

机载异构网络多优先级多径 QoS 路由协议研究

郭锦¹, 张盛兵¹, 郑博^{2,3}, 张衡阳², 刘炜伦²

(1.西北工业大学 计算机学院, 陕西 西安 710072; 2. 空军工程大学 信息与导航学院, 陕西 西安 710077;)
(3.西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 为了保障机载全域异构柔性网络中多种优先级业务的不同 QoS 需求, 提出一种多优先级多径 QoS 路由 (multi-priority and multi-path based QoS routing, MP2R) 协议。该协议综合考虑路由有效性和可靠性指标, 并基于强拆继续型服务策略的多优先级 M/M/1 系统, 构造了路由代价惩罚函数, 通过最优化理论对函数求解最小值, 从而制定最优路由选择策略。基于机载网络模型路由仿真研究结果表明, MP2R 协议不仅具有多业务类型的区分服务和 QoS 保障能力, 而且能够合理利用网络资源, 避免网络拥塞, 实现负载均衡, 有效满足机载全域异构柔性网络的性能需求。

关键词: 机载异构网络; 路由协议; 多路径; 多优先级业务; 多队列; QoS; 仿真
中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-2758(2019)04-0851-06

机载网络涉及飞机所有系统, 承载混合关键业务, 成为飞机的“神经中枢”, 是航空电子系统研究、开发的核心问题^[1-4]。

目前, 国内外飞机上使用的机载数据总线种类繁多, 如 ARINC-429、ARINC-629、MIL-STD-1553B、MIL-STD-1773、SCI、FC、FDDI、AFDX 等。这些系统都采用了“一网到底”的架构设计理念, 将任务、控制网络都压缩在一个服务平面上, 交换机、网络拓扑设计的复杂度较大, 且机载子系统之间的耦合性强, 容易导致故障蔓延和大规模爆发, 同时网络规划僵硬, 系统扩展性差, 无法满足日益增多的多业务混合并行传输的需求^[5]。

针对现有机载网络的不足, 本文提出了一种新型的全域异构、动态自适应接入、柔性包容、混合多层次业务的机载网络——机载全域异构柔性网络。该网络通过可变拓扑、透明化、即插即用的网络动态互联, 能够满足机内任务、控制、管理等多种应用的通信要求, 支持紧急、事件、周期、视频流、适时等混合业务, 实时可靠确定传输, 具有简单、高效、透明、灵活、自适应动态接入、故障动态自愈的特点。

为了增强机载网络连通性并提供 QoS 保障能力, 如何设计出满足用户通信需求的高效、可靠的路

由算法, 使得数据信息能够及时、可靠地传输, 一直是机载网络的研究热点和难点。而且机载全域异构柔性网络需要实现飞控、机电、航电、指控体系互联, 且承载关键、重要、紧急、一般、适时(尽力而为)的混合业务, 对路由协议有着更高的要求。

近年来, 多径路由协议在无线传感器网络、移动 Ad hoc 网络等无线网络中引起了广泛关注。现有无线网络的多径 QoS 路由协议主要可以分为 3 类, 基于地理信息或速度的路由、基于蚁群或智能蜂群的路由, 以及基于网络流量最优化的路由^[6]。文献 [7] 提出的 MMSPEED 协议是基于地理信息的路由, 该协议通过实时性和可靠性来选择路由。其中, 可靠性通过控制路由跳数来满足, 而实时性通过传输速率来保证。但是该协议的不足之处在于, 时延与节点之间的距离成正比的假设在低负载网络条件下可以成立, 而在高负载情况下, 时延主要受拥塞和信道接入竞争的影响。基于蚁群或蜂群智能的 QoS 路由协议使用智能、逐次的路径质量学习机制来给可用路径评分, 并将路径分值用于分组转发决策^[8-10]。但是基于蚁群的算法大多缺少理论分析模型, 收敛速度较慢, 而且路由发现的开销较大。基于最优化的协议将 QoS 路由转化为有 QoS 需求限制

的网络流问题。这类协议试图找到各条无线链路上的最优传输速率配置方案,从而使网络效益最大化^[11-14]。

本文在上述研究基础上,针对新一代机载全域异构柔性网络,提出一种多优先级多径 QoS 路由协议。该协议借鉴流量最优化的思想,权衡考虑路由有效性和可靠性指标,通过构造路由代价惩罚函数,对函数求最小值,从而以最小路由开销代价制定最优路由选择策略,为各优先级业务提供 QoS 保障能力。

1 机载全域异构柔性网络架构设计

机载全域异构柔性网络特征在于控制、任务、管理、维护业务分离,其网络架构采用核心主干网、接入支线网、终端末梢网组成,如图 1 所示。

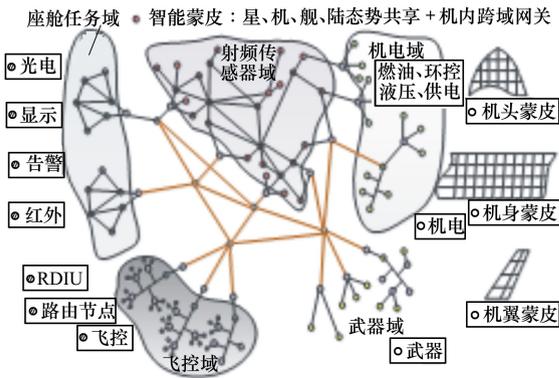


图 1 机载全域异构柔性网络架构示意图

核心主干网采用超高速(40~100 Gb/s)、大容量交换网络,提供高可靠网络服务,支持光波长交换,实现不同业务类型、安全等级、任务关键数据的物理隔离。

接入支线网采用支持不同任务等级、安全等级、业务类型的交换网络,提供高速(100 Mb/s~10 Gb/s)、高可靠网络服务,支持混合多模态多层次网络平面切片,支持控制、任务、管理、维护网络分离,避免将混合业务统一传输、调度、管理,造成不同安全等级、任务等级数据业务故障互相蔓延、难以隔离,影响网络可靠性和效能。

终端末梢网面向不同的业务终端,采用即插即用、动态互联、无中心自组织的无线 Mesh 网、无线传感网、有线高安全网。终端设备之间信息交互需要不同类型的接入支线网、核心主干网进行数据汇

聚,在同一物理区域的终端信息交互可以通过接入支线网转发,不同物理区域的终端信息交互需要通过接入支线网、核心主干网进行数据转发:

①射频、光电、座舱终端系统(含蒙皮)通过扩展多余度无线接入功能、任意节点直接通信、无逻辑中心点等机制支持机载系统动态互联、即插即用、无中心自组织,将中、高速数据(100 kb/s~10 Gb/s)通过接入支线网进行汇聚处理。无线通信误码率小于 10^{-10} ,端到端延迟小于 5 ms,频点采用 60 GHz。

②机电传感采集终端采用无线传感网,将低速数据(1~250 kb/s)汇聚到远程接口单元,进入接入支线网汇聚处理。

③武器、飞控、大气、惯导等终端系统采用强实时高安全有线网,将低速数据通过接入支线网进行汇聚处理。

2 多优先级多径 QoS 路由协议

2.1 网络模型

在机载全域异构柔性网络中,节点中分组到达后依次进行优先级分类和编码处理,然后按照各自优先级排队,经过信道接入控制协议接入信道后,采用本文提出的 MP2R 协议选取源节点到目的节点的路由,分组到达目的节点后,经过译码等环节处理可还原为原分组,如图 2 所示。

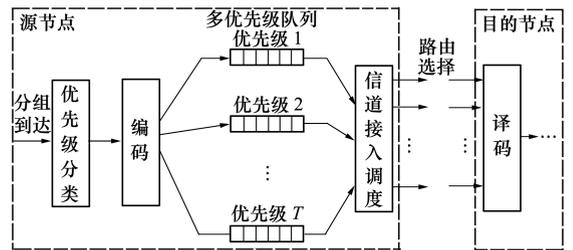


图 2 MP2R 协议机制

假设从源节点 n_{sou} 到目的节点 n_{des} 之间能够构建 P 条非相交路由,其中路由 $p \in \{1, 2, \dots, P\}$ 包括 z 个节点,即 $p = \{n_{sou}, \dots, n_k, \dots, n_{des}\}$,且 $|p| = z$ 。为了表示方便,将路由 p 另记为 $p = \{n_{p,1}, n_{p,2}, \dots, n_{p,z-1}, n_{p,z}\}$ 。

设各优先级分组的长度均服从参数为 μ 的负指数分布,令 t 表示业务类别, $t \in \{1, 2, \dots, T\}$,其中 $t = 1$ 为最高优先级, $t = T$ 为最低优先级。为了保证较

高优先级分组的低时延传输,这里采用强拆继续型服务策略,即当节点正在服务一个分组时,若有一个具有较高优先级分组到达,则立即暂停正在进行的服务,直接服务新到来的分组。当较高优先级分组服务结束后,节点对被中断服务的分组从暂停点继续进行服务。

2.2 路由代价惩罚函数

路由质量信息主要体现在路由有效性和可靠性上。路由有效性反映信息传输的实时性,主要体现在于分组端到端传输时延,而路由可靠性主要体现在于分组传输的成功率。

定义路由 p 上优先级 t 分组传输的端到端时延为 $d_{p,t}$,其主要由分组在节点缓存中的排队时延、节点对分组的处理时延以及分组在信道上的传播时延三部分组成。

在节点缓存中,分组按照各优先级、以到达先后次序排队,形成一个具有 T 个优先级的多队列 $M/M/1$ 排队系统。而在不同优先级队列中,不管分组到达时间的先后次序,节点优先服务较高优先级的分组。

$$\overline{W}_{k,t} = \frac{1}{\mu - \lambda_{k,1} - \lambda_{k,2} - \dots - \lambda_{k,t-1}} + \frac{\mu(\mu + 1)(\lambda_{k,1} + \lambda_{k,2} + \dots + \lambda_{k,t})}{2(\mu - \lambda_{k,1} - \lambda_{k,2} - \dots - \lambda_{k,t})(\mu - \lambda_{k,1} - \lambda_{k,2} - \dots - \lambda_{k,t-1})} \quad (4)$$

分组在信道上的传播时延主要与路由 p 上各相邻节点间的距离有关。路由 p 上节点 n_k 与下一节点 n_{k+1} 之间的距离为

$$l_{p,k \rightarrow p,k+1} = \sqrt{(a_{p,k} - a_{p,k+1})^2 + (b_{p,k} - b_{p,k+1})^2} \quad k \in \{1, 2, \dots, z-1\} \quad (5)$$

那么分组在节点 n_k 与节点 n_{k+1} 之间链路上传播时延为

$$d_{p,k \rightarrow p,k+1}^{\text{pro}} = \frac{c}{l_{p,k \rightarrow p,k+1}} \quad (6)$$

式中,对于无线链路 $c = 3 \times 10^8$ m/s。

节点 n_k 与节点 n_{k+1} 之间链路上优先级 t 分组的时延为

$$d_{k \rightarrow k+1,t}^{\text{link}} = d_{p,k \rightarrow p,k+1}^{\text{pro}} + \overline{W}_{k,t} \quad (7)$$

因此路由 p 上优先级 t 分组传输的端到端时延 $d_{p,t}$ 可表示为

$$d_{p,t} = \sum_{k=1}^{z-1} (d_{p,k \rightarrow p,k+1}^{\text{pro}} + \overline{W}_{k,t}) \quad (8)$$

由于链路可靠性主要取决于信道质量,与业务

根据带优先级的 $M/M/1$ 排队系统^[15],优先级 t 业务在节点 n_k 内的平均时延,即平均排队时延与节点对分组的平均处理时延(即 $\frac{1}{\mu}$)之和为

$$\overline{W}_{k,t} = \frac{1}{\mu(1 - \rho_{k,1} - \dots - \rho_{k,t-1})} + \frac{\overline{W}_{k,t}^{\text{res}}}{(1 - \rho_{k,1} - \dots - \rho_{k,t})(1 - \rho_{k,1} - \dots - \rho_{k,t-1})} \quad (1)$$

式中, $\rho_{k,t} = \frac{\lambda_{k,t}}{\mu}$ 为节点 n_k 中优先级 t 业务的交通强度; $\lambda_{k,t}$ 为节点 n_k 中优先级 t 分组的到达率; $\overline{W}_{k,t}^{\text{res}}$ 为节点 n_k 中优先级 t 分组的平均剩余时间,可表示为

$$\overline{W}_{k,t}^{\text{res}} = \frac{\overline{X}^2}{2}(\lambda_{k,1} + \lambda_{k,2} + \dots + \lambda_{k,t}) \quad (2)$$

式中, \overline{X}^2 为节点对分组服务时间的平均二阶矩,对于参数为 μ 的负指数分布,易知

$$\overline{X}^2 = \frac{\mu + 1}{\mu} \quad (3)$$

因此,有

优先级无关,那么将路由 p 上节点 $n_{p,k}$ 与节点 $n_{p,k+1}$ 之间链路的可靠性记为 $r_{k,k+1}$ ($1 \leq k \leq z-1$),路由 p 的可靠性记为 r_p ,从而有

$$r_p = \prod_{k=1}^{z-1} r_{k,k+1} \quad (9)$$

对于路由 p ,当传输优先级 t 业务时,构造其路由代价惩罚函数(route cost penalty function)如下

$$U_{p,t}^{\text{route}} = \alpha_t \left(1 - \frac{d_{p,t}}{D_t}\right)^{-1} + \beta_t \left(1 - \frac{R_t}{r_p}\right)^{-1} \quad (10)$$

式中, α_t 和 β_t 表示优先级 t 业务中路由有效性和可靠性的权重系数,满足 $0 \leq \alpha_t, \beta_t \leq 1$,且 $\alpha_t + \beta_t = 1$ 。这里的权重系数用于构建路由时满足不同业务的 QoS 需求。 D_t 和 R_t 分别为优先级 t 业务的分组传输端到端时延和可靠性指标。

相应的,节点 n_k 与节点 n_{k+1} 之间链路代价惩罚函数可表示为

$$U_{k \rightarrow k+1,t}^{\text{link}} = \alpha_t \left(1 - \frac{d_{k \rightarrow k+1,t}^{\text{link}}}{D_t}\right)^{-1} + \beta_t \left(1 - \frac{R_t}{r_{k,k+1}}\right)^{-1} \quad (11)$$

为了使源节点与目的节点之间的总业务流量的路由代价惩罚函数最小,此最优化问题可表示为

$$\begin{cases} \min \left(\sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \frac{\lambda_{p,t}}{\lambda} U_{p,t}^{route} \right) \\ \text{subject to: } d_{p,t} \leq D_t, r_{p,t} \geq R_t, \\ p \in \{1, 2, \dots, P\}, t \in \{1, 2, \dots, T\} \end{cases} \quad (12)$$

2.3 协议设计思想

MP²R 协议主要包括路由建立和负载分配 2 个部分。其中,路由建立的算法流程如下:

- ① 将源节点作为当前节点 n_i ;
- ② 根据各节点位置和节点通信距离,计算节点 n_i 的下一跳节点的集合 N_i ;
- ③ 如果 N_i 为空,将 n_i 标记为“dead”,然后返回前一跳节点;如果 N_i 不为空,对于 N_i 中的每一个节点,计算链路代价惩罚函数;
- ④ 根据 (11) 式选择链路代价惩罚函数最小,且未被标记为“dead”的节点 n_j ,作为下一跳节点,并将其标记为“used”;
- ⑤ 将节点 n_j 作为当前节点 n_i ,重复步骤 ② ~ ④,直到目的节点;
- ⑥ 将以上寻找到的路由记为路由 1,重复步骤 ① ~ ⑤,直到源节点和目的节点之间没有其他路由。

负载分配的算法流程如下:

- ① 针对各优先级业务,在源节点到目的节点的所有路由中分别选择出满足条件 $d_{p,t} \leq D_t, r_{p,t} \geq R_t$ 的路由集合;
- ② 针对优先级 t 业务,按照当前时刻源节点与目的节点之间的各路由代价惩罚函数最小化的原则,在步骤 ① 确定的路由集合中选择路由。

3 协议仿真

下面利用 OMNeT++ 仿真平台对 MP²R 协议的性能进行仿真评估。在仿真场景中,所有节点随机均匀分布。为了简便起见,在仿真场景中只选择 1 对源节点和目的节点,源节点和目的节点分别为场景中最左端和最右端的节点。根据机载异构网络实际应用需求,设置 4 种业务类型,各业务类型的分组到达率之比固定为 $\lambda_1 : \lambda_2 : \lambda_3 : \lambda_4 = 1 : 5 : 10 : 20$,其他相关参数如表 1 所示。

表 1 各业务类型相关参数设置

业务优先级	业务类别	端到时延指标要求	可靠性指标要求	α_i	β_i
1	飞控、起降、故障告警信息	<10 ms	>(1×10 ⁻¹⁴)	0.4	0.6
2	惯导、导航、火控信息	<20 ms	>(1×10 ⁻¹²)	0.6	0.4
3	飞行员操作、显示、航迹信息	<50 ms	>(1×10 ⁻¹¹)	0.8	0.2
4	态势、天气、环境、健康状况信息	<100 ms	>(1×10 ⁻¹⁰)	0.5	0.5

仿真结果取 10 次蒙特卡罗实验的平均值,具体网络仿真参数如表 2 所示。

表 2 仿真参数设置

参数	值
仿真场景大小/(m×m)	20×20
节点数	100
仿真时间/min	5
信道传输速率/(Mb·s ⁻¹)	2
节点传输距离/m	2
节点缓冲区容量/packets	100
MAC 协议	IEEE 802.11 DCF

仿真结束后经统计计算,各优先级分组的平均端到端时延和平均传输成功率随分组到达率的变化情况分别如图 3~4 所示。

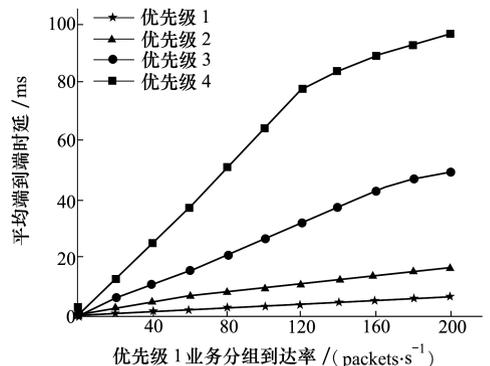


图 3 各业务类型的平均端到端时延

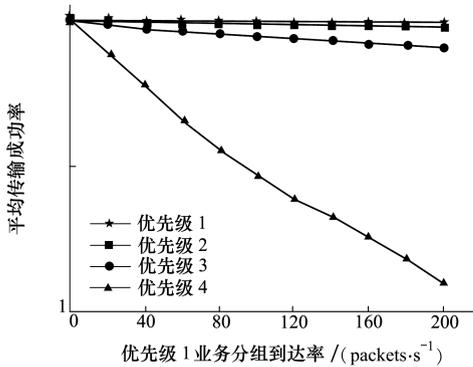


图 4 各业务类型的平均传输成功率

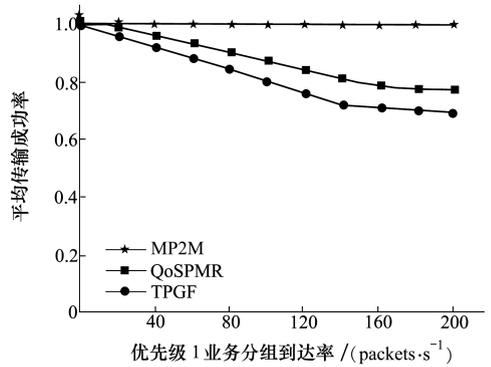


图 6 相同条件下 3 种协议的平均传输成功率

由图 3~4 可得,随着业务优先级的提高,分组平均端到端时延降低,平均传输成功率增大;随着分组到达率的增大,优先级 1、2 业务的性能指标几乎不受影响,而优先级 3、4 业务的平均端到端时延略有增大,平均传输成功率略有降低,这是因为 MP2R 协议优先保证较高优先级业务的传输。

为了验证 MP2R 协议的性能,现将其性能与另

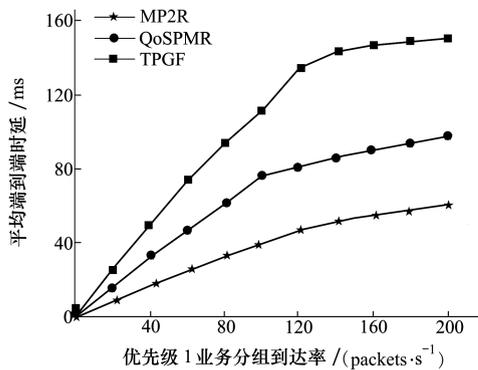


图 5 相同条件下 3 种协议的平均端到端时延

外 2 种典型的多径 QoS 路由协议 TPGF、QoSMPR^[11] 进行对比,如图 5~6 所示。MP2R 协议中各业务种类的平均时延和平均传输成功率均优于相同条件下的 TPGF 协议和 QoSMPR 协议,这是因为 MP2R 协议的路由选择机制在保证各业务实现 QoS 要求的同时,能使整体网络性能达到最优。

4 结 论

针对未来机载全域异构柔性网络,本文提出了一种新的多优先级多径 QoS 路由——MP2R 协议。该协议综合考虑路由有效性和可靠性指标,通过构造路由代价惩罚函数,并对函数求最小值,以最小路由开销代价制定路由选择策略。仿真结果表明,MP2R 协议能够在通信延迟、负载均衡、传输速率的多约束条件下,在端到端之间选择平均传输成功率、平均端到端时延满足业务约束的最优路由。

参考文献:

[1] 熊华钢,周贵荣,李峭. 机载总线网络及其发展[J]. 航空学报, 2006, 27(6): 1135-1144
XIONG Huagang, ZHOU Guirong, LI Qiao. A Survey on Avionics Bus and Network Interconnections and Their Progress[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(6): 1135-1144 (in Chinese)

[2] 王国庆,谷青范,王森. 新一代综合化航空电子系统架构技术研究[J]. 航空学报, 2014, 35(6): 1473-1486
WANG Guoqing, GU Qingfan, WANG Miao. Research on the Architecture Technology for New Generation Integrated Avionics [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(6): 1473-1486 (in Chinese)

[3] 肖皓天,熊华钢,李峭,等. 基于 AFDX 网络的综合模块化航电故障注入技术[J]. 电光与控制, 2017, 24(10): 75-84
XIAO Haotian, XIONG Huagang, LI Qiao, et al. The Technique of Fault Injection on Integrated Avionics System through AFDX [J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(10): 75-84 (in Chinese)

[4] 孙东旭,贾世伟,孟玉慈,等. 综合模块化航电系统 FC 网络的机内测试设计[J]. 航空计算技术, 2016, 46(6): 108-112
SUN Dongxu, JIA Shiwei, MENG Yuci, et al. Built-in-Test Design for Integrated Module Avionics Fibre Channel Networks[J]. Aeronautical Computing Technique, 2016, 46(6): 108-112 (in Chinese)

- [5] 张红. 新一代综合航电系统的发展趋势[J]. 航空精密制造技术, 2016, 52(2): 1-4
ZHANG Hong. Development Trend of the New Generation Integrated Avionics System[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 52(2): 1-4 (in Chinese)
- [6] UTHRA R A, RAJA S V K. QoS Routing in Wireless Sensor Networks-A Survey[J]. ACM Computing Surveys, 2012, 45(1): 108-112
- [7] FELEMBAN E, LEE C G, EKICI E. MMSPEED: Multipath Multi-Speed Protocol for QoS Guarantee of Reliability and Timeliness in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2006, 5(6): 738-754
- [8] KIM S. An Ant-Based Multipath Routing Algorithm for QoS Aware Mobile Ad-Hoc Networks[J]. Wireless Personal Communications, 2012, 66(4): 739-749
- [9] KRISHNA P, SARITHA V, VEDHA G, et al. Quality-of-Service-Enabled Ant Colony-Based Multipath Routing for Mobile Ad Hoc Networks[J]. IET Communications, 2012, 6(1): 76-83
- [10] MOGH DAM M N, TAHERI H, KARRARI M. Multi-Class Multipath Routing Protocol for Low Power Wireless Networks with Heuristic Optimal Load Distribution[J]. Wireless Personal Communications, 2015, 82(2): 861-881
- [11] WANG X M, LI C B, LU J L, et al. QoSMPR: QoS-Aware and Priority-Based Multipath Routing Algorithm for WMSNs[C]//2012 Spring Congress on Engineering and Technology, 2012: 1-5
- [12] BAGULA A B. Modelling and Implementation of QoS in Wireless Sensor Networks: a Multiconstrained Traffic Engineering Model [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2010(1): 1-14
- [13] MIGUEL Sepulcre, JAVIER Gozalvez, BALDOMERO. Multipath QoS-Driven Routing Protocol for Industrial Wireless Networks [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2016, 74: 121-132
- [14] OLEKSANDR V L, OLEKSANDRA S Y. Dynamics Analysis of Multipath QoS-Routing Tensor Model with Support of Different Flows Classes[C]//IEEE International Conference on Smart Systems and Technologies, 2016: 225-230
- [15] LBE C Oliver. Ibe. Fundamentals of Stochastic Networks[M]. John Wiley & Sons, Inc. 2011: 93-99

Study on Multi-Priority and Multi-Path QoS Routing Protocol for Airborne Heterogeneous Networks

GUO Jin¹, ZHANG Shengbing¹, ZHENG Bo^{2,3}, ZHANG Hengyang², LIU Weilun²

(1.School of Computer Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2.Information and Navigation Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;
3.School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to guarantee the QoS requirements of multiple services in airborne all-domain heterogeneous and flexible networks, we propose a novel multi-priority and multi-path based QoS routing (MP2R) protocol in this paper. In the protocol, in terms of the route effectiveness and reliability, the route cost penalty function is constructed based on the multi-priority $M/M/1$ queueing queueing system with the preemptive-resume policy. The minimum value of the function is derived through the optimization theory, and the optimum routing solution is acquired. The simulation results show that the MP2R protocol not only has the capabilities of differentiation services for different kinds of traffic and QoS provision, but also can utilize the network resource rationally, avoid congestion, achieve the load balancing, and meet the requirements of airborne all-domain heterogeneous and flexible networks effectively.

Keywords: airborne heterogeneous network; routing protocol; multi-path; multi-priority services; multi-queue; QoS; simulation