication, in order to solved these problem of big spending and high delay time for high frequency (HF) wide area network (WAN), according to the idea of cross layer design and composite route protocol, on the basis of Extended ARP is presented, put forward HFDSR improve project. Then xARP and HFDSR are implemented using OPNET simulation software, and building net model of HF WAN. The performance of HFDSR is analyzed, and compared to that of the standard DSR and OLSR. The results of study are proposed providing reference for HF WAN routing protocols design.

**Keywords:** HF WAN; Extended ARP; HFDSR; Cross layer design; Composite route protocol

### 0 引言

短波通信因其建设和维护的费用低, 设备使用简单, 在无线通信领域中占有重要地位, 各国也加大对短波网络技术的研究。一些短波网络经过试验改进, 构成了更大范围的短波广域网(HFWAN)<sup>[1]</sup>。

路由协议是短波广域网的关键技术。由于短波的天波信道是时变信道, 传输可靠性差, 节点可能在短时间内无法与其它节点通信, 造成节点加入/退出网络; 为了降低暴露和被摧毁的可能性, 节点需要移动, 而节点的移动可能导致网络拓扑结构的频繁变化。使得人工源路由、静态路由等不能满足短波广域网对路由业务的需求。而自组网路由协议设计可为短波广域网路由协议提供参考<sup>[2]</sup>。故对短波广域网中扩展 ARP 的跨层混合式路由协议研究。

### 1 自组网路由协议

根据路由发现策略的不同, 将自组网路由协议分为 3 大类<sup>[3]</sup>: 先应式路由协议、反应式路由协议

以及将两者综合在一起的混合式路由协议。

先应式路由协议又称为表驱动 (table-driven) 路由协议, 其路由发现策略为: 节点通过周期性地广播路由信息, 主动发现路由、交换路由信息。其优点是当有节点需要通信时, 只需要在路由表中查找到目的节点的路由, 就可以发送数据, 所需的延时很小。缺点是为了使路由表能尽可能地反映当前拓扑结构的变化, 需要花费大量的开销以维护路由信息。典型的先应式路由协议有 OLSR<sup>[4]</sup>等。

反应式路由协议又称为按需驱动 (on-demand) 路由协议, 其路由发现策略为: 只在源节点有路由需求时才按需启动路由建立过程, 不需要定期更新路由。反应式路由协议的优点是无需周期性地广播路由信息, 节省了网络资源, 减少了网络传输开销, 并能适应具有移动性的自组网。缺点是路由发现机制导致了路由建立时延较大, 难以满足实时性业务的需要。典型的反应式路由协议有 DSR<sup>[5]</sup>等。

混合式路由协议是综合了先应式和反应式路

收稿日期: 2009-10-11; 修回日期: 2009-11-05

作者简介: 赵越超 (1984-), 男, 辽宁人, 硕士研究生, 从事通信网研究。

由协议特点的路由协议，其路由发现策略为：在局部范围内使用先应式路由协议，维护高实时性的路由信息。当目的节点超过一定范围时，使用反应式路由协议查询路由。即混合式路由协议发挥先应式和反应式各自的优越性又尽量避免各自的不足，对时延和网络开销进行了折中。

因短波通信的带宽窄，故网络开销大的先应式路由协议不适合短波广域网。又由于短波通信的定频和交织等过程时延较大，如果再使用时延高的反应式路由协议将无法适应短波广域网的需要。而现有的混合式路由协议并不是具体的协议，只为了完成功能所提出的要求。故针对短波通信特点的混合式路由协议短波广域网路由协议的重要研究方向。

## 2 xARP (扩展地址解析协议)

地址解析协议 (Address Resolution Protocol, ARP)<sup>[6]</sup>位于 OSI 网络七层模型中的第二层—数据链路层。其作用是网络层和媒体访问控制(Media Access Control, MAC)子层<sup>[7]</sup>提供地址映射。

ARP 高效运行的关键是由于每个主机上都有一个 ARP 高速缓存。ARP 高速缓存中存放了最近的 IP 地址到硬件地址之间的映射记录。

这些映射记录中的 IP 地址本质上是路由信息，虽然仅仅是到达部分“一跳”邻居的路由信息。由于短波能通过电离层反射实现远距离通信，通常一跳就能实现数千公里的通信。因此，短波广域网中大部分的通信业务只需要一跳即可完成，而其余大部分的业务在两跳之内就能完成<sup>[8]</sup>。这就使 ARP 高速缓存中的“一跳”路由信息显得弥足珍贵。

硬件类型		协议类型	
硬件地址长度	协议地址长度	计数字段	
发送端硬件地址		发送端 IP 地址	
接收端硬件地址		接收端 IP 地址	
邻居节点 IP 地址 1	邻居节点 IP 地址 2		
邻居节点 IP 地址 3	邻居节点 IP 地址 4		

⋮

图 1 xARP 分组格式

xARP (extended ARP, 扩展 ARP) 的基本思想是充分利用 ARP 高速缓存中的路由信息，通过重新定义的 xARP 分组格式，将 ARP 高速缓存中的路由信息广播给其它节点并上传至网络层，为网络层提供路由服务。图 1 中的邻居节点 IP 地址即为 ARP 高速缓存中的 IP 地址，而计数字段记录了其数目。由于 xARP 高速缓存的缓存容量有限，缓存中的信息动态变化。要想即时地将信息发送出去，就

要采取周期性广播的方式。因此，需要将 ARP 按需的请求/应答分组发送机制改为主动地周期性广播 xARP 分组。

当有分组从网络层(上层)到达，即有数据分组需要 xARP 为其提供地址解析时，xARP 主要完成以下工作：

- 1) 在到达 IP 数据分组中查找下一跳 IP 地址并检查 xARP 高速缓存中是否存在其地址解析信息；
- 2) 将存在地址解析信息的 IP 数据分组通过下一跳 MAC 地址发送出去，并更新 xARP 高速缓存中的条目信息；
- 3) 将暂时不存在地址解析信息的 IP 数据分组放入队列中，等待收到需要的地址解析信息。

当有分组从 MAC 子层(下层)到达时，xARP 主要完成以下工作：

- 1) 将不是 xARP 分组的到达分组上传给网络层；
- 2) 从到达的 xARP 分组中得到源节点的 IP 和 MAC 地址并利用其更新 xARP 高速缓存；
- 3) 从到达的 xARP 分组中得到源节点的邻居地址并连同源节点的 IP 地址一起上传给网络层。

虽然广域网中大部分的业务集中在两跳之内，但仍然存在少量多于两跳的情况。为解决这些情况，使协议能满足短波广域网的需要。根据混合式路由协议的思想，应使用按需查询路由的反应式路由协议作为区域外路由协议。

## 3 DSR 路由协议的跨层改进方案—HFDSR

DSR 路由协议作为经典的反应式路由协议已成为混合式路由协议中区域外路由协议的重点。

因为 xARP 协议属于数据链路层，而 DSR 路由协议属于网络层。两者间想要传递数据分组之外的信息，只有通过跨层设计思想对 DSR 路由协议进行改进。在 xARP 所拥有的信息中，只有 IP 地址对 DSR 有帮助。故跨层传递的信息也是通过 xARP 分组带来的 IP 地址。为了能对 IP 地址处理，在传递 IP 地址的同时，还需要传递 IP 地址的数目等参数。因为 DSR 的缓存中存储的是源路由，所以需要 IP 地址进行处理，将其做成逐跳的源路由。

HFDSR 在收到从 xARP 上传来的 N 个 IP 地址、xARP 分组源节点的 IP 地址和 N 的值之后，需将其制作成逐跳的源路由。因为 N 个 IP 地址是 xARP 分组源节点的邻居地址，所以这 N 个 IP 地址是源路由的目的节点地址，而下一跳地址应为 xARP 分组源节点的 IP 地址。因此，将 xARP 分组源节点的 IP 地址分别添加到 N 个 IP 地址的前面。

这样就做成了 N 条两跳的源路由。最后, 将这 N 条源路由插入到 DSR 路由缓存的适当位置。

因为在短波广域网中大部分的通信业务将在两跳之内完成。所以, 对于大多数情况, HFDSR 能够直接在路由缓存中查找到路由信息, 而不需要发送路由请求。这样, 不但降低了路由请求的开销, 更重要的是减小了路由建立的时间, 进而减小了网

络的端到端时延。

### 4 仿真实现及结果分析

OPNET Modeler 仿真工具采用进程模型、节点模型和网络模型的由下到上的三层建模机制。按照三层建模机制的顺序讲解仿真模型的实现过程。

xARP 进程的有限状态转移方式如图 2。

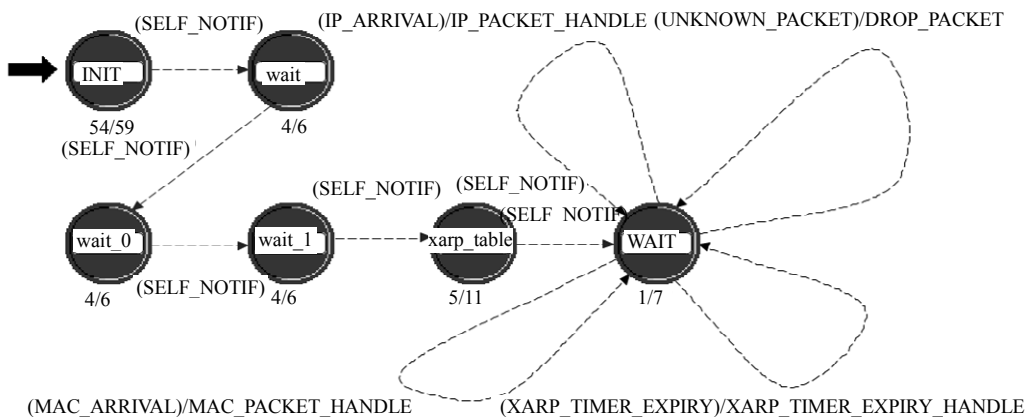


图 2 xARP 进程的有限状态机结构图

xARP 进程完成初始化后, 就进入“WAIT”状态。大部分时间里 xARP 都处于“WAIT”状态, 直到有中断到来时, 才根据对中断的类型和中断码的判断执行相应的操作。共有 4 种判断分别对应着 4 种操作, 分别是:

1) 当中断类型为自中断时, 条件服从“XARP\_TIMER\_EXPIRY”, 执行 XARP\_TIMER\_EXPIRY\_HANDLE。其功能为每间隔一个 xARP 分组发送平均时间间隔 (本仿真的 xARP Interval 为 15 s) 就广播发送一个 xARP 分组。

2) 当中断类型为流中断且中断流来自网络层时, 条件服从“IP\_ARRIVAL”, 执行 IP\_PACKET\_HANDLE。其功能是处理从网络层到达的分组。

3) 当中断类型为流中断并且中断流来自 MAC 子层时, 条件服从“DLL\_ARRIVAL”, 执行 MAC\_PACKET\_HANDLE。其功能为处理从媒体访问控制子层到达的分组。

4) 当中断类型为流中断并且到达的中断流无法识别或者并非来自于网络层和 MAC 子层时, 条件服从“UNKNOWN\_PACKET”, 执行 DROP\_PACKET。其功能是 xARP 进程丢弃此中断流中的分组。

然后, 在 dsr 进程模型中添加了一个“xARP\_UPDATE”的状态。当 xARP 进程执行 MAC\_PACKET\_HANDLE 时, 会向 HFDSR 进程发出一个

进程中中断。当 HFDSR 进程收到这个进程中中断时, 条件服从“xARP\_NOTIFICATION”, 进程就进入“xARP\_UPDATE”状态。此状态的功能是将 xARP 上传来的 IP 地址信息制作成逐跳的源路由并将源路由插入路由缓存中适当的位置。

HF 节点模型按照完整的 TCP/IP 协议栈搭建, 主要包括物理层的无线发射机和接收机、媒体访问控制子层的 MAC 模块、网络层的 IP 模块组、传输层的 UDP 模块和应用层的 Traffic Source 模块等。

在以上各模块搭建完成的基础上, 通过分组流线 (实线) 和统计线 (虚线) 的连接实现各模块间的信息交互。完成的短波广域网节点模型如图 3。

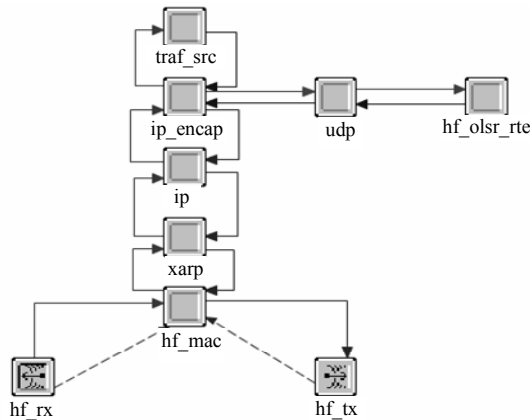


图 3 HF WAN 节点模型

在节点模型完成的基础上搭建的短波广域网网络模型如图 4。

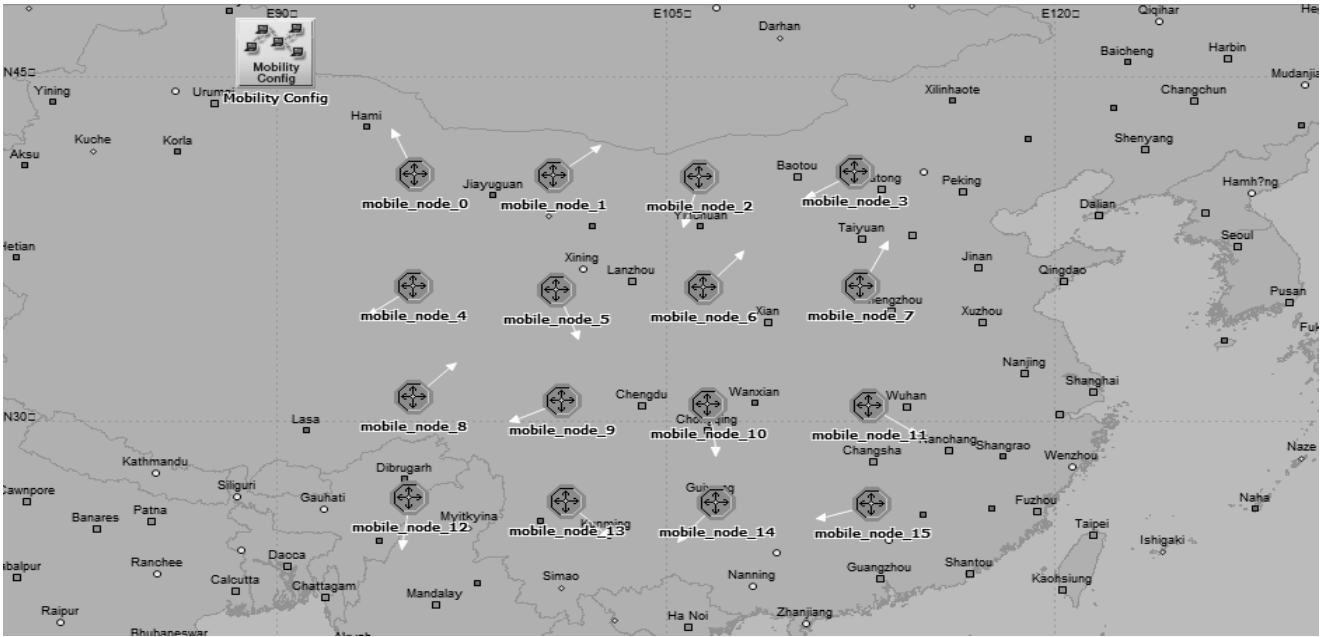


图 4 HF WAN 网络模型

仿真在节点移动速度分别为 0 m/s、5 m/s、10 m/s、15 m/s、20 m/s、25 m/s 时，针对路由协议

分别为 HFDSR、OLSR 和 DSR 进行仿真，性能比较如图 5、图 6 和图 7。

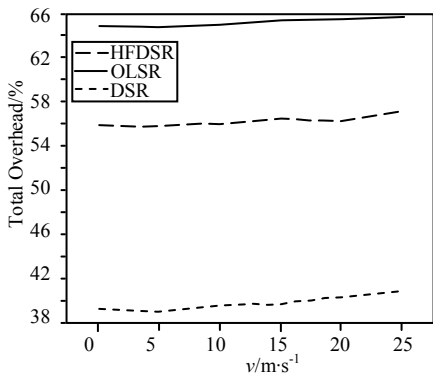


图 5 不同节点移动速度时 3 种协议的总开销

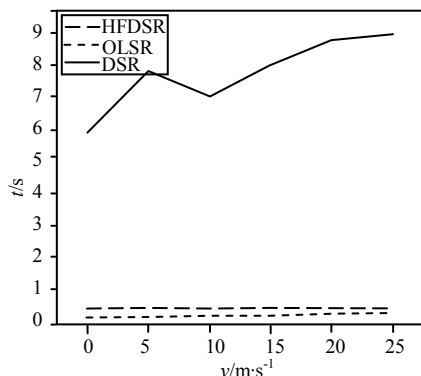


图 6 不同节点移动速度时 3 种协议的路由发现时间

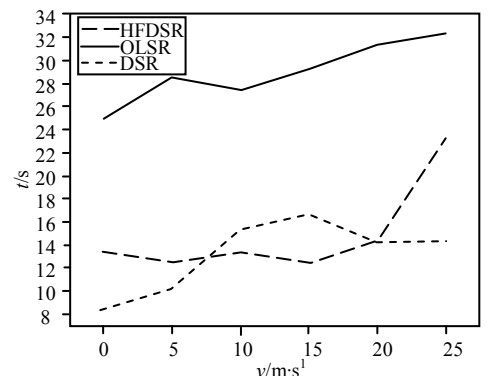


图 7 不同节点移动速度时 3 种协议的平均端到端时延

由于其反应式的机制，DSR 只有在有路由需求时才启动路由发现，所以开销明显小于另外两种协议。HFDSR 的开销其次，OLSR 由于其先应式的机制，周期地广播路由信息，所以开销最大。HFDSR 的开销明显低于 OLSR。

平均端到端时延几乎是另外 2 种协议的 2 倍以上。

DSR 在有业务分组发送时需要路由发现，因而路由发现时间高于另外 2 种协议。而 OLSR 几乎不需要等待就可获得发送业务分组的路由信息，所以路由发现时间最小，几乎为 0。由于存在少数通信距离多于两跳的情况，所以 HFDSR 仍然有路由发现过程存在，因此路由发现时间略高于 OLSR。

综上，HFDSR 的开销低于 OLSR，同时，平均端到端时延明显低于 DSR，且在节点移动速度大于 10 m/s 时低于 OLSR。由此验证 HFDSR 符合混合式路由协议的设计思想，能满足短波广域网的要求。

当节点移动速度大于 10 m/s，HFDSR 的平均端到端时延低于 OLSR，对速度变化不敏感。OLSR 和 DSR 的平均端到端时延对速度较为敏感。DSR

### 5 结束语

OPNET 仿真验证证明：HFDSR 以小于先应式路由协议的开销完成了路由功能，并获得了近似先应式路由协议的低时延性能，满足短波广域网对路由协议开销小、时延低的要求。但是现有的研究并没有使短波广域网路由协议形成统一的标准。研究如何通过设计路由协议提高短波广域网的性能具有很强的现实意义。

(下转第 73 页)

量数据间或测量数据与系统已有知识之间的互联关系, 一次性或分多次向导航系统全局性空间投影, 形成系统的状态估计, 得到更全面、可靠的导航信息。实验证明, 将组合导航技术用于无人机动平台, 其性能良好, 能满足无人机动平台的导航需要。

**参考文献:**

[1] 曹建平, 周恒军. 现代战争给通信对抗带来的思考[J]. 海军航空工程学院学报, 2000, 15(9): 387-388.  
 [2] 李鸣. 航空工程手册:航电综合类[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.  
 [3] Ching-Chih Tsai, Hung-Hsing Lin, Szu-Wei Lai.

Multisensor 3D Posture Determination of a Mobile Robot Using Inertial and Ultrasonic Sensors[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2005, 42(2): 317-335.  
 [4] Carlson EA, Beraducci M P. Federated Kalman filter Simulation Results [J] Navigation, 1994, 41(3): 297-321  
 [5] Fernando Lizarralde, Nunes Eduardo V L, Liu Hsu, Wen J T. Mobile Robot Navigation using Sensor Fusion[J]. Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2003, 17(6): 458-463.  
 [6] Atanas Georgiev, Allen P K. Localization Methods for a Mobile Robot in Urban Environments. IEEE transactions on robotics, 2004, 20(5): 851-864.  
 [7] 宋国栋. 移动机器人组合导航系统设计与应用的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006: 15-21.

\*\*\*\*\*

(上接第 59 页)

**4.3 综合电子对抗系统作战能力评估模型**

根据综合电子对抗系统基本作战模式, 系统的作战能力与每个子系统均有密切关系, 任何一个子系统的作战能力差都会影响到整个系统。因此, 综合电子对抗系统的作战能力由侦察发现能力  $U_1$ 、信息传输能力  $U_2$ 、指挥控制能力  $U_3$ 、进攻能力  $U_4$ 、和作战适应能力  $U_5$  以甲类模型聚合,  $w_i$  为构成该指标的第  $i$  个下层指标  $U_i$  的权重系数:

$$U = \prod_{i=1}^5 \sqrt[5]{(1+U_i)^{5w_i}} - 1$$

基于图 2 的综合电子对抗系统作战能力评估指标体系与作战任务, 二级指标以如下思路进行聚合: 侦察发现能力、信息传输能力和指挥控制能力均由对应三级指标以甲类模型聚合, 进攻能力和作战适应能力由对应三级指标以乙类模型聚合。以电子对抗系统的性能参数/战技指标的取值作为底层输入, 可

逐层计算各级上层指标值。直至计算到最顶层, 得出综合电子对抗系统作战能力的最终评估值。

**5 结束语**

该研究只考虑了 2 种模型, 还不能完全地反映客观实际。接下来, 将进一步研究综合电子对抗系统的作战机理, 以提炼出更多的指标聚合模型。

**参考文献:**

[1] 汪致远, 童志鹏. 现代武器装备知识丛书, 电子战和信息战技术与装备[M]. 北京: 原子能出版社、航空工业出版社、兵器工业出版社, 2003: 28-68.  
 [2] 罗鹏程, 傅攀峰, 周经伦. 武器装备体系作战能力评估框架[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(1): 72-75.  
 [3] 赵焕臣. 层次分析法[M]. 北京: 科学出版社, 1986.  
 [4] 陈健, 张锡恩, 李忠民, 等. 导弹装备权重计算方法选取研究[J]. 火力与指挥控制, 2005, 30(增刊): 43-45.  
 [5] 宋道军, 张安. 空袭突防作战中雷达对抗作战效能评估研究[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 125(4): 991-993.  
 [6] 李智生, 李钊. 基于随机服务系统的雷达对抗效能评估[J]. 无线电工程, 2006, 36(11): 56-58.

\*\*\*\*\*

(上接第 66 页)

**参考文献:**

[1] D.G.Kallgren, J-W Smaal, M.Gerbrands, M.Andriess. An Architecture for Internet Protocol over HF: Allied High-Frequency Wide-Area Networking using STANAG 5066 [R]. NC3A, Netherlands: NATO/PFP UNCLASSIFIED-APPROVED FOR INTERNET TRANSMISSION (RTO-IST-054), IEEE Military Communication Conference,2005.  
 [2] NATO Standardization Agreement 5066: Profile for High Frequency (HF) Radio Data Communications, version 1.2, NATO Standardization Activity reference 0114-C3/5066, 27 January 2004.  
 [3] 王金龙, 王呈贵, 吴启晖, 等. Ad Hoc 移动无线网络[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.  
 [4] Jacquet P., Muhlethaler P., Clausen T. et al. Optimized link

state routing protocol for ad hoc networks[C]. In: Proceedings of the 2001 International Multi-Topic Conference (IEEE INMIC 2001). Lahore, Pakistan: IEEE, 2001: 62-68.  
 [5] Johnson DB, Maltz DA, Broch J. DSR: The dynamic source routing protocol for multiple wireless ad hoc networks[C]. USA: Addison-Wesley, Ad Hoc Networking, 2001: 139-172.  
 [6] W. Richard Stevens. TCP/IP Illustrated Volume 1: The Protocols[M]. 范建华, 等. 译. 北京: 机械工业出版社, 2000.  
 [7] B.Crow et al. Investigation of the IEEE 802.11 Medium Access Control (MAC) Sublayer Functions[C]. Kobe, Japan: Proc. INFOCOM 97, 1997(4):126-133.  
 [8] E.E. Johnson, et al. Routing in HF Ad-Hoc WANS[C]. Monterey, Canada: Proceedings of MILCOM 2004, 2004: 1040-1046.