

支持多业务传输的天基 Mesh 网络机会路由优化算法

张振浩¹, 梁俊¹✉, 刘振霞¹, 肖楠¹, 王成林², 张明²

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077; 2. 94878 部队, 安徽芜湖, 241009)

摘要 针对天基骨干 Mesh 网络业务类型多样、计算能力相对不足的特点以及 SOAR 路由算法拥塞控制机制不足、确认机制不可靠以及不同业务 QoS 保障需求有差异的问题, 提出了具有可靠联合确认机制并支持多业务传输的机会路由算法。该算法以预期成功传输次数来描述整体链路性能, 有效实现了网络负载均衡与链路拥塞控制; 算法兼顾多样化业务的传输, 设计了一种路由路径自适应调整策略, 以实现路径选择与业务类型的自适应调整。仿真结果表明: 所提算法可以较好地实现不同业务下传输路径自适应, 并且在重负载条件下, 该算法相比传统 SOAR 路由算法在时延、吞吐量和吞吐率性能上提升明显。

关键词 空天信息网络; 机会路由; 多业务; Mesh 网络; 层次分析法

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.04.014

中图分类号 TN915 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)04-0079-07

Optimized Algorithm about Supporting Multi-service of Opportunistic Routing in Space-based Mesh Network

ZHANG Zhenhao¹, LIANG Jun¹, LIU Zhenxia¹, XIAO Nan¹, WANG Chenglin², ZHANG Ming²

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;
2. Unit 94878, Wuhu 241009, Anhui, China)

Abstract: Aimed at the problems that Mesh network services are various and calculation ability is insufficient in Space-based backbone Mesh network congestion control is not sufficient, acknowledgement is unreliable and the requirement of QoS guarantee in the SOAR algorithm are different service, this paper proposes a new opportunistic routing algorithm with reliable joint acknowledge and supporting multi-service. The algorithm defined expected successful transmission count to describe the integral state of links and effectively took the load balancing and link congestion control into consideration. The new algorithm designed an adaptive route selection to achieve the self-adaptation control between route selection and diversified services. The simulation results show that the algorithm in the paper has better preference in adaptively selecting the best transmission path according to the difference of service. What's more, the performance of the algorithm is better in the transmission delay, the throughput and the throughput rate than the SOAR routing algorithm

Key words: space-sky information network; opportunistic routing; multi-service; Mesh network; analytic hierarchy process

收稿日期: 2016-09-18

基金项目: 国家自然科学基金(61501496)

作者简介: 张振浩(1994—), 男, 河北邢台人, 硕士生, 主要从事卫星通信技术研究。E-mail: zzh2015091@163.com

通信作者: 梁俊(1962—), 男, 江苏南京人, 教授, 主要从事空天信息网络与宽带数据链技术研究。E-mail: liangjunhja@sina.com

引用格式: 张振浩, 梁俊, 刘振霞, 等. 支持多业务传输的天基 Mesh 网络机会路由优化算法 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(4): 79-85. ZHANG Zhenhao, LIANG Jun, LIU Zhenxia, et al. Optimized Algorithm about Supporting Multi-service of Opportunistic Routing in Space-based Mesh Network [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(4): 79-85.

天基 Mesh 网络是新兴的宽带无线 Mesh 网络在空天信息平台上的应用,该网络能够有效提高无线 Mesh 网络的覆盖范围。天基 Mesh 网络组网成本低,覆盖范围广,各平台组网建链时间短,因而可以将其应用于空军远程作战高速数据通信和广域信息情报网中。

路由协议作为天基 Mesh 网络关键研究内容之一,是目前天基 Mesh 网络研究的热点。根据文献[1],目前无线 Mesh 网络关于机会路由协议的研究是路由协议研究的热点。文献[2]提出的 ExOR 机会路由协议无链路负载均衡控制,吞吐量相对较低。文献[3]在机会路由中引入速率控制机制解决负载均衡与拥塞控制问题,但是该方法对机会路由无固定传输路径以及备选节点集选择等问题考虑不足,造成节点集选择过大,传输效率低。文献[4]提出了机会路由由内部速率控制方法并且引入循环轮转方式进行数据发送,有效提高了端到端数据吞吐量和网络资源利用率,但节点只对已经选定传输链路上的拥塞节点进行优化控制,因而导致网络中传输多业务类型的数据效率较低。文献[5]引入期望任意路径传输次数,提高了网络负载均衡性能与网络吞吐量,但路由路径选择的转发节点转发数据包的效率低。文献[6]利用机会路由的广播特性寻找吞吐量最大和丢包率最小的多个节点将其作为最优路径,有效保证了不同业务的 QoS(Quality of Service, QoS),但是未考虑转发节点的缓存能力,并且算法易导致最优链路拥塞,从而使得节点的转发效率降低。文献[7]提出的 SOAR 协议引入了速率控制用以实现负载均衡与拥塞控制,而且算法较简单适合应用于计算条件有限的环境中,但该算法未充分考虑中间转发节点的缓存转发能力对数据包接收以及链路吞吐量的影响,另外,无法针对不同业务传输对 QoS 的需求来选择最佳传输链路。

针对前期机会路由与传统 SOAR 路由算法研究中存在的上述问题,本文在 SOAR 路由算法中引入了成功投递率的概念,综合考虑节点投递率、转发节点的缓存区大小以及转发可用空间大小,提出了一种可靠性较高并支持多业务传输的改进 SOAR 路由算法,可在链路中传输不同类型的业务时在 SOAR 路由算法设定的最佳路径附近的节点集中选择路由路径。

1 网络模型

天基骨干 Mesh 网络由具有连接关系稳定、相对移动速度小、可靠性高的低轨卫星(Low Earth

Orbit, LEO)、临近空间低动态飞行器以及大型空中骨干平台通过宽带数据链高效灵活地自组织构建^[8]。用户节点(如战斗机、导弹、高动态飞行器等)通过接入天基 Mesh 网实现信息的广域高速传输与交互,其网络拓扑结构见图 1。

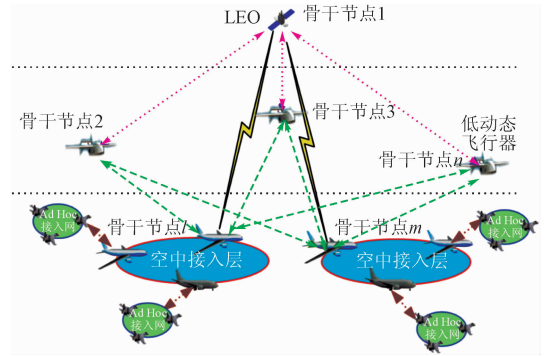


图 1 天基 Mesh 网络示意图

Fig. 1 The diagram of space-based Mesh network

由于空天平台资源有限、计算能力相对不足,关于建立骨干 Mesh 网络路由算法的研究是近些年空中骨干 Mesh 网络相关研究的热点。针对天基骨干网拓扑中各节点的关系,可以将数据前向发送、转发和接收节点抽象成图 2 所示的节点数学模型。其中, s 为源数据节点,表示天基骨干网中发送数据的空中平台; d 为数据包传输目的节点,即为数据接收平台; v_l 为数据转发节点,即为参与数据转发的空中平台。

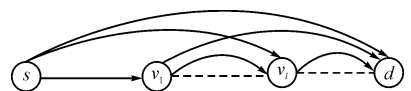


图 2 节点前向传输模型

Fig. 2 The forward translation model of nodes

2 SOAR 路由模型

2.1 问题分析

针对图 2 中 Mesh 网络节点传输模型,可用有向图 $G=(V, L, D)$ 表示,其中集合 V 表示 Mesh 网络内节点的集合,包含节点 $v_l, l \in [0, n]$;集合 L 表示网络中各条通信链路的集合,任意两节点 v_m, v_l 间的通信链路 $l_{m,l} \in L$;集合 D 表示节点间投递率,任意两节点 v_m, v_l 之间的链路 $l_{m,l}$ 的投递率为 $d_{m,l} \in D$,节点自身收发数据包投递率为 1,投递率可根据文献[2]和[9]获得。

假设在数据包传输过程中,链路端节点投递率恒定,而且数据包传输时信道相干时间远大于数据包传输时间。另外,假设同一节点与不同邻居节点之间的链路保相对独立。

2.2 模型建立

设 $s, d \in V$ 为任意 2 个节点,分别作为数据包的发送节点和接收节点。用节点集合 $F_{s,d}$ 表示网络中源节点到目的节点的有序转发过程,由 $n+1$ 个节点可构成转发列表 $F_{s,d} = \{s = v_0, v_1, \dots, v_n = d\}$,其中节点下标增大,优先级提高^[10]。任意节点 v_l 按照优先级由优先级最高的节点向目的节点转发数据包;在收到该数据包的转发节点中,各节点根据转发优先级由高到低依次进行应答。根据上述定义,建立图 3 所示数据包传输整个过程中路由及节点转发模型。

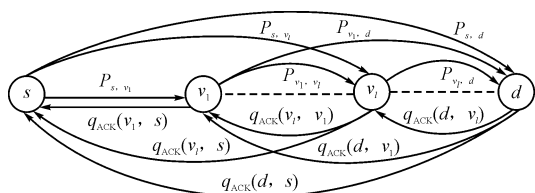


图 3 路由及节点转发模型

Fig. 3 The model of routing and nodes forwarding

图中, $q_{ACK}(v_l, v_m)$ 表示任意接收数据的最高优先级转发节点 v_l 与转发节点 v_m 间的 ACK 投递率; P_{v_m, v_l} 表示转发列表 $F_{s,d}$ 中转发节点 v_m 向目的节点发送的数据包被比 v_m 优先级高的节点 $v_l (m < l)$ 收到,但比 v_l 优先级更高的节点 $v_j (l < j)$ 未收到的概率。由于链路具有统计独立性,因而可以计算得出:

$$P_{v_m, v_l} = \begin{cases} d_{v_m, v_l} \prod_{j=l+1}^n (1 - d_{v_m, v_j}), & \forall m \leq l \\ 0, & \forall m > l \end{cases} \quad (1)$$

2.3 路由度量

传统 SOAR 路由协议采用 ETX 作为路由度量方法,确定最优传输路径,并通过设置 ETX 阈值,减小数据包传输偏离最优路径的概率,并在最优路由路径附近根据 ETX 大小确定备选节点的优先级。链路的 ETX 值由链路双向投递率共同决定,根据图 3 所述路由模型,建立图 4 中 3 个节点的拓扑模型^[11],便于进行简化计算。

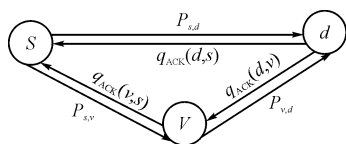


图 4 3 节点拓扑模型

Fig. 4 The topology model of three nodes

设事件 A 表示源节点 s 发送的数据包被中间节点 v 或目的节点 d 中至少 1 个节点接收到,事件 B 表示中间节点 v 收到数据包而目的节点 d 未收到数据包,事件 C 表示目的节点 d 收到数据包,从而得

到数据包从源节点 s 发送到目的节点 d 收到的 ETX 值为:

$$ETX_{s \rightarrow d} = \frac{1}{P_{s,v} \cdot q_{ACK}(v,s) + P_{s,d} \cdot q_{ACK}(d,s)} + P(B|A) \frac{1}{P_{v,d} \cdot q_{ACK}(d,v)} + P(C|A) \cdot 0 = \frac{\left(1 + \frac{P_{s,v} \cdot q_{ACK}(v,s)}{P_{v,d} \cdot q_{ACK}(d,v)}\right)}{(P_{s,v} \cdot q_{ACK}(v,s) + P_{s,d} \cdot q_{ACK}(d,s))} \quad (2)$$

则对于转发列表 $F_{s,d} = \{s = v_0, v_1, \dots, v_n = d\}$ ^[13],用转发节点 v_l 到目的节点 v_n 的期望传输数 R_{v_l, v_n} 代替公式(2)中的 $1/(P_{s,v} \cdot q_{ACK}(v,s))$ 可得转发列表 $F_{s,d}$ 的预期传输次数为:

$$ETX_{F_{s \rightarrow d}} = R_{v_0, v_n} = \frac{\left(1 + \sum_{l=1}^n (P_{v_0, v_l} \cdot q_{ACK}(v_l, v_0)) \cdot R_{v_l, v_n}\right)}{\sum_{l=1}^n (P_{v_0, v_l} \cdot q_{ACK}(v_l, v_0))} \quad (3)$$

3 天基 Mesh 网络机会路由协议设计

传统 SOAR 路由协议作为一种端到端机会路由通过建立端到端最小 ETX 路径作为数据最佳传输路径,但是在天基骨干 Mesh 网络中存在一些独有的特点:少数骨干节点需要多跳转发高速数据业务,卫星骨干节点信息传输时延大以及骨干网中传输业务多样。因而,传统 SOAR 路由算法采用的 ACK 确认机制以及依靠最小 ETX 作为最佳数据传输路径已无法满足天基骨干 Mesh 网络信息传输需求。因此,针对天基骨干 Mesh 网络的特点以及网络中信息传输的需求对机会路由算法进行改进,使之能够根据传输业务的差异以及 QoS 保障需求综合考虑路径的时延、吞吐量和吞吐效率等性能,实现不同类型业务的高效可靠传输,并且有效提高网络资源利用率。

3.1 可靠应答机制设计

传统 SOAR 路由协议采用逐跳 ACK 确认机制,以保证处于转发路径上的转发节点在数据包被距离目的节点更高优先级的下一跳转发节点确认接收前或达到最大重传次数前的多次数据重传。针对天基骨干 Mesh 网络存在的卫星节点传输时延长,空中节点需要高可靠传输数据的特点,为了有效减少天基骨干 Mesh 网络中 ACK 应答丢失造成的数据包重传,需要对传统 ACK 机制进行改进,本文采用可靠联合确认机制(Reliable Joint Acknowledge, RJACK)将 ACK 应答与 SNACK(Selective Negative Acknowledge, SNACK)^[12] 相结合使之可以应

用于天基骨干 Mesh 网络中实现转发节点之间高可靠应答信息传输,提升节点间反向 ACK 投递率,使之接近 100%。

RJACK 机制在无卫星骨干节点参与组网时,采用的 ACK 确认机制将 SNACK 包头信息设置为空。由任意两节点间反向 ACK 投递率为 $q_{ACK}(v_l, v_m)$,规定 RJACK 的发送次数为:

$$i = \left\lceil \frac{1}{q_{ACK}(v_l, v_m)} \right\rceil + 1 \quad (4)$$

此时, RJACK 的投递率可用式(5)表示,此时应答成功率基本接近 100%。

$$q_{RJACK} = 1 - (1 - q_{ACK}(v_l, v_m))^i \quad (5)$$

RJACK 机制在有卫星节点参与组网时,为保证网络中有卫星节点参与的数据传输过程端到端的可靠传输,将 RJACK 包头中相关 ACK 应答信息置为空,此时采用 SNACK 确认机制保证网络中有卫星节点参与时,不因传输时延较长造成确认 ACK 数据包自动丢失。

3.2 路由度量的优化

传统 SOAR 路由协议使用 ETX 路由度量,寻找最小 ETX 值链路建立最优数据转发路径集。

SOAR 路由协议通过端到端的投递率来衡量数据包到达中间转发节点或目的节点的概率,但是节点的缓存与转发能力将决定数据包是否可以被节点顺利转发至下一节点,同时大数据量业务在链路中传输时,链路拥塞控制将很大程度上影响网络的传输效率,因而本文提出了成功转发率,将缓存转发成功与否视为数据包成功接收与否的一部分。成功投递率 $Z_{x,y}$ 指数据包从节点 x 发送至到达节点 y ,被成功缓存并继续转发到下一个节点的概率。成功转发率由两节点之间的投递率 $d_{x,y}$ 、下一转发节点的缓存区大小以及转发可用空间大小共同决定。

定义任一节点 l 的缓存区归一化系数^[13]为:

$$\alpha = \frac{TR_l}{RcR_l^2}$$

式中: TR_l 为节点 l 向外部节点发送数据的速率, RcR_l 为节点 l 接受来自外部数据的速率,通过跨层机制从 MAC 层可以获取这两个参数。另外,定义节点当前占用转发空间大小为 β ,可通过探针包来获取该参数。根据上述定义,成功投递率 $Z_{x,y}$ 可用式(6)表示:

$$Z_{x,y} = \alpha(1 - \beta)d_{x,y} \quad (6)$$

针对天基 Mesh 网络的改进 SOAR 路由算法考虑原有 SOAR 路由度量对负载均衡与拥塞控制兼顾不足的问题,将成功投递率作为新的衡量指标,对原有 ETX 路由度量进行改进,提出预期成功传输

次数(Expected Successful Transmission Count, ESTX)用来描述整体链路性能。通过建立最小 ESTX 链路作为大数据量业务传输最优链路,可以较好地实现链路拥塞控制与负载均衡。改进型 SOAR 路由算法设置 ESTX 阈值,以限制备选节点集在最优路径范围内,设置阈值方法与 SOAR 路由算法中 ETX 阈值设置方法相同^[7]。

根据上述关于 ESTX 的描述,定义 Q_{v_m, v_l} 表示转发列表 $F_{s,d}$ 中转发节点 v_m 向目的节点发送的数据包被比 v_m 优先级高的节点 $v_l (m < l)$ 成功缓存并转发,但比 v_l 优先级更高的节点 $v_j (l < j)$ 未顺利缓存或未成功转发的概率。因而,可用式(7)表示:

$$Q_{v_m, v_l} = \begin{cases} Z_{v_m, v_l} \prod_{j=l+1}^n (1 - Z_{v_m, v_j}), & \forall m \leq l \\ 0, & \forall m > l \end{cases} \quad (7)$$

将成功投递率 $Z_{x,y}$ 作为改进型 SOAR 路由协议中的新投递率,应用式(3)的计算方法可以得到 ESTX 的计算公式,用式(8)表示,其中, R'_{v_l, v_n} 表示中间任意转发节点 v_l 到目的节点 v_n 的预期成功传输次数。

$$ESTX_{F_{s,d}} = R'_{v_0, v_n} = \frac{\left(1 + \sum_{l=1}^n (Q_{v_0, v_l} q_{ACK}(v_l, v_0)) R'_{v_l, v_n}\right)}{\sum_{l=1}^n (Q_{v_0, v_l} q_{ACK}(v_l, v_0))} \quad (8)$$

3.3 动态路径确定

天基 Mesh 网络作为骨干网需要为用户提供多样化高可靠和高质量的图像、视频等多媒体业务,多样化的业务类型通常对服务质量(QoS)有相关要求。针对天基 Mesh 网络中传输的业务,用户对相关业务的要求不同,在路由协议中确定最优链路时,综合考虑不同业务类型对时延、带宽、丢包率和误码率等的要求。本文使用层次分析法(AHP),选用时延、吞吐量、丢包率和带宽 4 个参数作为不同类型的业务进行路径选择时的评价参数,根据不同类型的业务选取不同的路径传输数据。从而可以建立如图 5 所示的层次结构模型进行权重确定。

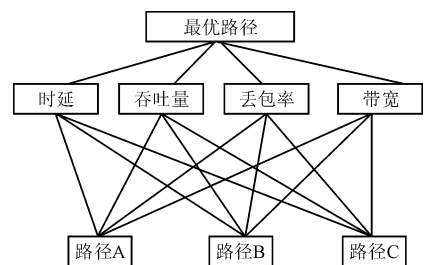


图 5 层次结构模型建立

Fig. 5 Construction of AHP model

根据 4 个参数对路径选择的重要程度不同建立

相应的判断矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$,采用 Saaty 教授的 1-9 标度法^[15]对同一层次各个元素相对于所属上一层次某一元素的相对重要性赋予分值,对各影响因素之间的相互关系与相对重要性进行定量评价,最终确定各因素间相互影响的权重,建立量化判断矩阵,并进行一致性检验。最终利用和积法计算各评价参数的权重。

根据图 5 所建立的层次结构模型,针对网络中传输的业务类型,对上述 4 个评价参数设定不同的权重系数 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$,用式(9)所示效用函数确定最优路由路径:

$$\Gamma = \lambda_1 \omega_1 + \lambda_2 \omega_2 + \lambda_3 \omega_3 + \lambda_4 \omega_4 \quad (9)$$

式中: $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 分别表示层次结构模型中选择最优路径需要考虑的时延、吞吐量、丢包率和网络负载 4 个参数。网络中传输不同的类型业务时,选取预先设置的 ESTX 阈值范围内备选节点集中综合效用值最大的备选路径作为最佳数据传输路径。

3.4 算法流程描述

天基 Mesh 网络应用改进 SOAR 算法进行路由路径选择时,根据传输不同业务类型的业务数据可将路由算法的具体流程图 6 表示。

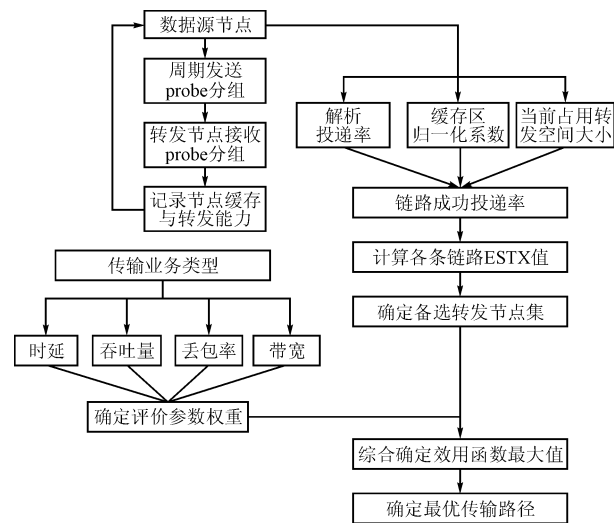


图 6 路由算法框图

Fig. 6 The block diagram of routing algorithm

4 仿真与分析

4.1 网络传输业务模型

空天信息网络融合了天基和空基的大量通信平台,天基骨干 Mesh 网络作为一种包含天基和空基骨干通信节点的空天信息骨干网络,很好地满足了机动性较强的战斗机、高动态飞行器等用户对于高灵敏度、高速率和大数据量业务的传输需求。根据网络中传输业务对不同指标的要求以及不同类型业

务的特点,将天基骨干 Mesh 网络中传输的业务分为 3 类:短消息业务(指令信息和态势信息等)、会话业务(话音业务)和多媒体业务(图像和视频等)。根据文献[16]中不同类型业务对 QoS 的要求,可以得到 3 种业务对 4 个评价参数的权重,见表 1。

表 1 业务类型与评价参数权重

Tab. 1 The relationship between weight of evaluation parameters and types of services

业务类型	时延	吞吐量	带宽	丢包率
短消息业务	0.266 0	0.084 1	0.053 2	0.596 7
会话业务	0.592 6	0.150 8	0.136 5	0.120 1
多媒体业务	0.235 6	0.276 4	0.289 7	0.198 3

4.2 仿真与验证

4.2.1 路由协议性能比较

假设天基骨干 Mesh 网络中包含 3 个空中大型飞行平台、2 个临近空间飞行器与 1 个卫星节点,设置网络传输负载强度分为低、中、高 3 个等级,分别取归一化量值 $L=0.2, 0.5$ 和 0.8 。源节点与目的节点收发数据包不受到缓存区大小限制,其余转发节点随机设置 3 组大小不同的节点缓存区。仿真过程设置节点随机分布在 $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ 正方形区域内,节点之间距离超过 40 km 数据不可达,设置仿真次数为 10 000 次。

图 7 给出了不同网络负载强度下不同算法传输时延随网络中传输的数据量大小的变化关系。由图可知,相同负载条件下本文提出算法的传输时延均小于传统 SOAR 路由算法,其中当网络负载较低时,数据传输时延基本不受节点的缓存转发能力影响。但是随着网络负载强度增加,节点的缓存转发能力对于数据传输时延的影响逐渐增大,因而本文算法在综合考虑 ETX 以及节点的数据缓存转发能力后,能够降低数据因受节点缓存区限制而丢包重发的概率,从而降低重负载环境下数据转发时延,实现传输时延降低的目的。

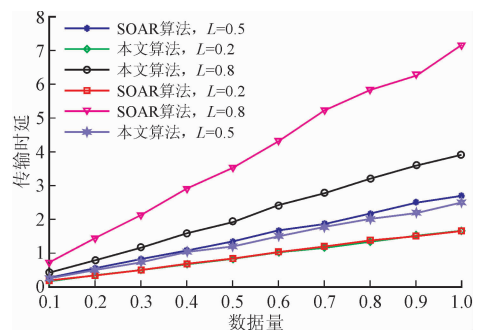


图 7 数据量与传输时延的关系

Fig. 7 The relationship between the size of data and transmission delay

图8给出了不同网络负载强度下不同算法链路吞吐量随网络中传输的数据量大小的变化关系。由图可知,相同负载强度下,传输数据量增加,2种算法的吞吐量均在数据量较小时快速增加,数据量较大时增加相对缓慢。但是相同负载强度时本文算法链路吞吐量均大于传统SOAR路由算法。当传输数据量和负载强度增加时,转发节点的性能对吞吐量的影响逐渐增大,本文算法的吞吐量性能优势较明显。这主要是因为本文给出的路由算法在传输大数据量业务和网络重负载强度下,算法有效的拥塞控制和负载均衡机制综合考虑节点缓存能力选取最优转发节点集,从而较好地提高了链路吞吐量。

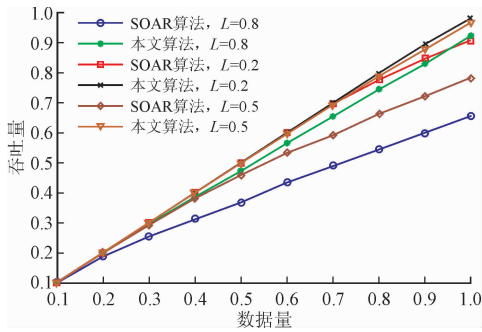


图8 数据量与吞吐量的关系

Fig. 8 The relationship between the size of data and throughput

图9给出了不同网络负载强度下不同算法数据吞吐率随网络中传输的数据量大小的变化关系。由图可知,传输数据量增加相同负载条件下本文提出算法的链路吞吐率均比传统SOAR路由算法下降缓慢。小数据量、轻负载环境下下降缓慢是因为节点缓存与转发能力对链路中数据传输的影响小。随着负载强度的加大,小数据量业务即开始对转发节点的性能表现敏感,较小数据量时两种算法吞吐率均已开始下降,但是相同情况下本文路由算法下降缓慢。这是由于在重负载、大数据量业务传输时,本文路由算法能够综合考虑链路与节点性能,从而使得链路保持较高传输效率,吞吐率相对较高。

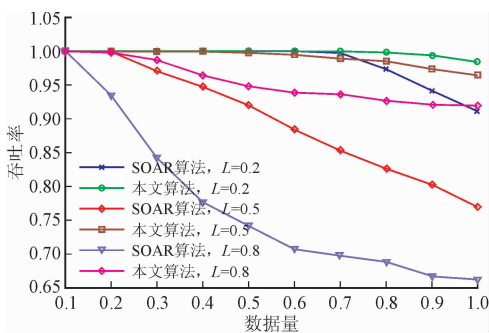


图9 数据量与吞吐率的关系

Fig. 9 The relationship between the size of data and throughput rate

图7~9仿真结果表明,本文的路由算法相比传统SOAR路由算法在传输时延、吞吐量和吞吐率性能上均有部分提升,小数据量、轻负载强度下性能基本与传统SOAR路由算法相同;大数据量、重负载强度下性能提升明显。

4.2.2 不同业务下路由协议性能比较

经过4.2.1比较可知,本文路由算法相比SOAR路由算法性能有所提高。在相同仿真环境下,比较不同业务类型与不同负载强度下2种路由算法的性能,经仿真得到图10、图11所示的结果。

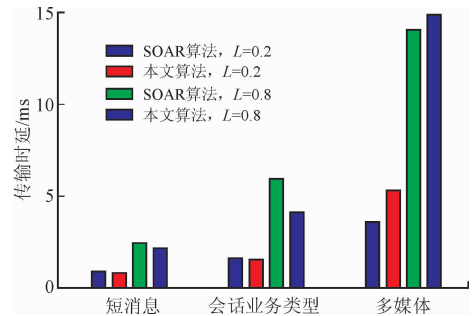


图10 不同业务类型与不同负载下传输时延关系

Fig. 10 The relationship between the different type of service and transmission delay in different network load

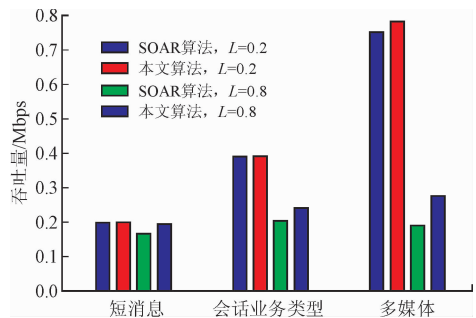


图11 不同业务类型与不同负载下吞吐量关系

Fig. 11 The relationship between the different type of service and throughput in different network load

在图10、图11仿真结果中,传输短消息业务与会话业务时,轻负载条件下,本文路由算法相比SOAR路由算法传输时延与吞吐量改善不明显;重负载条件下,传输时延和吞吐量性能均有明显提升。这是由于轻负载环境中,链路传输性能较好,本文路由算法与传统SOAR路由算法选择路径类似,但是本文算法选择的综合最优链路传输不一定是最小ETX链路,因而短消息业务传输时延较SOAR路由算法稍高;重负载环境中,本文路由算法选择缓存区相对较大、链路拥塞率相对较低、期望传输次数相对较小的链路进行数据传输,因而在重负载环境中数据传输时延和吞吐量均得到改善。传输多媒体业

务时,虽然轻负载与重负载环境下,传输时延均有所增加,但是链路吞吐量性能提升明显,这是因为本文的路由算法在传输多媒体业务时为了满足图像、视频数据带宽和吞吐量要求所选择的转发节点集包含的节点缓存区空闲度较大,选择的链路传输性能最佳,因而牺牲了时延特性来最好地满足多媒体业务的对吞吐量性能的要求。

综上所述,本文提出的路由算法相比传统 SOAR 路由算法在多媒体等大数据量业务传输时吞吐量性能提升明显,但是数据传输时延有所增加。在短消息等小数据量业务传输时,时延性能的降低和吞吐量性能的提升均不明显。在会话业务传输时,传输时延性能和吞吐量性能均得到明显提升。

5 结语

本文针对天基骨干 Mesh 网络中因包含卫星通信节点而导致 ACK 确认包自动丢弃、节点传输大数据量业务易造成网络拥塞、节点计算能力相对不高的问题,提出了一种支持多类型业务的 SOAR 路由优化算法,相比传统 SOAR 路由算法负载均衡与拥塞控制性能有部分提升,并且可以根据网络中传输的不同业务类型对 QoS 的要求,提供自适应动态路由路径选择策略,根据业务 QoS 保障需求的差异性保证了不同类型业务的高效传输。

参考文献(References):

- [1] ALOTAIBI E, MUKHERJEE B. A Survey on Routing Algorithms for Wireless Ad-Hoc and Mesh Networks [J]. *Computer Networks*, 2012, 56(2): 940-965.
- [2] BISWAS S, MORRIS R. ExOR: Opportunistic Multi-Hop Routing for Wireless Networks [C] // *Proceedings of SIGCOMM*, 2005. Philadelphia: PA, 2005: 133-144.
- [3] KOUTSONIKOLAS D, HU Y C, WANG C C. Pacifier: High-throughput, Reliable Multicast without "Crying Babies" in Wireless Mesh Networks [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications*. Rio de Janeiro, Brazil, 2009: 2473-2481.
- [4] 武海生,王贵锦,林行刚. 无线 Mesh 网上机会路由协议的分析与改进 [J]. *应用科学学报*, 2011, 29(2): 111-117.
WU H S, WANG G J, LIN X G. Analysis and Improvement of Opportunistic Routing over Wireless Mesh Networks [J]. *Journal of Applied Sciences*, 2011, 29(2): 111-117. (in Chinese)
- [5] 李锋,沈崧. 无线 Mesh 网络机会路由技术研究 [J]. *电子设计工程*, 2016, 24(5): 58-61.
LI F, SHEN S. The Study of Opportunistic Routing for Wireless Mesh Networks [J]. *Electronic Design Engineering*, 2016, 24(5): 58-61. (in Chinese)
- [6] 王大羽,张少辉,宋宇飞. 利用 ETX 路由度量的无线 Mesh 网络协调机会路由协议 [J]. *计算机应用研究*, 2016, 33(5): 1468-1472.
- [7] WANG D Y, ZHANG S H, SONG Y F. Coordinated Opportunistic Routing Protocol with Single-rate Using ETX Routing Metric in WMN [J]. *Application Research of Computers*, 2016, 33(5): 1468-1472. (in Chinese)
- [8] ROZNER E, SESHADRI J, METHA Y A, et al. SOAR: Simple Opportunistic Adaptive Routing Protocol for Wireless Mesh Networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2009, 8(12): 1622-1635.
- [9] 葛晓虎,刘应状,董燕,等. 一种基于 MESH 结构的空天信息网络模型 [J]. *微电子学与计算机*, 2008, 25(5): 39-42.
GE X H, LIU Y Z, DONG Y, et al. A Space-Sky Information Network Model Based on MESH Architecture [J]. *Microelectronic & Computer*, 2008, 25(5): 39-42. (in Chinese)
- [10] COUTO D, J. D S, AGUAYO D, et al. A High-Throughput Path Metric for Multi-hop Wireless Routing [J]. *Wireless Networking*, 2005, 11(4): 419-434.
- [11] MIYAKITA K, NAKANO K, SENGOKU M, et al. Theoretical Analysis of Routing Expected Transmission Count in Multi-hop Wireless Networks [J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2010, 91(8): 2533-2544.
- [12] 赵传强,刘元安,刘凯明,等. 面向吞吐量效率的无线 Mesh 网络机会主义路由 [J]. *北京邮电大学学报*, 2011, 34(2): 81-84.
ZHAO C Q, LIN Y A, LIU K M, et al. A Throughput Efficiency Oriented Opportunistic Routing in Wireless Mesh Networks [J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2011, 34(2): 81-84. (in Chinese)
- [13] KEITH S. Recommendation for Space Data System Standards; SCPS-TP [R]. Blue Book, 1999.
- [14] 田克,张宝贤,马建,等. 无线多跳网络中的机会路由 [J] *软件学报*, 2010, 21(10): 2542-2553.
TIAN K, ZHANG B X, MA J, et al. Opportunistic Routing Protocols for Wireless Multihop Networks [J]. *Journal of Software*, 2010, 21(10): 2542-2553. (in Chinese)
- [15] 程杰,张西芝. 基于动态权重的传感网络路径选择算法仿真 [J]. *计算机仿真*, 2015, 32(4): 257-285.
CHENG J, ZHANG X Z. Simulation of Sensor Network Algorithm Based on Dynamic Weight [J]. *Computer Simulation*, 2015, 32(4): 81-84. (in Chinese)
- [16] 齐新光,梁俊,肖楠,等. 基于模糊多属性综合权重的异构网络选择算法研究 [J]. *现代防御技术*, 2013, 41(6): 76-82.
QI X G, LIANG J, XIAO N, et al. Heterogeneous Network Selection Algorithm Based on Fuzzy Multi-Attribute and Comprehensive Weight [J]. *Modern Defence Technology*, 2013, 41(6): 76-82. (in Chinese)
- [17] 胡图,景志宏,张秋林. 基于可拓模糊层次分析的异构网络选择算法 [J]. *计算机应用*, 2011, 31(9): 2336-2339.
- [18] HU T, JING Z H, ZHANG Q L. Heterogeneous Network Selection Algorithm Based on Extension Theory and Fuzzy Analytic Hierarchy Process [J]. *Journal of Computer Applications*, 2011, 31(9): 2336-2339. (in Chinese)