

doi: 10.7690/bgzdh.2020.04.013

无线 Mesh 网络在遥测传输中的应用

石治国, 高爱国

(中国人民解放军 92853 部队测试大队, 辽宁 兴城 125106)

摘要: 为满足飞行试验中同场多架飞机训练实时监控的要求, 设计一种基于网络电台的遥测传输系统。根据无线 Mesh 网络的结构与特点, 采用网状拓扑结构, 分析无线 Mesh 网络应用于遥测传输的关键技术, 对基于网络电台的遥测传输系统进行设计, 并通过飞行试验验证其有效性。试验结果表明: 该系统可以实现多架飞机的位置、速度、航迹等关键数据的实时传输与显示, 可靠性高, 能够满足飞行试验中对多架飞机近距离实时监控与指挥的试飞需求。

关键词: 无线 Mesh 网络; 飞行试验; 遥测

中图分类号: TP702 **文献标志码:** A

Application of Wireless Mesh Network in Telemetry Transmission

Shi Zhiguo, Gao Aiguo

(Test Team of No. 92853 Unit of PLA, Xingcheng 125106, China)

Abstract: In order to meet the requirement of real time monitoring of multi aircraft training in the same field in flight test, a telemetry transmission system based on network radio is designed. According to the structure and characteristics of wireless Mesh network, the key technology of wireless Mesh network applied in telemetry transmission is analyzed by using network topology structure. The telemetry transmission system based on network radio is designed and verified its effectiveness by flight test. The test results show that the system can realize the real time transmission and display of key data such as position, speed and track of multiple aircraft. It has high reliability and can meet the requirements of real time close-range monitoring and command of multiple aircraft in flight test.

Keywords: wireless Mesh network; flight test; telemetry

0 引言

当前国际上飞行试验领域普遍采用 IRIG06 遥测标准。该标准使用 S 或 L 波段, 以 PCM/FM 方式进行远程、单向传输。这种点对点的传输和组网方式设备成本高、频点有限、容易与附近遥测设备形成互相干扰, 已无法满足未来空地一体化战场的需要。随着无线电通信技术的新发展, 新的调制技术和传输方式成功应用于飞行试验遥测系统。笔者构建的网络电台遥测系统, 由多套机载网络电台及地面网络电台设备组成, 机载网络电台在数据传输上采用无线 Mesh 网络。这种新型遥测传输和组网方式能够实现多点对多点的网络连接和数据交换, 可满足飞行试验中多架飞机的近距监控试飞需求。

1 无线 Mesh 网络的结构及其特点

无线 Mesh 网络即多跳网络, 采用网状拓扑结构。如图 1 所示, 每个节点都可以作为接入点和路由器连接, 发送和接收信号, 且每个节点都可以与一个或多个节点进行通信和数据传输。

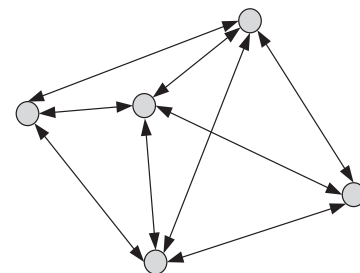


图 1 无线 Mesh 网络结构

无线 Mesh 网络具有以下优点:

- 1) 在这种 Mesh 网络结构中, 可以实现节点的快速连接和断开, 具有自组织、自愈合的动态适应能力, 可扩展性强, 可靠性高。
- 2) 各节点通过相邻节点以多跳方式实现多节点之间的网络通信, 当其中一个节点发生故障时, 可以及时切换到另一条路径上, 消除了中心接入点的限制, 没有单点故障, 保证了网络的畅通^[1-2]。
- 3) 具有高度灵活的网络拓扑结构, 每个节点都可以作为接入端, 同时具有路由和转发功能^[3-4]。为了在有限的带宽内增加传输距离, 可以将无线 Mesh

收稿日期: 2019-12-05; 修回日期: 2020-01-11

作者简介: 石治国(1979—), 男, 河南人, 硕士, 从事试验试飞测控技术总体及装备试验鉴定研究。E-mail: guozhishi@126.com。

网节点划分为多个区域, 相邻较远的区域可以重复使用频段, 具有极高的组网自由度。

2 无线 Mesh 网络关键技术

无线 Mesh 网络关键技术有载波调制技术 (coded orthogonal frequency division multiplexing, COFDM)、智能天线技术、自适应调制技术、自组织路由算法等。

2.1 COFDM 载波调制技术

由于无线频谱资源有限, 多个用户之间需要采用多址接入技术来共享同一频段。采用多址接入技术可以保证多个用户之间通信质量, 并提高频谱利用率。在无线 mesh 网中, 每个节点采用 COFDM。COFDM 具有良好的射频穿透性, 使用多个窄带子载波同时发射来避免频率选择性衰落效应, 有效避免多径传输效应导致接收端无法接收信号的问题, 并可有效对抗多径衰落、多普勒频移等效应的影响, 保证了节点在高速运动时进行流畅的双向通信。

2.2 智能天线技术

智能天线技术可以根据相邻节点的变化, 自动调整波束的方向来重新建立节点之间的联系。智能天线具有测向和波束成形能力的天线阵列, 可以增强系统的抗频率性衰落和抗多径衰落的能力, 提高系统容量。相对于定向天线和全向天线, 将智能天线应用于无线 Mesh 网可以简化设备和使用难度, 提高系统整体性能^[5]。

电磁信号在传输过程中因反射等原因会产生多径分量信号, 因此, 接收端设备可以利用多根天线分集技术接收来自不同路径的信号, 通过信号选择、合并形成总的信号。分集技术将分散的信号经过集中合并后, 减轻接收信号的衰落, 得到最大的信号增益, 有效缓解多径环境下的无线网络问题。分集的方式有空间分集、极化分集、频率分集、时分集等, 合并的方式有最佳选择式、等增益相加式、最大比值相加式等。

2.3 自适应调制技术

在无线 Mesh 网中节点之间的链路质量会受到干扰或者遮挡等恶劣因素的影响, 自适应调制技术根据传输链路的质量采用不同的调制编码方式, 每个节点通过实时采集与其他节点之间的收发信噪比来决定采用的调制编码方式。当链路信噪比低于该调制编码方式解调门限限定值时, 会自动切换到低

一级调制编码方式进行传输; 反之, 当链路信噪比高于该调制编码方式解调门限限定值时, 自动切换到高级调制编码方式进行传输。这种自适应调制编码技术在传输链路质量下降时, 通过采用降低调制编码方式和数据吞吐速率来保证节点之间通信的质量, 使得任何时刻信道的容量都能达到最大, 在恶劣环境下保证无线 Mesh 网节点之间链路传输的可靠性。

2.4 自组织路由算法

在网络拓扑结构发生变化时, 自组织路由算法对每个节点的相关路由信息和网络协议进行快速处理, 通过一个快速的恢复过程重新找到路由, 实现网络路由、传输路径的自动选择, 保证无线 Mesh 网的自组织、自愈合特性。目前几种典型的路由协议有动态源路由协议 (dynamic source routing, DSR)、按需距离矢量路由协议 (Ad hoc on-demand distance vector routing, AODV) 和临时按序路由算法 (temporally ordered routing algorithm, TORA) 等^[6-7]。DSR 是一种对等的、基于拓扑的反应式自组织路由协议, 通过采用积极的缓存策略以及从源路由中提取拓扑信息, 通过对比, 实现路由创建。AODV 是一种对等的基于目的的反应式路由协议, 根据需要来创建路由并维护广播数量的最大值。TORA 是一种基于链路反转概念的高度自适应的、高效的、可扩展的分布式路由选择算法^[8-9]。

无线 Mesh 网络的路由性能判据能及时反映链路的状态, 平衡网络负载, 提升网络的稳定性。目前, 无线 Mesh 网络的路由判据主要有以下几种:

1) 最小跳数。

最小跳数 (least hop in cluster, LHC) 只是对一条路径上所经过的节点数进行统计, 不考虑链路的质量和负载均衡等其他因素, 是一种简单、使用较广泛的路由判据。

2) 期望传输次数。

期望传输次数 (expected number of transmission, ETX) 是指链路上一个数据包期望传输成功次数的累加总和。是一种比较路径吞吐量的路由判据。网络中每个节点会以某种频率发送探测包, 接收节点前向传输成功率 P_f , 向后传输成功率 P_r 。因此, 一个数据包传输失败的概率为

$$p = 1 - p_f p_r \quad (1)$$

单跳链路经过 k 次重新传输成功的 ETX 为:

$$ETX = \sum_{k=1}^{\infty} k p^{k-1} (1-p) = 1/(1-p)。(2)$$

3) 期望传输时间。

期望传输时间 (expected transmission time, ETT) 是一种考虑链路数据传输速率的路由判据, 反映链路的传输速度对路由性能的影响。定义如下式:

$$ETT = ETX(S/B)。(3)$$

其中: S 为发送的数据包大小; B 为链路的带宽。

4) 加权累计期望传输时间。

加权累计期望传输时间 (weighted cumulative expected transmission time, WCETT) 是一种在多信道环境下基于 ETT 判据的扩展, WCETT 综合考虑最小跳数以及链路性能参数等因素进行路由选择, 利用链路的权值系数寻找到达目标节点的最优路径, 平衡网络吞吐量与传输时延之间的关系^[10]。

假设有 m 个信道, n 跳路由, WCETT 的定义为:

$$WCETT = (1-\beta) \sum_{i=1}^n (ETT)_i + \beta \max_{1 \leq j \leq m} X_j。(4)$$

其中: $(1-\beta) \sum_{i=1}^n (ETT)_i$ 表示一条路径上的所有链路的累积期望时间总和, $\beta (0 \leq \beta \leq 1)$ 是一个权值系数, β 较大, 则对吞吐量考虑较多, β 较小, 则倾向于选择较短的路径; $\beta \max_{1 \leq j \leq m} X_j$ 表示路径上所有信道中最大传输时间的信道, 反映吞吐率的度量。

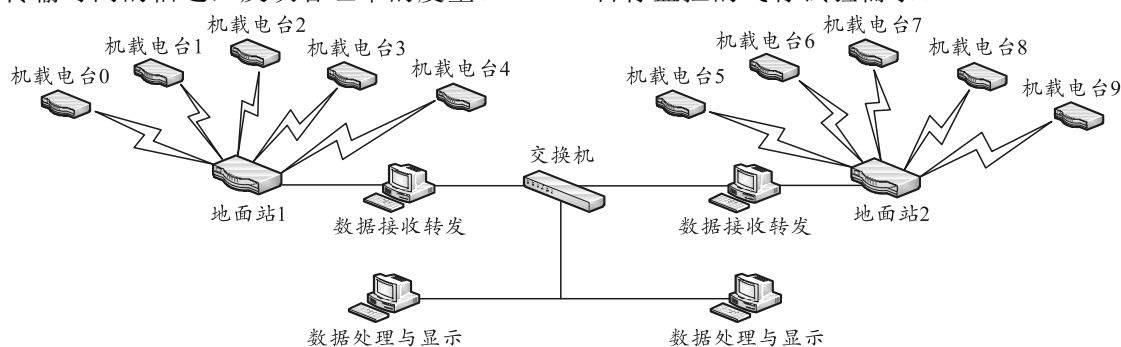


图 2 基于无线 Mesh 网络的遥测传输系统

每个网络电台都可以看作一个节点, 任何节点的加入或退出不会影响其他节点正常连接和数据通信, 节点从加电到组网用时不超过 5 s。网络电台可以提供超过最高 15 Mbit/s 的数据速率, 用于节点之间 IP 数据业务的交换, 充分满足多路视频、音频和数据等信息的同时传输。

节点之间传输采用 COFDM 载波调制技术, 具有良好的射频穿透性, 可以有效对抗多径衰落、多普勒频移等效应, 保证节点在快速移动中进行实时

其中第 j 个链路的传输时间总和 X_j 的定义为:

$$X_j = \sum_{\text{第 } j \text{ 跳使用第 } j \text{ 信道}} (ETT)_j。(5)$$

3 技术实现方案

基于无线 Mesh 网络的遥测传输系统主要由机载网络电台设备和地面站设备 2 部分组成。机载网络电台主要包括网络电台、功率放大器和天线等设备, 网络电台加装 5 W 的功率放大器, 机载天线采用机载马刀天线。地面站设备主要由地面网络电台、功率放大器、天线以及相关馈线等组成, 地面天线设备采用大增益全向天线。机载网络电台与地面网络电台在同一个网段内, 系统采用多点到多点的数据传输结构, 搭建地面同飞机之间的无线数据链路通道。地面站设备通过接收天线, 实时接收多个机载网络电台下传的机载数据或视频数据, 同时可以向机载网络电台发送控制指令, 以控制机载网络电台设备的运行状态。此外, 地面站还可以上传 GPS/北斗差分站实时差分信息, 实现飞机的精准定位。

如图 2 所示, 为了在有限的带宽内增加遥测传输距离, 组网模式上地面站设备采用 2 套双基站, 每个地面基站分别对应 5 架飞机的机载网络电台组成一个网状网, 网状网配置相同的 Mesh ID 和带宽。将基站 1 和基站 2 对应的网状网分别设为不同的频点, 2 套基站可接收 10 架飞机下发的数据, 满足多目标监控的飞行试验需求。

双向传输。节点之间采用 BPSK/QPSK/16QAM 自适用调制编码技术, 根据链路质量自动选择最优的调制编码方式, 实现当前链路质量下的最高数据吞吐速率。

当网络内节点之间相对位置随机变化时, 根据链路通信质量自动路由管理, 保证信息通过最短路径进行传输。自组织路由每个节点均实时统计与接收其他节点的连接关系等信息, 并实时动态分享至其他节点, 每个节点均拥有整个网络的拓扑结构信

息和路由信息。基于 MAC 层控制协议对每个节点的收发信息进行控制，通过网络传递数据的目标节点，以及下一跳节点的信息、数据长度等信息。确保数据可以通过无线 Mesh 网络，从每个节点至其他节点的有效传输。同时，节点具有自动多跳接力功能，在受距离、障碍物等因素影响时，节点之间可以实现接力中继传输，并根据节点之间的实时状态选择最优接力中继路径。

整个系统的网络安全选用 AES128 或 AES256 进行加密，通过网络电台综合控制页面实时配置和分发各节点参数信息，保证通信数据的安全。

4 试验方法和结果

试验前应当对试验区频率干扰进行检测，利用地面网络电台接收数据，选择合适的频点，使得信号干扰最小，利用单站开机信号搜索方式，可以查出目前所使用的频点是否干净，从频谱图显示输入信号电平数值-87 dB，表示该频点干扰较小。该频

点下组网信号状态显示如表 1 所示。从表中可以看出：有 4 个节点开机加入网络，节点之间信号增益基本在 20 dB 以上，表明组网节点之间信号质量较好。

表 1 组网信号状态 dB

信噪比	节点 1	节点 2	节点 3	节点 4
节点 1	—	20.7	20.9	23.4
节点 2	21.7	—	22.5	22.5
节点 3	23.3	20.0	—	23.3
节点 4	21.5	20.2	19.7	—

经测试，在训练任务中，飞机飞行高度大约 3 km 时，飞行试验结果如表 2 所示，地面站接收网络电台下传的 1 路数据和 2 路视频时监控距离最大可达 50 km。在传输距离小于 50 km 时，数据传输质量好，图像无明显丢帧，在传输距离大于 50 km 时，数据出现明显丢包、图像出现明显丢帧现象，信号质量变差。如果选择只传 1 路数据不传视频时，最大传输距离可以达到 120 km 左右。

表 2 飞行试验结果

传输内容	1 路数据+2 路视频	1 路数据+2 路视频	1 路数据
发射功率/W	5	5	5
传输距离/km	<50	>50	<120
接收效果	数据质量好,图像显示好,无明显丢帧。 数据出现明显丢包,图像出现明显丢帧。 数据质量好,无明显丢包现象。		

5 结论

笔者基于无线 Mesh 网络原理，设计了网络电台遥测传输系统。与传统遥测 PCM 传输方式相比，无线网络电台具有较大的优势，将其应用于遥测传输可以同时实现多架飞机的实时监控。网络电台传输的数据格式符合计算机网络标准，利用网络和软件就可以实现数据的处理，不需要遥测 PCM 传输复杂昂贵的编码、同步、解调和前端设备，能简化设备及降低成本，具有广阔的应用前景。

参考文献：

[1] 张亮, 刘建伟. 无线 Mesh 网络安全分析[J]. 遥测遥控, 2010, 31(2): 67-72.
 [2] 方旭明, 马忠建. 无线 Mesh 网络的跨层设计理念与关键技术[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(6): 4-12.

[3] 秦裕斌, 陈建华, 黄晓. 无线 Mesh 网络技术及其应用[J]. 通信技术, 2009, 42(12): 144-146.
 [4] 李保罡. 基于多速率和认知的无线 Mesh 网络关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2012: 16-20.
 [5] 王力文, 张国群. 遥测数据处理软件的通用化设计与展望[J]. 兵工自动化, 2019, 38(5): 41-43.
 [6] 张树琪. 基于 WLAN 的无线 Mesh 网络系统设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007: 12-16.
 [7] 杨玲, 陈其松, 吴茂念. 无线 Mesh 网络中路由与信道联合分配研究[J]. 计算机技术与发展, 2014, 11(7): 110-115.
 [8] 陈赞, 蒋念平. 基于无线 Mesh 网络的路由协议研究[J]. 电子测量技术, 2017, 40(5): 143-147.
 [9] 刘吉平. 多速率无线 Mesh 网络路由度量与信道分配联合算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016: 19-22.
 [10] 陈东娅. 无线 Mesh 网络的路由算法研究[D]. 济南: 山东大学, 2009: 26-35.