

无人机通信网络路由协议研究

陈磊, 王永生, 刘真

(西北工业大学电子信息学院, 西安 710072)

摘要: 为了实现无人机通信网络中数据的有效和实时传输, 在研究现有网络路由协议的基础上, 基于 Dijkstra 算法设计和实现了无人机通信网络链路综合性能最优优先(BILPF)路由选择协议, 提出了无人机通信网络中节点之间进行信息交换的节点状态通告协议, 并给出了仿真结果。

关键词: 无人机; 节点状态通告协议; 链路综合性能最优优先

Research on Routing Protocol in UAV Communication Network

CHEN Lei, WANG Yongsheng, LIU Zhen

(School of Electronics and Information, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072)

【Abstract】 To realize an effective and real-time data transmission in UAV communication network, on the basis of the study of routing protocols in existing networks, a novel best integrated link performance first routing protocol which utilizes Dijkstra algorithm is designed and realized. A node state addressing protocol is proposed for information exchange between UAVS in UAV communication network. The protocol is simulated and the results is given.

【Key words】 UAV; node state addressing protocol; best integrated link performance first

1 概述

随着无人机技术的不断进步和通信载荷能力的不断提升, 使得利用高空无人机作为中继平台为战区提供通信服务成为可能。美英等国均已展开了此项研究并取得了一定的成果^[1,2]。在远程作战和纵深战场上, 为了确保战场信息的有效传输, 提供通信的高空中继无人机可能需要很多架, 从而使信息需要多次中继才能到达目的地。

利用无人机进行超视距多链路通信中继的模型^[3]如图 1 所示。这是一种基于分层管理概念的中继模型。

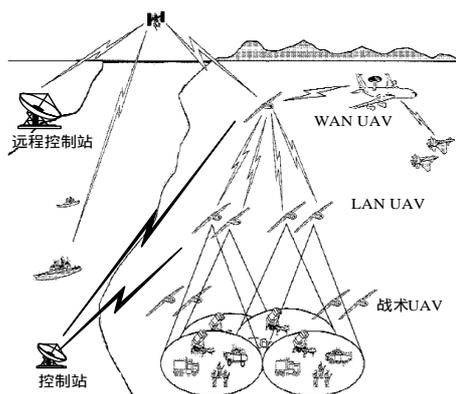


图 1 无人机超视距多链路通信中继模型

该模型由 3 层通信平台组成, 位于最底层的是各种战术无人机(TUAV)和地面战斗部队; 位于第 2 层的是直接面向战区的局域网无人机(LANUAV), 该层提供 50km ~ 200km 战区范围的通信覆盖, 在未来可提供语音、数据和视频等标准通信中继服务和数据广播服务; 最顶层是广域网无人机(WANUAV), 其主要功能是完成战区与战区之间、局域网无人机与其它指挥控制平台(如空中预警机)之间, 以及通过卫

星与远程控制站之间的通信中继。LANUAV 可以利用现有的 UAV 加大其通信载荷来实现。WANUAV 的高度位于同温层, 一般采用高空长航时无人机(HAEUAV)来担任, 如美国的“全球鹰”。

本文充分考虑无人机通信网络分层管理的特点, 在研究现有网络动态路由协议的基础上, 提出了用于无人机之间进行信息交换的节点状态通告协议和用于数据选路的链路综合性能最优优先路由算法, 并对其进行了仿真。

2 动态路由算法

目前网络中主要用到的动态路由算法有距离矢量(DV)路由算法和链路状态(LS)路由算法两种。

2.1 距离矢量(DV)路由算法

距离矢量路由算法基于分布式 Bellman-Ford 路由算法, 也叫 Ford-Fulkerson 算法, 在此算法中, 每个路由器维护一张表(矢量), 表中列出了当前已知的到每个目标的最佳距离以及所使用的线路。通过在邻居之间相互交换消息, 路由器不断地更新它们内部的表。

路由表包含 2 部分: (1)为了到达该目标路由器而首选使用的输出线路; (2)到达该目标路由器的时间估计或者是距离估计值。所使用的度量可能是跳数或者是以毫秒为单位计算出的时间延迟, 又或者是沿着该路径排队的分组数据以及其他的度量值。

距离矢量路由算法在理论上是可以工作的, 尤其是在小型网络中(少于 100 个路由器)运行效果比较好, 但是当节点数目增加时, 算法存在一个严重的缺陷, 那就是虽然它总是

基金项目: 国防 973 项目基金资助

作者简介: 陈磊(1981 -), 男, 硕士研究生, 主研方向: 无线网络通信协议; 王永生, 教授、博士生导师; 刘真, 助理工程师

收稿日期: 2006-07-16 **E-mail:** chlpd@mail.nwpu.edu.cn

能够得到正确的结果，但是它收敛的速度可能非常慢，并且距离矢量存在无穷计算的问题，极有可能造成严重的网络拥塞并且消耗更多的 CPU 资源。也正因此，距离矢量路由算法逐渐被链路状态路由算法所取代。

2.2 链路状态(LS)路由算法

链路状态路由算法的思想非常简单，可以用以下几个部分来加以描述。每个路由器都要完成以下的工作：

- (1)发现邻居节点，并获取其网络地址；
- (2)获取到各个邻居节点的延迟或者开销；
- (3)构造出一个分组，分组中包含所有它刚刚知道的信息；
- (4)将这个分组发送给所有其他的路由器；
- (5)计算出到每一个其他路由器的最短路径。

对于上述 5 个步骤，前个步骤主要是用来进行邻居的发现，或者就可以认为是邻居发现协议，路由表的生成在第(5)步。邻居发现用于获取完整的拓扑结构和所有的链路参数信息，并将其分发给每一个路由器。路由表的生成采用“图论理论”算法或者是最短路径优先算法进行。

链路状态路由算法目前应用非常广泛。现有网络中最为常见的内部网关协议开放最短路径优先(OSPF)路由协议^[5]采用的就是链路状态算法。

3 无人机网络节点状态通告协议

为了让通信节点之间互相了解对方的状态，在无线状态下通过链路通告来进行信息交互，从而相互之间获取节点的位置信息。由无人机网络的分层特性，提出了一种节点状态通告协议，让网络中相邻的节点交互信息，以此来确认链路状态和对方运行情况。无人机通信网络中，链路通告是分层进行的，当某节点情况有所改变的时候要让整个网络了解，扩散的信息非常大，为了防止形成广播风暴，必须考虑去除一些不必要的链路通告的扩散。下面对这些问题分别进行讨论。

(1)地面站和高空中继机进行握手通信。高空中继机位置相对固定，地面站可以利用定向天线定时向中继机发出广播呼叫，中继机收到此呼叫后进行应答，然后将自己的链路状态数据库的信息通告给指挥中心，指挥中心判断和自己的链路状态数据库中相关的内容是否一致。如果不一致，指挥中心修改自己的链路状态数据库，并置这次发送来的链路状态信息为最新；如果一致，则保持。中继机的链路状态数据库，不仅包含自身的位置信息和通信设备信息，而且包括通过此中继机进行接入的中继机和战术无人机的位置信息、运动参数信息和通信设备信息。

(2)中继机和中继机之间进行握手通信。中继机之间采用扩散性的广播进行链路状态通告。为了控制扩散过程，使得网络不至于发生广播风暴，中继机之间的链路通告只在基于功能分层的高空无人中继平台层内进行传播，不向外进行扩散。同时，所发出的每一个通告分组都包含一个序列号和此分组的一个生存值信息，序列号随着每一个新的分组递增，而生存值则会随着时间的推移而递减。每个中继路由器记录下它所看到的所有(源路由器、序列号、生存值)对。当一个新的链路状态分组进来的时候，路由器在已经看到的分组列表中检查这个新进来的分组。如果它是新的，那么就在中层将此分组广播出去。如果是一个重复分组，则将其丢弃，如果一个分组的序列号小于当前所看到的来自该源路由器的最大序列号，则它将会被当作过时分组而拒绝，因为该路由器已经有了更新的数据。检查序列号的同时，也要检查生存期的值。生存期的存在是为了弥补扩散法的一些不足，生存

期为 0 的时候，来自该路由器的信息就会被丢弃，并且在初始扩散的过程中，每个路由器也要递减生存期的值，这样可以确保没有分组丢失。通过节点间不停的链路状态通告，使得中继机不断更新自身的数据库信息，最终使得链路状态数据库达到一致，此时中继机被定义为进入全面邻接状态，如果不一致，则双方交换更新过的链路状态信息，直到最终进入全面邻接状态。

(3)中继机和战术无人机之间进行握手通信。中继机定时发送定向广播呼叫，战术无人机接收到以后，将自身的情况汇报给中继机，中继机对自己的链路状态信息库进行更新。如果战术无人机此时已经归属一个中继机，则记录发送广播呼叫的新的中继机在它的可选择接入表中，作为备份中继。

(4)指挥中心和战术无人机群之间的握手通信。如果指挥中心和战术无人机群距离比较近，指挥中心可以和战术无人机进行通信，收到指挥中心的呼叫广播后，战术无人机发送自身的状态信息，指挥中心对自己的链路状态信息库直接进行更新，而不再需要通过中继平台进行中继。

4 无人机网络路由选择算法

在距离矢量路由和链路状态路由算法的基础上，本文提出了一种基于 Dijkstra 算法的链路综合性能最优优先路由算法。

4.1 Dijkstra 算法

Dijkstra 算法也称为最短路径优先算法(SPF)。算法采用贪婪策略分阶段解决问题。每个阶段，选择距离起点路径最短的节点，贪婪表示该策略试图最大化其短期收益，即使发现一个新的节点之后需要改变原有决策也是如此。从图论的角度算法流程描述如下：

$$\begin{aligned} & \text{已知图} \\ & G = (V, E) \\ & V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\} \\ & D = (d_{ij})_{n \times n} \end{aligned}$$

是距离矩阵，求 v_1 点到其他各点的最短路径的算法如下，其中 $l(v_i)$ 表示 v_i 点与 S 集合中的点最短距离， S 是 V 的子集。

(1)初始化操作：

$$\begin{aligned} S & \leftarrow \{v_1\}, l(v_1) \leftarrow 0, l(v_i) \leftarrow \infty, i = 2, 3, \dots, n \\ \bar{S} & \leftarrow V \setminus \{v_1\} \end{aligned}$$

(2)若 \bar{S} 是空集，则输出结果并停止，否则转(3)。

(3)对 $v_i \in \bar{S}$ 的所有点计算：

$$l(v_i) = \min_{v_j \in S} \{l(v_j), l(v_j) + d_{ij}\}$$

(4)令 $l(v_{i+1}) = \min_{v \in \bar{S}} \{l(v)\}, S \leftarrow S \cup \{v_{i+1}\}$

$$\bar{S} \leftarrow \bar{S} \setminus \{v_{i+1}\}, i \leftarrow i + 1, \text{转(2)}。$$

4.2 链路综合性能最优优先算法

在无人机通信网络中，要考虑的不是 SPF 中的路径最短，而是要做到快速准确地将地面指挥中心的指令发送到执行作战任务的战术无人机群，以及将战术无人机的遥测信息和传感器数据传回到地面站，即考虑链路综合性能最优。很难用一个参数来表示节点之间的权值，而是要根据传输信息不同综合考虑链路性能。对于无线链路，其性能主要用吞吐率、时延和误码率来衡量。而链路的相关参数在计算得出之后通过前面所述的节点状态通告协议进行扩散，从而任何需要参与数据传输的节点均能得到相关的链路参数。

链路综合性能最优优先算法中所提出的最优并不是绝对的，而是根据信息不同而有所差别。对于测控信息而言，其数据量相对较小，对传输带宽要求较低，但需要准确快速

地发送到目的节点,要求较高的可靠性和尽量低的延迟。而战术无人机所采集到的传感器信息由于数据量比较大,因此对链路吞吐率要求比较高,并且与测控信息相比即使出现少量的错误对视频或者图像的整体效果影响也不是很大。该协议在搜索最优路径时,对于遥测遥控信息,所有连通的路径都满足测控信息的吞吐率需求,选择可靠性最高(误码率低)的链路;如果出现误码率相差不多的情况,选择时延小的路径(经过中继层数少的路径)。对于图像视频等任务信息,在满足最低误码率和延迟的要求的情况下,选取具有最大吞吐率的路径;如果吞吐率相等,选择延迟小的路径,最后才是选择误码率低的链路。

5 UAV 通信网络路由算法仿真

在以上讨论的基础上,对链路综合性能最优优先路由选择算法进行了仿真。在直径 1 200km 的范围内,地面控制站处于中心位置,海拔高度为 50m;分别指定不同数目的中继机和战术无人机,使其数目比为 1:3,所处位置随机分布,中继机的高度在 5 000m~8 000m 之间随机分布,战术无人机的高度在 200m~5 000m 之间随机分布。仿真程序采用 C++ 语言编写,VC++6.0 环境编译。运行环境为 Pentium4 2.8GHz 处理器,Windows XP 操作系统。仿真结果如表 1。

表 1 无人机网络节点数目与路由计算时间仿真结果

节点数目 \ 运算时间/ms	100 次	1 000 次	10 000 次	平均时间
10	32	219	2 016	0.20
50	578	5 719	57 079	5.71
100	2 297	22 843	223 959	22.39
200	10 031	100 204	-	100.2
300	25 314	253 031	-	253.03
400	49 797	497 860	-	497.86
500	83 859	838 406	-	838.41
1 000	453 922	-	-	4 539.2

图 2 直观地给出了无人机网络中节点数目和路由运算时间的关系曲线,从仿真结果可以看出,当无人机通信网络中的节点数目较少时,基于链路综合性能最优优先的路由选择算法的运算时间是比较短的。例如,维护更新由 100 架无人机组成的网络的路由表需要 22.39ms。如果将来链路性能计算和路由选择模块可以采用硬件来实现的话,速度还可能提

高。但是,当网络节点增加时,路由算法需要的时间迅速增加,与节点数目成二次曲线关系。说明大部分时间消耗在链路性能的计算和节点状态的扩散中。实际无人机通信网络中的节点数目不会太大,从效率上判断,链路综合性能最优优先的路由选择算法基本可以满足无人机通信网络数据传输的要求。

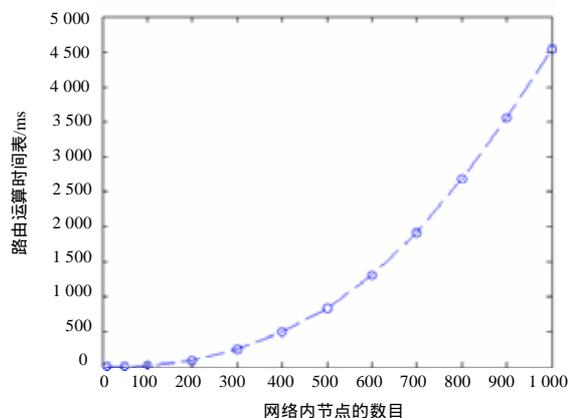


图 2 无人机网络节点数目和路由运算时间关系

6 结束语

针对无人机通信网络分层的特点,在研究现有网路动态路由协议的基础上,提出了适合于无人机通信网络的链路综合性能最优优先的路由选择协议和节点状态通告协议。仿真的结果表明,新的协议在网络节点比较少的情况下可以满足无人机网络数据传输的要求。

参考文献

- Jetal P F. Unmanned Aerial Vehicle Communications Relay[C]//Proc. of IEEE MILCOM'96. 1996: 47-51.
- Getal F S. BLOS Communications Technologies for the Deep Battle—a UK Perspective[C]//Proc. of IEEE MILCOM'00. 2000: 40-44.
- 罗卫兵, 王永生. 无人机平台的超视距多链路中继[J]. 遥测遥控, 2003, 24(2).
- 卢开澄. 计算机算法导引[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002-08.
- Moy J. Ascend Communications[S]. RFC 2328, 1998.

(上接第 140 页)

4 结束语

本文讨论了嵌入式集群平台的前端和后端的节能策略,提出一种针对嵌入式 Web 集群服务器的能耗节约方案,并将该方案应用于基于 Linux 的嵌入式 Web 集群服务器平台。实验结果表明,本方案的节能效果较标准的 Linux 内核以及目前所知的其他节能方案有明显提高。

参考文献

- Bohrer P, Elnozahy E N, Keller T, et al. The Case for Power Management in Web Servers[M]. Kluwer Academic Publishers, 2002.
- Elnozahy M, Kistler M, Rajamony R. Energy Conservation Policies

for Web Servers[C]//Proc. of the 4th USENIX Symposium on Internet Technologies and Systems. 2003.

- Elnozahy E N, Kistler M, Rajamony R. Energy-efficient Server Clusters[C]//Proc. of Workshop on Power-aware Computer Systems. 2002.
- Sharma V, Thomas A, Abdelzaher T, et al. Power-aware QoS Management in Web Servers[C]//Proceedings of the 24th IEEE Realtime Systems Symposium, Cancun, Mexico. 2003.
- Pillai P, Shin K G. Realtime Dynamic Voltage Scaling for Lowpower Embedded Operating Systems[C]//Proc. of the 4th IEEE Realtime Technology and Applications Symposium. 1998-06.