

## 支持 QoS 的无线 Mesh 网络机会路由优化算法\*

梁俊<sup>1</sup>, 张振浩<sup>1</sup>, 肖楠<sup>1</sup>, 刘玉磊<sup>1</sup>, 胡猛<sup>1</sup>, 卓琨<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安 710077; 2. 中国人民解放军 93995 部队, 陕西西安 710306)

**摘要:**针对空中骨干 Mesh 网络资源有限、计算能力相对不足的特点以及传统简单机会路由 (Simple Opportunistic Adaptive Routing, SOAR) 路由算法未充分考虑负载均衡与不同业务服务质量 (Quality of Service, QoS) 保障需求差异性的问题, 提出一种支持业务区分的改进型 SOAR 路由算法。该算法在考虑链路拥塞控制和负载均衡的基础上, 定义综合预期传输次数来描述链路的综合状态, 有效降低网络拥塞概率; 同时根据传输业务类型的不同, 设计一种基于层次分析法的路由选择策略, 实现路径选择与业务类型的动态匹配。仿真结果表明, 在重负载条件下, 改进型 SOAR 路由算法相比传统 SOAR 路由算法其时延、吞吐量和吞吐率性能明显提升。当网络中存在不同类型业务时, 改进型 SOAR 路由算法能够根据业务 QoS 保障需求的差异性自适应选择最佳传输路径。

**关键词:**无线 Mesh 网络; 机会路由; QoS 保障; SOAR 路由; 层次分析法

**中图分类号:** TN915 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2017)06-143-09

## Optimized QoS-supported algorithm of opportunistic routing in wireless Mesh network

LIANG Jun<sup>1</sup>, ZHANG Zhenhao<sup>1</sup>, XIAO Nan<sup>1</sup>, LIU Yulei<sup>1</sup>, HU Meng<sup>1</sup>, ZHUO Kun<sup>2</sup>

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

2. The PLA Unit of 93995, Xi'an 710306, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of constrained resource and insufficient calculation ability in air-based backbone network and the problem of not fully considering load balancing and difference in requirement of QoS (quality of service) guarantee in the traditional SOAR (simple opportunistic adaptive routing) algorithm, a new algorithm was proposed to support the QoS named improved-SOAR routing algorithm. The algorithm defined comprehensive expected transmission count to describe the comprehensive state of links on the basis of taking the link congestion control and load balancing into consideration. It can effectively reduce the probability of network congestion. A route selection strategy was designed for QoS based on AHP method, according to the service type difference in transmission network. It can achieve the dynamic matching between the path selection and the different service type. Simulation results show that the improved-SOAR routing algorithm has better performance in the transmission delay, the throughput and the throughput rate than the traditional SOAR routing algorithm under heavy network load. When there are different types of services in the network, the improved-SOAR routing algorithm adaptively selects the best transmission path according to the difference of requirement about the QoS guarantee.

**Key words:** wireless Mesh network; opportunistic routing; QoS guarantee; SOAR routing; analytic hierarchy process

无线 Mesh 网络 (Wireless Mesh Network, WMN) 是新兴的宽带多跳无线网络体系结构, 其大大提高了无线系统的覆盖范围。WMN 具有低成本、快速组网、自组织、高带宽、兼容性和扩展性好的优点, 因而被广泛应用于军事通信和战术指挥网中。

路由协议作为 WMN 的关键技术之一, 是当前国内外研究的热点。根据文献 [1-3], 目前针对无线多跳网络 WMN 的路由协议主要分为固定

路由表式路由 (包括表驱动路由、按需驱动路由和混合式路由) 和针对具体场景中业务需求和技术指标的 routing (主要包括机会路由等)。文献 [4] 提出机会路由 (Extremely Opportunistic Routing, ExOR) 协议, 使得传输效率相比传统路由协议提高了 35%, 因而近些年 WMN 路由协议的研究更多集中在机会路由。虽然 ExOR 路由算法性能有了明显提升但总体来看其数据传输效率仍相对较低, 无链路负载均衡控制, 吞吐量相对较低。文

\* 收稿日期: 2016-09-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61501496)

作者简介: 梁俊 (1962—), 男, 安徽马鞍山人, 教授, 硕士, 博士生导师, E-mail: liangjunhja@sina.com

献[5]在 ExOR 的基础上改用 EAX(期望任意路径传输数)路由度量提出了 EExOR,提升数据传输的吞吐量和网络的利用率。但环境因素对路由路径的选择影响较大,导致节点转发效率受制约明显,转发效率低。文献[6]提出的内部速率控制方法和循环轮转数据发送方法,节点只对确定传输链路上出现拥塞的节点进行速率控制,并未考虑选择链路负载轻、期望传输数相对较小的链路转发数据包,不同类型业务数据包传输效率相对较低,算法计算量相对较大。文献[7]提出的 CORP - M 协议,使用期望传输次数(Expected Transmission Count, ETX)路由度量标记成本,提高了平均吞吐量和投递率,但是所有业务均采用最大化吞吐量和最小丢包率的最优链路致使节点转发效率提高不明显,多节点平台存在链路拥塞。文献[8]提出的简单机会路由(Simple Opportunistic Adaptive Routing, SOAR)协议算法性能相比 ExOR 最高可提升 83%,且计算复杂度较低。然而,传统 SOAR 路由算法仅在 ETX 阈值范围内以最大化链路投递率作为路径选择的依据,这种策略虽然在一定程度上保证了传输时延的最小化,但未考虑节点存储转发能力对网络拥塞以及链路吞吐量的影响;另外,对于非时延敏感性业务(如视频、情报数据等)而言,其服务质量(Quality of Service, QoS)保障需求在考虑时延的同时会对链路带宽、吞吐量提出更高要求,因此需要针对不同业务的 QoS 需求综合考虑链路性能,从而确定最佳传输路径。

### 1 网络模型

空中骨干网络是由具有大载荷、长留空能力和稳定连接关系的大型空中骨干平台通过空空宽带数据链以无线 Mesh 的方式自组织构建的一种灵活、高效的网状型网络,用户节点(如战斗机)通过接入空中骨干网实现信息的传输与交互。空中骨干节点具有移动性,因而空中骨干 Mesh 网络相较地面骨干 Mesh 网络接入节点存在移动性并且不完全稳定,但大型空中骨干平台战术机动性差、节点稳定度高的特点使得空中骨干 Mesh 网络相比航空自组织网具有更强的稳定性。空中骨干 Mesh 网络可以保证在一定时间内网络结构在受外部非战争摧毁因素影响下保持相对稳定,各骨干接入节点拓扑结构基本保持不变,因而其网络拓扑结构可用图 1 示意。

在网络拓扑结构示意图的各节点中一次数据发送过程中,假设仅有一个节点  $s$  可以作为源节

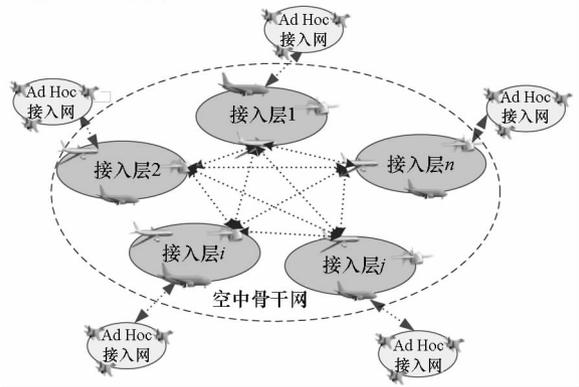


图 1 空中骨干 Mesh 网络示意图

Fig. 1 Diagram of air-based backbone Mesh network

点进行数据发送,仅有一个  $d$  可以作为目的节点进行数据接收,其余节点  $v_i$  均作为中间节点参与数据转发,从而,可以建立如图 2 所示的节点数学模型。

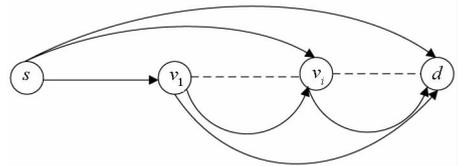


图 2 节点模型

Fig. 2 Model of nodes

### 2 传统 SOAR 路由模型

对于图 2 中抽象得到的空中骨干 Mesh 网络节点模型,转化为有向图  $G = (V, L, D)$ ,其中集合  $V$  表示网络覆盖范围内所有节点,包含网络节点  $v_i = \{v_0, v_1, v_2, \dots, v_n, v_{n+1}\}$ ;集合  $L$  表示任意两个节点  $v_i, v_j$  间所形成的通信链路  $l_{i,j} \in L$ ;集合  $D$  表示在链路中传输数据包时两节点间的成功投递率,任意两节点  $v_i, v_j$  之间的链路  $l_{i,j}$  的投递率用  $d_{i,j}$  表示,其中  $d_{i,j} \in D, d_{i,i} = 1$ ,投递率由文献[4]和文献[9]所提出的方法计算获得。

假设在源节点向目的节点发送数据包的过程中,参与数据发送接收的各节点间投递率是恒定的,而且单信道相干时间远大于数据包在信道中传输的时间。此外,假设同一节点与不同邻居之间的链路保持统计独立<sup>[10]</sup>。此外,根据文献[11-12],前向链路和反向链路是不对称的。为实现节点协作传输中各转发节点之间数据传输的高效,抑制数据重传,同时应对双向链路的不对称性,保证转发节点收到数据包后发送的应答能够被发送节点收到,可以通过引入可靠的应答机制,保证应答成功率接近 100%。为此,根据文献[12]所述可靠应答机制 CACK,在引入该确认

机制并对其进行改进优化时,可假设此时 ACK 应答的投递率为 100%。

### 2.1 模型建立

设  $s, d \in V$  为节点集  $V$  中任意两节点,分别用以数据包发送和接收。变量  $F: V \times V \rightarrow R$  表示在源节点到目的节点所形成的有序转发节点集合  $R_{s,d}$  中各节点的转发优先级。 $R_{s,d}$  表示从源节点到目的节点形成的转发列表,  $R_{s,d} = \{(s = v_0, v_1, v_2, \dots, v_n, v_{n+1} = d) : F_{v_i,d} \leq F_{v_{i+1},d}\}$ 。在  $R_{s,d}$  节点集合中下标增大,优先级随之提高<sup>[13]</sup>。任意节点  $v_i$  向目的节点转发数据包,只有其为优先级最高的节点才可以转发数据包。在所有收到该数据包的转发节点中,各节点依据转发优先级顺序依次进行应答。

设  $p_{v_i,v_j}$  表示节点  $v_i \in R_{s,d}$  向目的节点发送的数据包被比节点  $v_i$  优先级高的节点  $v_j (i < j)$  收到,但未被比  $v_j$  优先级更高的节点  $v_k (j < k)$  收到的概率。根据链路传输数据包的统计独立性,可得:

$$p_{v_i,v_j} = \begin{cases} d_{v_i,v_j} \prod_{k=j+1}^{n+1} (1 - d_{v_i,v_k}) & \forall i \leq j \\ 0 & \forall i > j \end{cases} \quad (1)$$

根据上述定义,路由及节点转发模型可用图 3 表示。

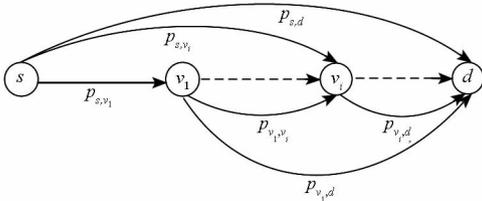


图 3 路由及节点转发模型

Fig. 3 Model of routing and nodes forwarding

### 2.2 路由度量

SOAR 路由协议采用的路由度量为 ETX,根据第 2 节开头的假设,采用 SOAR 路由协议设置的 ACK 确认和重传机制时,ACK 分组可以完全被接收,反向投递率为 1,因而,在 SOAR 路由协议中 ETX 仅由前向投递率决定。

根据上述路由模型,建立如图 4 所示三个节点的拓扑模型,得到转发列表  $R_s^d = \{s, v, d\}$ 。

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。其中,事件 A 发生概率为  $P(A) = p_{s,v} + p_{s,d}$ ,事件 A 与事件 B 同时发生的概率为  $P(AB) =$

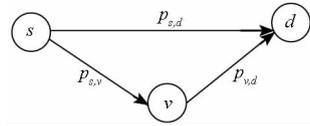


图 4 三节点拓扑模型

Fig. 4 Topology model of three nodes

$p_{s,v}$ , 条件概率  $P(B|A) = p_{s,v} / (p_{s,v} + p_{s,d})$ ,  $P(C|A) = p_{s,d} / (p_{s,v} + p_{s,d})$ 。根据图 4 所示三节点拓扑模型,目的节点  $d$  收到数据包可分为两种情况:一是源节点发送的数据包直接被目的节点接收;二是源节点发送的数据包无法直接被目的节点  $d$  接收但是可先由中间节点  $v$  接收后将该数据包转发到目的节点  $d$ 。在应用条件概率求解图 4 模型下源节点  $s$  到目的节点  $d$  的 ETX 值时,考虑源节点  $s$  经过一次或者两次转发到达目的节点  $d$  的情况,从而可以得到转发列表的 ETX 值<sup>[14]</sup>为:

$$ETX_{s,v,d} = \frac{1}{p_{s,v} + p_{s,d}} + P(B|A) \frac{1}{p_{v,d}} + P(C|A) \cdot 0 = \frac{1 + \frac{p_{s,v}}{p_{v,d}}}{p_{s,v} + p_{s,d}} \quad (2)$$

则对于转发列表  $R_{s,d} = \{s = v_0, v_1, v_2, \dots, v_n, v_{n+1} = d\}$ ,将式(2)中的  $1/p_{s,v}$  推广到多转发节点中,用期望传输数  $E_{v_i,v_{n+1}}$  表示转发节点  $v_i$  到目的节点  $v_{n+1}$  间的平均传输次数,可以计算得到转发列表  $R_{s,d}$  的期望传输次数<sup>[15]</sup>为:

$$ETX_{R_{s,d}} = E_{v_0,v_{n+1}} = (1 + \sum_{i=1}^n p_{v_0,v_i} \cdot E_{v_i,v_{n+1}}) / \sum_{i=1}^{n+1} p_{v_0,v_i} \quad (3)$$

## 3 改进型 SOAR 路由协议设计

### 3.1 改进型 SOAR 路由度量设计

#### 3.1.1 probe 分组包改进

传统 SOAR 路由协议通过周期性发送与接收 probe 分组包,计算各转发节点的投递率,进而可以得到链路的 ETX,寻找最小 ETX 值链路作为最优链路。这种路径选择依据尤其适用于数据量小、时延要求较高的业务,但是对于时延要求相对较低且带宽要求较高的业务而言,路径选择不仅要考虑链路的 ETX,还要考虑路径中节点的处理转发能力。由于空中 Mesh 骨干网节点资源有限,其缓存能力大小是度量分组转发能力的重要指标之一。节点的缓存能力将决定上一个节点发送的数据包被下一个节点接收后能否顺利放入缓存最终进入转发队列。当选择的链路中某个中间节点因为负载过重无法转发分组数据包时,会导致致

据包被该节点大量丢弃,从而成为整条链路的“瓶颈”,造成局部拥塞。因此,本文提出的改进型 SOAR 路由协议对 probe 分组包进行改进,对转发节点的缓存能力进行记录,并将缓存能力作为链路中备选转发节点的考虑指标。改进型 SOAR 路由协议中 probe 帧结构如图 5 所示。

2	3	4
Frame control	Duration	Payload Len
Source ID		
Dest ID		
Forwarder Num		Forward max hop
Node Cache capacity		FwdList Size
Forwarder List		
Batch Map		
Checksum		

图 5 probe 帧结构

Fig. 5 Frame structure of probe

图中,Frame control 为 probe 控制帧,Duration 为 probe 帧持续时间,Payload Len 为 probe 数据净荷长度,Source ID 表示源节点号,Dest ID 表示目的节点号,Forwarder Num 表示转发的次数,Forward max hop 用于记录源节点到目的节点的最大跳数,Node Cache capacity 用于 probe 分组记录改进型 SOAR 路由协议中各个转发节点的缓存大小,Forwarder List 表示发送节点的本地转发列表的复本,其中源节点与目的节点被标注,并且随到达节点不断更新。Batch Map 表示转发列表对应的缓存索引。Checksum 表示该帧的经验数据。

### 3.1.2 改进型 SOAR 路由度量

SOAR 路由协议仅以端到端的投递率来衡量数据包成功接收的概率,无法较全面地反映数据包被各节点接收的准确情况。由于数据包被节点转发时各节点的缓存能力同样影响数据包的转发成功率,同时考虑链路负载的均衡和链路拥塞控制以及相关文献解决该问题时算法较复杂的问题,本文提出了可达率的概念。可达率  $g_{i,j}$  指数据包从节点  $i$  发送经过链路传输到达节点  $j$ ,被节点  $j$  全部缓存后成功转发到下一个节点的概率。可达率由两节点  $v_i$  和  $v_j$  间链路  $l_{i,j}$  的投递率  $d_{i,j}$  和缓存节点的缓存区可用空间共同决定。

定义节点  $i$  缓存区空闲度<sup>[16]</sup>:

$$\alpha = \frac{TR_i}{RcR_i^2}$$

式中, $TR_i$  表示节点  $i$  的数据包发送速率, $RcR_i$  表示节点  $i$  的数据包接收速率。其中, $TR_i$  和  $RcR_i$  均可通过文献[16]提供的方法获得。定义可达率  $g_{i,j}$  可用式(4)表示:

$$g_{i,j} = \alpha \times d_{i,j} \quad (4)$$

改进型 SOAR 路由算法针对原有 SOAR 路由度量负载均衡机制不足的问题,结合提出的可达率的概念,对原有 SOAR 路由算法中设计的路由度量进行优化,提出综合预期传输次数(Comprehensive Expected Transmission Count, C-ETX)用来描述各节点所构建链路的综合状态。通过寻找链路 C-ETX 最小值进行拥塞控制和最优链路选择。

根据式(1),定义  $p'_{v_i,v_j}$  表示改进型 SOAR 路由协议中节点  $v_i \in R_{s,d}$  向目的节点发送的数据包被比节点  $v_i$  优先级高的节点  $v_j (i < j)$  收到并成功转发,但未被比  $v_j$  优先级更高的节点  $v_k (j < k)$  成功转发的概率,从而得到式(5):

$$p'_{v_i,v_j} = \begin{cases} g_{v_i,v_j} \prod_{k=j+1}^{n+1} (1 - g_{v_i,v_k}) & \forall i \leq j \\ 0 & \forall i > j \end{cases} \quad (5)$$

结合式(3)~(5)可得式(6),其中  $E'_{v_i,v_{n+1}}$  表示转发节点  $v_i$  到目的节点  $v_{n+1}$  的综合预期传输次数。

$$C-ETX_{R_{s,d}} = E'_{v_0,v_{n+1}} = (1 + \sum_{i=1}^n p'_{v_0,v_i} \cdot E'_{v_i,v_{n+1}}) / \sum_{i=1}^n p'_{v_0,v_i} \quad (6)$$

为确定改进型 SOAR 路由协议中备选转发节点集合,需要确定 C-ETX 阈值,使得转发节点可以限制在最优路径附近。经过分析,C-ETX 阈值采用固定值时,无法满足机会路由备选转发节点的选择要求。结合 SOAR 路由算法中 ETX 阈值确定方法<sup>[8]</sup>,改进型 SOAR 路由协议在确定 C-ETX 阈值时由最优链路上的节点  $A$  与链路上预设下一跳节点  $B_{nextHop}$  来确定,可用式(7)来表示:

$$C-ETX_{threshold} = \gamma \times C-ETX(A, B_{nextHop}) \quad (7)$$

式中, $\gamma$  是常数,其取值为了保证备选转发节点与节点  $A$  之间的链路性能相比节点  $A$  与预设下一跳节点  $B_{nextHop}$  之间的无较大偏差。经验证  $\gamma$  在 2~6 之间取任一常数时均满足条件,考虑到需要一定数量的备选转发节点,因而此处取  $\gamma = 4$ 。

### 3.2 改进型 SOAR 路由协议吞吐量

假设源节点  $s$  发送了  $N$  个数据包,每个数据包大小为  $L_d$ ,根据式(6)得到的综合预期传输次数可以得到改进型 SOAR 路由算法中源节点  $s$  发

送的数据包成功到达目的节点的数据量(单位: bit)为  $D_1$ ,可用式(8)计算求得。

$$D_1 = \frac{L_d N}{C-ETX_{R_s,d}} = \frac{L_d N \sum_{i=1}^{n+1} p'_{v_0,v_i}}{1 + \sum_{i=1}^n p'_{v_0,v_i} \cdot E'_{v_i,v_{n+1}}} \quad (8)$$

数据包传输时,使用改进型 SOAR 路由策略,数据包在链路中传输的总时间<sup>[17]</sup>为:

$$T_1 = \sum_{i=1}^n t_i N p'_{v_i,v_j} \quad (9)$$

式中,  $t_i$  表示源节点  $s$  与转发节点  $v_i$  之间的一跳传输时间,主要由数据传输时间  $t_1$  和传播时延  $t_2$ , 以及转发节点  $v_i$  的协作时间  $t_3$  共同构成,可用式(10)表示<sup>[18]</sup>。

$$t_i = t_1 + t_2 + t_3 \quad (10)$$

从而,可以根据式(8)~(10)得出改进型 SOAR 路由算法中链路的吞吐量,用式(11)表示。

$$TP_1 = \frac{D_1}{T_1} = \frac{L_d \sum_{i=1}^{n+1} p'_{v_0,v_i}}{(1 + \sum_{i=1}^n p'_{v_0,v_i} \cdot E'_{v_i,v_{n+1}}) \sum_{i=1}^n t_i p'_{v_i,v_j}} \quad (11)$$

### 3.3 层次分析法确定动态路径

空中骨干网通过 WMN 传输的业务类型是多样化的,包括话音业务,图像、视频数据流业务和短报文业务等。针对不同的业务类型,用户对所传输信息的要求不同,应结合不同类型业务对业务传输速率、丢包率、时延性能和误码率等网络性能衡量参数的要求进行路由链路选择。本文引入层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP), 选用最小 ETX 倒数、吞吐量和可达率三个参数作为路由路径选择的评价参数,分别描述业务的时延特性、传输速率和丢包率。利用 AHP 进行权重确定时的层次结构模型如图 6 所示。

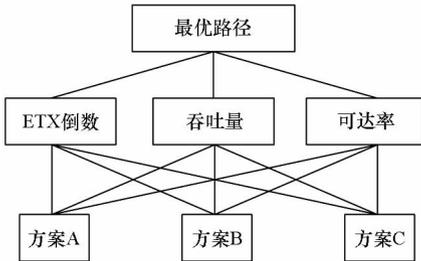


图 6 层次结构模型

Fig. 6 Hierarchical structure model

建立判断矩阵,并采用 Saaty 教授的 1-9 标度法<sup>[19]</sup>赋予分值,确定模型中所选取的各因素的权重,并进行一致性检验,最后利用方根法进行权

重计算。

根据网络中传输的数据类型不同,对于设定的三个评价参数分别给以权重系数  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ , 确定路由路径选择的效用函数为:

$$f = \lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2 + \lambda_3 f_3 \quad (12)$$

式中,  $f_1, f_2, f_3$  分别表示路由选择对应的最小 ETX 倒数、吞吐量和可达率三个参数。对于任意待传输业务,根据效用函数计算各备选路径的综合效用值,在阈值允许范围内选取式(12)最大值对应的路径为最佳传输路径。

### 3.4 算法流程描述

在改进型 SOAR 路由算法中为实现业务类型与路由路径选择的动态匹配,大致可以分为以下四步,具体可用图 7 所示的框图表示。

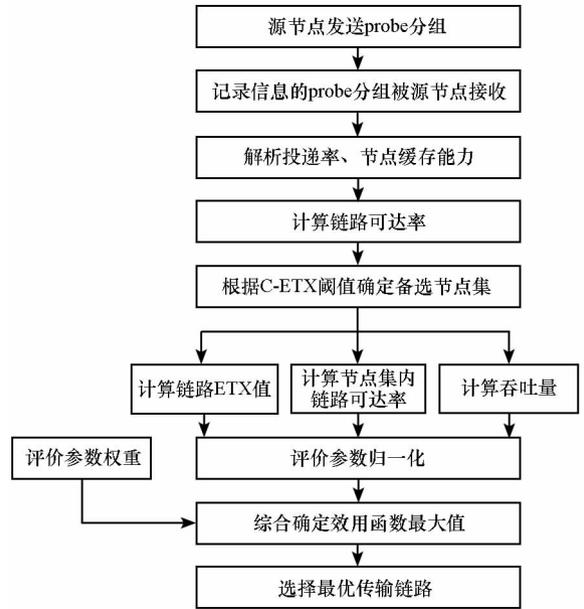


图 7 改进型 SOAR 路由算法框图

Fig. 7 Flow-process diagram of improved-SOAR routing algorithm

**步骤 1:**根据改进型 SOAR 路由协议设计的 probe 分组周期性向链路广播固定大小的 probe 分组包。根据收发 probe 分组情况,记录链路的投递率。

**步骤 2:**根据 probe 分组收集的介质访问控制 (Media Access Control, MAC) 层前期剩余采样节点数据包和当前采样数据包确定接收速率和发送速率,计算得到节点的缓存区空闲度和链路的可达率。

**步骤 3:**根据链路可达率,计算链路的综合预期传输次数 C-ETX 值,确定最优传输路径。并根据设定的 C-ETX 阈值,确定备选传输节点集。

**步骤 4:**根据链路需要传输的业务类型与该业务权重确定转发节点及转发链路。

## 4 仿真与分析

### 4.1 无线业务类型模型

目前,空中骨干网根据特定的任务、平台及通信传输的需要,可以实现与单一飞机相连传输话音或低速数据,也可以与数百架机群相连传输高速图像与实时音频视频信号。根据业务内在技术要求大致可以把空中骨干网传输的业务分成三类:短报文业务、话音业务、视频和图像业务。受三类业务自身 QoS 特征的影响,三种业务类型的主流业务具有不同特色。根据文献[20]中给出的不同类型业务对 QoS 要求的不同,利用层次分析法确定每种业务各评价参数的权重,结果如表 1 所示。

表 1 不同类型业务的评价参数权重

Tab. 1 Weight of evaluation parameters for different types of services

业务类型	评价参数		
	ETX 倒数	吞吐量	可达率
短报文业务	0.266 2	0.137 1	0.596 7
话音业务	0.592 6	0.287 3	0.120 1
视频和图像业务	0.237 6	0.564 1	0.198 3

### 4.2 仿真与验证

#### 4.2.1 路由协议性能比较

空中骨干 Mesh 网络的骨干节点是大型空中平台,其机动性能相对较弱,在一定时间内各骨干节点相对位置基本保持不变,网络拓扑基本保持稳定。因而将骨干节点的运动抽象为质点匀速运动模型,在 MATLAB 仿真环境下,假设网络存在 6 个节点,设置低中高三种负载强度  $L$  分别为 0.2, 0.5 和 0.8。假设源节点数据发送能力和目的节点数据接收能力均为无限大,节点 1 为源节点,节点 7 为目的节点,其余转发节点根据负载强度随机设置三组节点缓存能力。结合大型空中平台飞行速度等因素,仿真选取各个空中大型平台和各接入网所包含的节点随机分布在  $3500 \text{ km} \times 3500 \text{ km}$  范围内,两节点间数据通信欧式距离不超过 600 km,设置仿真验证次数为 5000。

图 8 给出了不同负载条件下两种算法传输时延随数据量的变化关系。由图可知,随着数据量的增加,两种算法的传输时延均在不断增大,但是三种负载条件下本文提出的改进型 SOAR 路由算法的传输时延性能均优于传统 SOAR 路由算法,

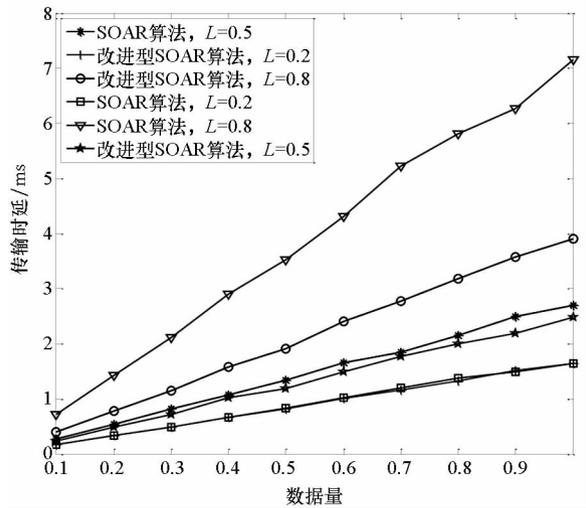


图 8 数据量与传输时延的关系

Fig. 8 Relationship between the size of data and transmission delay

其中当  $L = 0.2$  时,由于网络负载较低,基本上不考虑节点缓存能力对数据包传输的影响,因此两种算法的时延性能相当。但是随着负载的加大,节点缓存能力对传输时延性能的作用变得非常显著,例如当  $L = 0.8$ 、数据量为 0.6 时,改进型 SOAR 路由算法的传输时延较传统 SOAR 路由算法下降了 112.36%,这是由于改进型 SOAR 路由算法在路径选择时不仅考虑了链路的期望传输次数,还考虑了路径中转发节点的数据缓存能力,保证数据不被节点丢弃,从而降低数据转发时延,最终降低了总传输时延。

图 9 给出了不同负载条件下两种算法链路吞吐量随数据量的变化关系。由图可知,随着数据量的增加,两种算法均在小数据量业务传输时,吞吐量增长速度较快;在传输大数据量业务时,吞吐量增加相对缓慢。但是三种负载条件下本文提出的改进型 SOAR 路由算法链路吞吐量均大于传统 SOAR 路由算法。从图中可以看出,当数据量小于 0.3 时,三种负载强度下的改进型 SOAR 路由算法与负载强度为 0.2 和 0.5 的传统 SOAR 路由算法吞吐量基本相同。这是由于负载强度较小时,网络中传输一定数据量的数据时,节点缓存能力对链路吞吐量增加的限制作用可以忽略,因此两种算法的链路吞吐量性能相当。但是随着数据量和负载强度的加大,改进型 SOAR 路由算法的吞吐量性能明显提升。例如当数据量为 0.9、负载强度  $L = 0.8$  时,改进型 SOAR 路由算法的吞吐量相比传统 SOAR 路由算法的提升了约 36.67%。这是由于改进型 SOAR 路由算法在路

径选择时综合考虑了链路传输性能和节点缓存能力,选择最优转发节点集,从而提高了在大数据量和重负载条件下数据包传输的链路吞吐量。

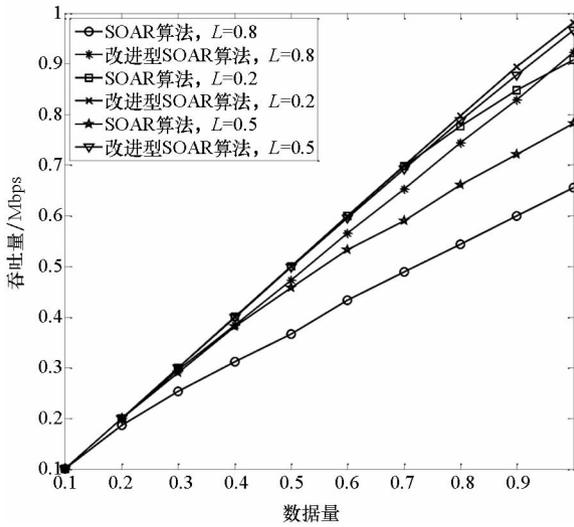


图 9 数据量与吞吐量的关系

Fig. 9 Relationship between the size of data and throughput

图 10 给出了不同负载条件下两种算法数据吞吐率随数据量的变化关系。由图可知,随着数据量的增加,两种算法的吞吐率均由 1 开始不断减小,但是三种负载条件下本文提出的改进型 SOAR 路由算法的吞吐率均比传统 SOAR 路由算法的有较低的降低速率。例如,当  $L = 0.2$ 、传输数据的数据量为 0.7 时,两种算法的吞吐率才开始下降,这是由于网络负载较低时,小数据量数据传输时,节点缓存能力对数据传输影响较小,因此两种算法的吞吐率可以保持相对较高的水平。随着负载强度的加大,节点缓存能力对吞吐率性能

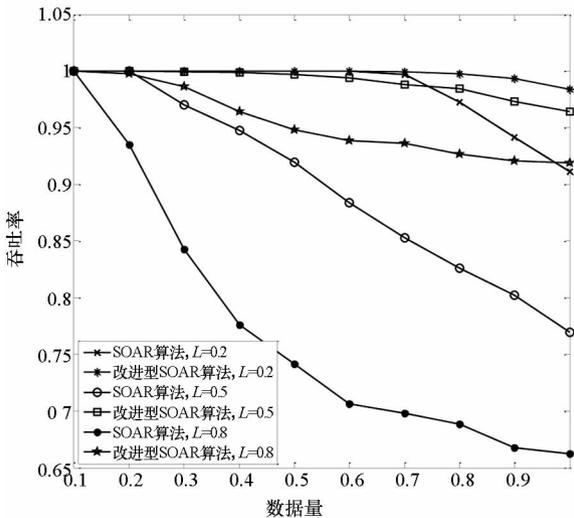


图 10 数据量与吞吐率的关系

Fig. 10 Relationship between the size of data and throughput rate

的作用变得非常显著。当  $L = 0.8$  时,数据量较低时,改进型 SOAR 路由算法的吞吐率与传统 SOAR 路由算法的均已开始下降,但是改进型 SOAR 路由算法的吞吐率性能相比传统 SOAR 路由算法的下降较缓慢。这是因为改进型 SOAR 路由算法在路径选择时综合考虑链路与节点传输性能,使得在重负载、大数据量业务传输时,链路可以保持相对高效传输效率,吞吐率相对较高。

通过仿真结果可以看出,改进型 SOAR 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,重负载条件下性能提升更明显。

#### 4.2.2 不同业务下路由协议性能比较

经过 4.2.1 小节的比较可以看出,改进型 SOAR 路由算法相比传统 SOAR 路由算法性能有所提高。设置与 4.2.1 小节相同的仿真环境,针对不同业务类型与不同负载强度比较 SOAR 路由算法与改进型 SOAR 路由算法的性能,仿真结果如图 11 与图 12 所示。

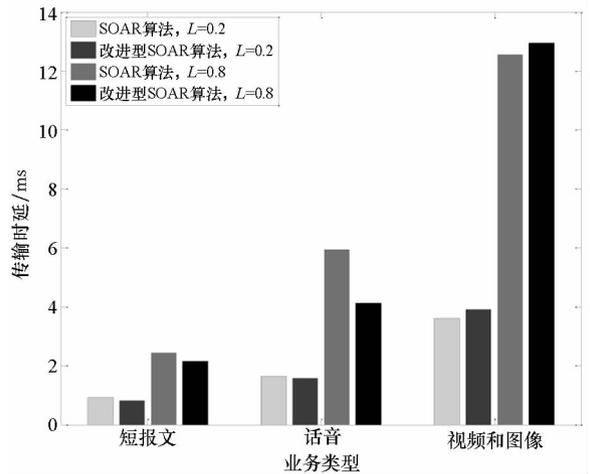


图 11 不同业务类型与不同负载下传输时延对比关系

Fig. 11 Relationship between the different type of service and transmission delay in different network load

在相同业务类型、不同负载强度情况下,传输短报文业务时,轻负载条件下改进型 SOAR 路由协议相比传统 SOAR 路由协议吞吐量改善不明显,传输时延略有降低;重负载条件下传输时延和网络吞吐量性能提升显著。在负载较轻时,链路传输性能均较好,改进型 SOAR 路由算法使用 AHP 方法进行业务区分保证短报文业务传输的准确性时,与传统 SOAR 路由算法选择路径类似。重负载时,改进型 SOAR 路由算法选择传输数据包准确性较高的链路进行传输,该链路中节点缓存能力和链路质量均相对较高,因而传输时延和吞吐量得到改善。传输语音业务时,改进型

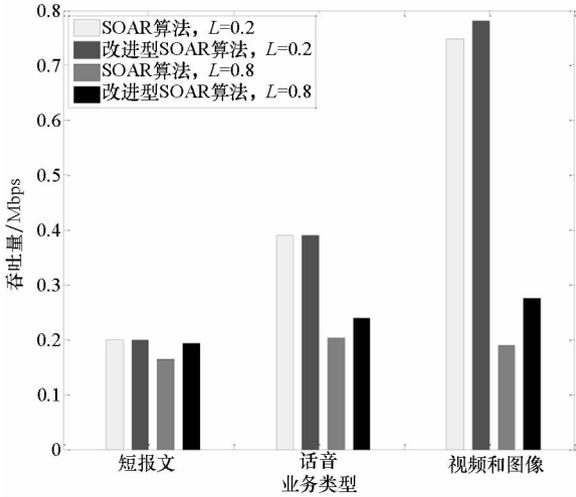


图 12 不同业务类型与不同负载下吞吐量对比关系

Fig. 12 Relationship between the different type of service and throughput in different network load

SOAR 路由算法在轻负载条件下传输时延和网络吞吐量相比传统 SOAR 路由算法改善不明显;在重负载条件下,传输时延降低 30.3%,吞吐量提升 17.73%。这是因为改进型 SOAR 路由算法应用 AHP 方法赋予传输语音业务时时延指标更高的权值,因而时延特性改善明显。传输视频和图像业务时,改进型 SOAR 路由算法在牺牲部分传输时延的情况下极大提升了链路吞吐量性能。例如,当负载  $L = 0.8$  时,传输时延增加 3.19%,但是链路吞吐量增加了 45.19%。这是因为改进型 SOAR 路由算法在传输视频和图像业务时为了满足 QoS 保障要求,选择节点缓存能力最好、链路传输能力最大的链路,因而牺牲了对于视频和图像业务要求较低的时延特性,保障了视频和图像业务要求较高的吞吐量性能。

### 4.2.3 不同路由协议开销性能比较

在对路由协议性能与不同业务下路由协议的性能进行对比后发现,改进型 SOAR 路由算法在重负载条件下性能明显优于传统 SOAR 路由算法。但由于针对 SOAR 路由算法的改进,需要提取更多的信息用于计算,因而设置与 4.2.1 小节相同的仿真环境,对改进型 SOAR 路由算法与传统 SOAR 路由算法的开销性能进行比较,仿真结果如图 13 所示。

改进型 SOAR 路由算法相比传统 SOAR 路由算法在探测过程中更为复杂,以选择综合最优链路用于传输不同类型的业务与不同数据量的信息。针对 probe 分组包的改进,在帧结构中多开销了 4 Byte 数据用于记录各转发节点的缓存能力,相比原有 probe 分组包报文开销增加了

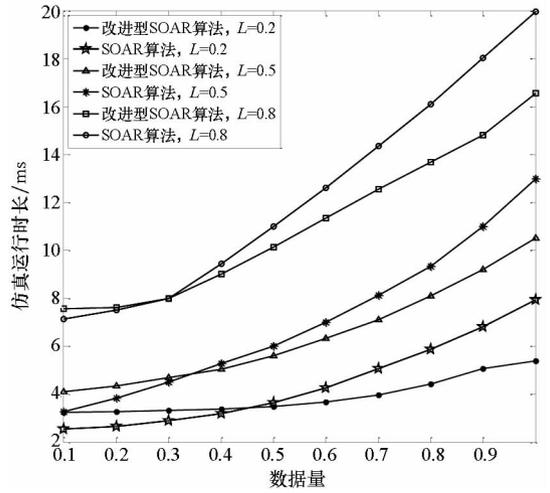


图 13 数据量与协议开销的关系

Fig. 13 Relationship between the size of data and protocol overhead

6.7%。根据 4.2.1 与 4.2.2 小节仿真验证,在探测过程中增加该开销可以实现重负载情况下更高的数据吞吐量,因而对该探测过程中的数据开销可以忽略。

改进型 SOAR 路由算法与传统 SOAR 路由算法进行定量数据传输时,可在仿真验证中引入仿真运行时长对整个数据传输过程中不同路由协议开销性能进行比较。其中,仿真运行时长用来表征机会路由协议从探测包发送到携带数据的数据包被完全接收的总时间和。

从图 13 中可以看出,在  $L = 0.2$ 、数据量小于 0.5,  $L = 0.5$ 、数据量小于 0.34,  $L = 0.8$ 、数据量小于 0.3 时,改进型 SOAR 路由算法的仿真运行时长均大于传统 SOAR 路由算法的仿真运行时长。这是因为在上述条件下,节点对数据包传输限制较小,网络不存在拥塞现象,改进型 SOAR 路由算法在获选更多状态信息时开销了较多资源,因而相比传统 SOAR 路由算法仿真运行时间长。在  $L = 0.2$ 、数据量大于 0.5,  $L = 0.5$ 、数据量大于 0.34,  $L = 0.8$ 、数据量大于 0.3 时,改进型 SOAR 路由算法运行时长明显少于传统 SOAR 路由算法。这是因为在该条件下,改进型 SOAR 路由算法确定的最优路径要优于传统 SOAR 路由算法,从而大大减小了数据包重传次数,虽探测包开销相比传统 SOAR 路由算法大,但是很好地解决了重负载、高数据量条件下数据高效传输问题。从图 13 中可知,在数据量为 0.1,  $L = 0.2$  时,改进型 SOAR 路由算法相比传统 SOAR 路由算法计算开销多达 19.56%;而在数据量为 1,  $L = 0.8$  时,改进型 SOAR 路由算法因为减少了重传次数而少消

耗网络资源 20.61%。因而,改进型 SOAR 路由算法在重负载条件下传输视频等大数据量业务时相比传统 SOAR 路由算法性能提升较明显。

## 5 结论

改进型 SOAR 路由协议相比传统 SOAR 路由协议在轻负载与重负载条件下时延、吞吐量和吞吐率性能均有提升,重负载条件下更明显。应用 AHP 方法,根据网络中传输业务类型的不同对 QoS 保障的要求不同,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] Mao G Q. Wireless multi-hop networks: current research and future challenges [J]. *Journal of Communications*, 2012, 7(5): 357-364.
- [2] Boukerche A, Turgut B, Aydin N, et al. Routing protocols in ad hoc networks: a survey [J]. *Computer Networks*, 2011, 55(13): 3032-3080.
- [3] Alotaibi E, Mukherjee B. A survey on routing algorithms for wireless Ad-Hoc and mesh networks [J]. *Computer Networks*, 2012, 56(2): 940-965.
- [4] Biswas S, Morris R. ExOR: opportunistic multi-hop routing for wireless networks [J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2005, 35(4): 133-144.
- [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 Feng, SHEN Song. The study of opportunistic routing for wireless Mesh networks [J]. *Electronic Design Engineering*, 2016, 24(5): 58-61. (in Chinese)
- [6] 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 Haisheng, WANG Guijin, LIN Xinggang. Analysis and improvement of opportunistic routing over wireless Mesh networks [J]. *Journal of Applied Sciences*, 2011, 29(2): 111-117. (in Chinese)
- [7] 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.  
WANG Dayu, ZHANG Shaohui, SONG Yufei. 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] de Couto D S J, Aguayo D, Bicket J, et al. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing [J]. *Wireless Networking*, 2005, 11(4): 419-434.
- [10] Zubow A, Kurth M, Redlich J P. Considerations on forwarder selection for opportunistic protocols in wireless networks [C]//*Proceedings of 14th European Wireless Conference*, 2008: 1-7.
- [11] Li Y H, Chen W, Zhang Z L. Optimal forwarder list selection in opportunistic routing [C]//*Proceedings of IEEE, International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems*, 2009: 670-675.
- [12] 赵传强. 基于机会路由与多路径路由的无线 Mesh 网络关键技术研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2010.  
ZHAO Chuanqiang. Research on key technologies of opportunistic routing and multi-path routing for wireless Mesh networks [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010. (in Chinese)
- [13] Miyakita K, Nakano K, Sengoku M, et al. Theoretical analysis of route expected transmission count in multi-hop wireless networks [J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2008, E91. B(8): 2533-2544.
- [14] 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 Chuanqiang, LIU Yuanan, LIU Kaiming, 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)
- [15] Cacciapuoti A S, Caleffi M, Paura L. A theoretical model for opportunistic routing in ad hoc networks [C]//*Proceedings of International Conference on Ultra Modern Telecommunications & Workshops*, 2009.
- [16] 郭嘉丰, 张信明, 谢飞, 等. 基于节点空闲度的自适应移动 Ad Hoc 网络路由协议 [J]. *软件学报*, 2005, 16(5): 960-969.  
GUO Jiafeng, ZHANG Xinming, XIE Fei, et al. A leisure degree adaptive routing protocol for mobile Ad Hoc network [J]. *Journal of Software*, 2005, 16(5): 960-969. (in Chinese)
- [17] Wang T, Li W W, He S M. Node load balance multi-flow opportunistic routing in wireless mesh networks [J]. *Sensors & Transducers*, 2014, 168(4): 162-172.
- [18] 葛青, 白光伟, 沈航, 等. 无线网络面向视频传输优化的机会网络编码机制 [J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(7): 1706-1712.  
GE Qing, BAI Guangwei, SHEN Hang, et al. Optimized opportunistic network coding mechanism for video transmission in wireless networks [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(7): 1706-1712. (in Chinese)
- [19] 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 Xinguang, LIANG Jun, XIAO Nan, 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)
- [20] 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.  
HU Tu, JING Zhihong, ZHANG Qiulin. 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)