

基于联合编码且负载均衡的 AODV 路由策略

王振朝^{1,2} 宋伯尧¹ 白莉莎¹

(河北大学电子信息工程学院 河北 保定 071002)¹

(河北省数字医疗工程重点实验室 河北 保定 071002)²

摘要 在无线网状网中,为使 AODV(Ad hoc On-demand Distance Vector routing)路由协议支持流间编码并解决流间编码带来的负载不均衡问题,提出了一种优化的路由策略 CLAODV(Coding-aware and Load balanced AODV)。该策略允许编码节点的多个下游节点共同解码同一个编码包,以增加路径上的编码机会。同时,设计了一个可以同时体现路径上编码增益、路径丢包率以及路径负载程度的新路由度量参数(Expected Coding-aware Transmission Count and Load balancing,ECTXL)。CLAODV 路由策略可根据该参数进行路由选择。仿真结果表明:与其他相关路由策略相比,文中提出的 CLAODV 路由策略不仅能有效增加路径的编码机会,提高网络吞吐量,而且可以明显降低路由时延与带宽资源开销。

关键词 AODV,共同解码,编码增益,负载均衡

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.10.019

AODV Routing Strategy Based on Joint Coding and Load Balancing

WANG Zhen-chao^{1,2} SONG Bo-yao¹ BAI Li-sha¹

(College of Electronic Information Engineering, Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China)¹

(Key Laboratory of Digital Medical Engineering of Hebei Province, Baoding, Hebei 071002, China)²

Abstract In wireless mesh, this paper proposed an optimized routing strategy Coding-aware and Load balanced AODV (CLAODV). The strategy can not only enable the AODV routing protocol to support inter-stream coding, but also solve the load imbalance problem caused by inter-stream coding. The proposed strategy allows multiple downstream nodes of coding node to jointly decode the same coded packet to increase the coding opportunities on the path. A new routing metric parameter ECTXL, which can simultaneously reflect the coding gain, path packet loss rate and the path load level, was designed. The CLAODV strategy can be routed based on this parameters. The simulation results show that the proposed CLAODV routing strategy can increase the path coding opportunities effectively, improve the network throughput, and significantly reduce the routing delay and bandwidth resource overhead compared with other related routing strategies.

Keywords AODV, Joint decoding, Coding gain, Load balancing

1 引言

网络编码允许作为数据转发的节点对数据进行编码,从而使无线网达到“最大流最小割定理”^[1]所规定的数据传输速率上限^[2]。按照数据来源,网络编码分为流内编码和流间编码。多条数据流经过流间编码后可以使用相同的资源进行传输,这样相应的每条数据流使用的资源将会减少。但这也引起各条数据流向有编码机会的区域靠拢,使部分节点的负载加重,进而抵消流间编码带来的增益^[3]。

为此,在无线网状网中应用流间编码技术时,不得不考虑负载均衡这一因素。文献[4]基于 COPE 优化的路由策略,在综合考虑了节点编码机会和节点负载程度后,设计了一种新的路由度量 LQM(Link Quality Metric)来选择高质量的节点

作为转发节点。它采用的机会监听机制容许节点接收目的节点不是自己的数据包,节点只根据其下一跳节点侦听到的数据包情况来判断本节点能否进行流间编码,因此它的编码结构局限在两跳节点范围内,这就要求编码节点的下一跳节点立即解码,从而忽略了编码节点的多跳下游节点作为解码节点带来的编码机会。文献[5]介绍了 ILCAR 路由策略,把编码结构扩展到多跳节点范围内,增加了编码机会,同时综合考虑了编码增益、节点负载程度等因素,设计了一种编码感知路由度量(Interference avoiding Load balance and Coding Aware, ILCA),并根据该度量进行路由选择。但是,该策略只容许编码节点的一个下游节点作为解码节点,忽略了多个下游节点分步解码同一个编码包时带来的编码机会。

本文提出一种优化的路由策略 CLAODV,采用联合编码

到稿日期:2017-09-18 返修日期:2017-12-27 本文受河北省自然科学基金项目(F2014201168)资助。

王振朝(1958—),男,博士,教授,主要研究方向为下一代移动通信网与工业数据通信,E-mail:786657713@qq.com(通信作者);宋伯尧(1993—),男,硕士生,主要研究方向为网络编码;白莉莎(1992—),女,硕士生,主要研究方向为密集异构网络。

的减少量 (Reduce the amount of Expected Transmission Count, RETX) $RETX_{vj}$ 作为路径 P 上链路 $l_{v \rightarrow j}$ 中的编码增益。因此,可以用路径 P 上传输数据流消耗的总期望传输次数的减少量 $RETX(P)$ 来表示路径上编码增益的大小,如式(5)所示。其中, C 是路径 P 中可以进行流间编码的节点集合,节点 $v \in C$ 表示节点 v 是路径 P 上的一个编码节点。 $RETX(P)$ 值越大,路径 P 上的编码增益就越大。

$$RETX(P) = \sum_{v \in C} RETX_{vj} \quad (5)$$

如果路径 P 上链路 $l_{v \rightarrow j}$ 中的数据流和链路 $l_{v \rightarrow a}$ 中已经存在的数据流 f 在节点 v 上不进行流间编码,则路径 P 上的链路 $l_{v \rightarrow j}$ 中的数据流被节点 v 单播到节点 j 时消耗的节点 v 的期望传输次数即为 ETX_{vj} , 此时 $RETX_{vj} = 0$ 。但是,路径 P 上链路 $l_{v \rightarrow j}$ 中的数据流和链路 $l_{v \rightarrow a}$ 中已经存在的数据流 f 在节点 v 上进行流间编码,并以编码数据流的形式共享相同资源,被节点 v 广播到节点 j 和节点 a 上。当编码节点 v 消耗 ETX_{va} 次期望传输次数使得节点 a 收到编码数据流时,节点 j 也有可能收到编码数据流,若 $ETX_{vj} < ETX_{va}$,则表示在节点 v 广播传输编码数据流 ETX_{va} 次内,节点 j 已经收到编码数据流,此时链路 $l_{v \rightarrow j}$ 中的编码数据流没有消耗节点 v 的期望传输次数,则 $RETX_{vj} = ETX_{vj}$; 若 $ETX_{vj} > ETX_{va}$,则表示在节点 v 广播传输编码数据流 ETX_{va} 次时,链路 $l_{v \rightarrow j}$ 中的编码数据流还需要额外消耗编码节点 v 的 $ETX_{vj} - ETX_{va}$ 次期望传输次数,节点 j 才能收到编码数据流,此时 $RETX_{vj} = ETX_{va}$, 因此:

$$RETX_{vj} = \min(ETX_{vj}, ETX_{va}) \quad (6)$$

同理,当路径 P 上链路 $l_{v \rightarrow j}$ 中的数据流和 n 个网络中已经存在的数据流在节点 v 进行流间编码时,有:

$$RETX_{vj} = \min(ETX_{vj}, \max(ETX_{va_1}, ETX_{va_2}, \dots, ETX_{va_n})) \quad (7)$$

其中, $\max(ETX_{va_1}, ETX_{va_2}, \dots, ETX_{va_n})$ 是编码节点 v 只发送这 n 个数据流时所消耗的期望传输次数。由于在编码节点 v 处这 n 个数据流各自所对应的下一跳节点相互独立,因此编码节点 v 分别与这 n 个节点组成不同的链路, n 个链路分别用 $l_{v \rightarrow a_1}, l_{v \rightarrow a_2}, \dots, l_{v \rightarrow a_n}$ 表示。这 n 个链路的丢包率可能也各不相同。编码节点 v 为保证编码数据流能被正确广播到这 n 个节点上,其消耗的期望传输次数等于编码节点 v 在丢包率高的链路上所消耗的期望传输次数,即 $\max(ETX_{va_1}, ETX_{va_2}, \dots, ETX_{va_n})$ 。那么,可以用路径 P 上传输数据流实际消耗的总传输次数 $ECTX(P)$ 来表示路径丢包率和路径上的编码增益,如式(8)所示:

$$ECTX(P) = ETX(P) - RETX(P) \quad (8)$$

其中, $ECTX(P)$ 值越小,说明路径 P 的丢包率越低,且编码增益越大。

3.2 节点负载指标

节点上有多个数据流经过时,节点的路由层将会对每个数据流的数据分组进行队列排队操作,使得每个数据分组有一个服务顺序,同时节点暂时缓存等候服务的分组。然而,在无线网状网中应用流间编码技术会引起数据流向有编码机会的区域靠拢,使区域内节点上的数据分组增多,导致这些节点的负载加重,而区域外的节点负载较轻,因此将会出现负载不均衡

现象。当负载重的节点上的存储空间被用尽时,节点只能丢弃后到达的数据分组,从而增加了分组的重传次数。若路径的负载重,则会使路径上的某些数据流不能被快速传输到目的节点,进而导致网络传输性能的下降。因此,在路由发现过程中需要衡量各候选路径的负载程度,尽量选择负载轻的路径参与数据的传输,以降低负载不均衡对网络传输性能的影响。

为了衡量路径的负载程度,需要得出路径上各中间节点的负载状况,为此定义节点 v 的修正队列长度 $MQ(v)$ 来表示节点 v 中数据分组的实际队列长度^[11]。假设数据流 f_1 和数据流 f_2 在节点 v 处的数据分组长度分别为 Q_1 和 Q_2 , 且 $Q_1 < Q_2$ 。当数据流 f_1 和数据流 f_2 在节点 v 处有编码机会时,数据流 f_1 的数据分组就能以编码分组的形式搭载在数据流 f_2 的数据分组中,此时数据流 f_1 不会增加节点 v 的队列长度,因此能够得出 $MQ(v) = \max(Q_1, Q_2)$; 当这两个数据流在节点 v 处没有编码机会时, $MQ(v) = Q_1 + Q_2$ 。如果节点 v 中没有数据流加入,则节点为静态,否则为动态。因此,将 $MQ(v)$ 分为动态修正队列长度 $MQ_d(v)$ 和静态修正队列长度 $MQ_s(v)$ 。

然而,只给出节点 v 的实际队列长度并不能完全得出节点 v 的负载状况。若节点 v 的 $MQ_d(v)$ 较小,但它的干扰节点(能发送数据流到节点 v 的节点)中数据分组的实际队列长度较长,则仍然会加重节点 v 的负载。因此,必须考虑节点 v 的干扰节点中数据分组的实际队列长度,为此定义节点 v 的动态干扰队列长度 $MIQ_d(v)$ 为:

$$MIQ_d(v) = MQ_d(v) + \sum_{i \in I(v)} MQ_s(i) \quad (9)$$

其中, $I(v)$ 是节点 v 的干扰节点集合, $i \in I(v)$ 表示节点 i 是节点 v 的一个干扰节点。定义节点 v 将动态干扰队列中的数据分组全部转发完所用的时间为节点 v 的负载指标,用于衡量节点 v 的负载程度,并用 L_v 表示。

$$L_v = \frac{MIQ_d(v)}{r_v} \quad (10)$$

其中, r_v 是节点 v 的发送速率,节点 v 通过收取各干扰节点发送的含有自身节点静态修正队列长度的探测包来计算 $MIQ_d(v)$ 。路径 P 上的每个中间节点用节点 v 表示,则路径 P 的负载指标如式(11)所示:

$$L(P) = \sum_{v \in P} \frac{MIQ_d(v)}{r_v} \quad (11)$$

其中, $v \in P$ 表示节点 v 在路径 P 上。 $L(P)$ 值越小,说明路径 P 的负载程度越轻。

3.3 路由度量 ECTXL

在综合考虑路径丢包率、编码增益和负载程度 3 个因素的基础上,设计了一种新的路由度量 ECTXL。路径 P 上的 ECTXL 如式(12)所示:

$$ECTXL(P) = ETX(P) - RETX(P) + L(P) \quad (12)$$

$ECTXL(P)$ 值越小,路径质量就越高。使用该路由度量的路由策略会选择路径丢包率低、编码增益大且负载轻的路径作为最佳路径。

3.4 路由发现过程

步骤 1 源节点广播一个 RREQ 分组,开始路由发现过程。在 CLAODV 路由的 RREQ 分组的路由信息中,针对每

跳节点,增加了 Intelligence 字段来存储该节点所侦听到的数据流分组信息。

步骤 2 中间节点收到 RREQ 分组后,要完成以下操作。

1)判断该 RREQ 分组是否经过环路和其所经历的跳数是否超过预先定义的阈值 TTL。如果该分组没有经历环路,并且没有超过阈值 TTL,则将当前中间节点的 ID 加入到 RREQ 分组的路径信息字段,否则丢弃该分组。

2)把侦听到的数据流分组信息加入到 RREQ 分组的 Intelligence 字段中。

3)广播更新后的 RREQ 分组到目的节点。

步骤 3 RREQ 分组到达目的节点后,目的节点向 RREQ 所经过路径的相反方向单播一个与 RREQ 对应的 RREP 分组。RREP 分组中的 Intelligence 字段包含了 RREQ 分组所经过的各节点侦听到的数据流分组信息。

此外,RREP 还增加了 $ETX(P)$, $RETX(P)$, $L(P)$ 这 3 种路由信息。 $ETX(P)$ 是源节点和 RREP 分组将要经过的各中间节点到目的节点所组成的路径上体现路径丢包率的总期望传输次数, $RETX(P)$ 为路径上传数据流所消耗的总期望传输次数的减少量, $L(P)$ 为路径上所有中间节点的负载指标之和。

步骤 4 收到 RREP 分组后,中间节点要完成以下操作。

1)建立当前中间节点到目的节点的路径,然后计算路径上当前中间节点和其下一跳节点所组成的链路的 ETX 值,并更新该 RREP 分组中的 $ETX(P)$ 。

2)根据分组中 Intelligence 字段的路由信息和联合编码条件来判断当前中间节点是否有编码机会,然后根据判断结果来计算路径上当前中间节点和其下一跳节点所组成的链路的 $RETX$ 值,并更新该 RREP 分组中的 $RETX(P)$ 。

3)与其干扰节点交互,计算当前中间节点的负载指标,然后更新该 RREP 分组中的 $L(P)$,并对 RREP 分组进行转发。

步骤 5 源节点在一定时间内收到多个 RREP 分组后,要完成以下操作。

1)基于每个 RREP 分组提供的路径信息,分别建立源节点到目的节点的候选路径,然后计算每条候选路径上源节点和其下一跳节点所组成的链路的 ETX 值,并对相应 RREP 分组中的 $ETX(P)$ 进行实时更新。

2)根据每个 RREP 分组增加的路由信息计算相应候选路径的 $ECTXL$ 值,选择其中 $ECTXL$ 值最小的路径作为最佳路径。当 $ECTXL$ 值最小的路径不止一条时,选择其中跳数最少的路径作为最佳路径^[12],并沿着最佳路径发送数据流。

4 仿真分析

本文采用基于 Linux 操作系统的 NS-2 网络仿真器分别对 COPE, AODV, ILCAR 和本文的 CLAODV 路由策略进行仿真和分析比较。40 个节点随机分布在一个 $1000\text{m} \times 1000\text{m}$ 的矩形区域内。10 个场景中分别以不同的数据产生速率来模拟不同的网络负载。每一个场景中存在 3 个多播通信,每个多播通信有 1 个源节点和 5 个目的节点,每个节点随机运动,移动速度在 $0 \sim 10\text{m/s}$ 之间,仿真时间为 150s。为了减小仿真误差,每个参数场景运行 20 次,并把 20 次仿真结果的平均值作为最终结果。具体的参数设置如表 1 所列。

表 1 仿真实验参数

Table 1 Simulation experiment parameters

仿真参数	取值
工作模式	混杂模式
节点队列长度	90 个数据包
节点传输范围/m	300
载波侦听范围/m	600
MAC 层	CSMA/CA 机制
数据分组大小/Bytes	512

图 2 描述了 4 种路由策略在不同数据产生速率下的吞吐量对比情况。由图 2 可见,CLAODV 的网络吞吐量大于其他 3 种策略。这是因为与其他 3 种路由策略相比,CLAODV 可以通过联合网络编码发现路径上更多的编码机会;同时它采用 ECTXL 路由度量来选择最佳路径,使源节点能够从候选路径中选择丢包率低、编码增益大且负载轻的路径来发送数据流,不仅保证了较高的数据发送速率,而且在一定程度上提升了网络吞吐量。

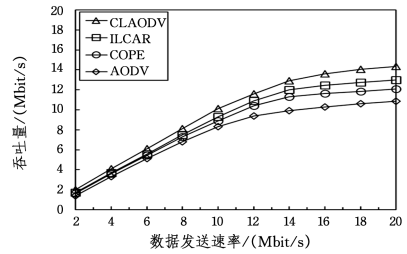


图 2 吞吐量与数据发送速率的关系

Fig. 2 Relationship between throughput and data transmission rate

图 3 给出了 4 种路由策略下的路由时延与数据发送速率的关系。从图 3 可以看出,随着数据发送速率的增大,路由时延也不断增加,但是 CLAODV 的路由时延低于其他 3 种路由策略。这是因为 AODV 不支持流间编码,其多个数据流不能被同时传输,端到端的时延最大;COPE 虽然支持流间编码,但是 COPE 的寻路过程和编码机会发现过程不同时进行,使得发现的编码机会较少;与 CLAODV 相比,ILCAR 虽然考虑到了流间编码会使部分编码节点的负载加重,但其只允许编码节点的某一个下游节点进行解码,忽略了很多潜在的编码机会,使得这些节点的工作效率下降,从而延长了路由时延。因此,本文提出的 CLAODV 路由策略的路由时延最低。

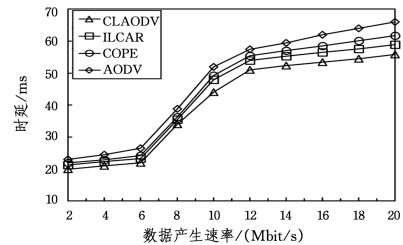


图 3 时延与数据产生速率的关系

Fig. 3 Relationships between delay and data generation rate

通过每个节点的路由层可计算出每个节点的队列中的数据包个数为 Z ,并且由联合编码条件得出每个节点中的编码数据包为 z ,则 n 个节点的编码包百分比为 $\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{Z_i}$ 。

图 4 描述了编码包百分比与数据产生速率的关系。AODV 不支持网络编码,它的编码包百分比为 0。ILCAR 和

CLAODV 的编码包百分比高于 COPE,这是因为 COPE 仅可在确定的路由中寻找编码机会,因此编码机会较少,而其他两种路由策略能够通过引导路由来增加编码机会。由于 CLAODV 采用联合网络编码方案后相比利用多跳编码的 ILCAR 增加了很多编码机会,因此 CLAODV 的编码包百分比高于 ILCAR。当数据产生速率高于 10 Mbit/s 时,CLAODV 的编码包百分比的上升速率开始减小。这种变化趋势表明其通过节点负载指标来衡量节点的负载程度,使得多条数据流不会向负载重的编码节点靠拢,限制了编码机会的增加速率,从而达到均衡网络负载的目的。

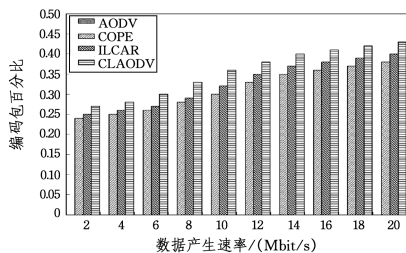


图 4 编码包百分比与数据产生速率的关系

Fig. 4 Relationships between percentage of encoding packages and data generation rate

假设一条链路上的带宽资源消耗为 w_{ij} ,用 W 代表所有链路上的带宽资源消耗总和,则有:

$$W = \sum_{(i,j) \in E} w_{ij} \quad (13)$$

图 5 描述了不同数据产生速率下的网络带宽资源开销。由图 5 的曲线走势可以看出,COPE,ILCAR 和 CLAODV 的网络带宽资源开销低于 AODV,而且随着数据产生速率的不断增大,AODV 路由策略的劣势越来越明显,这是因为 ILCAR,COPE 和 CLAODV 都可以通过流间编码一次发送多个数据流来降低带宽资源的开销。同时,CLAODV 的带宽资源消耗低于 COPE 和 ILCAR,这是因为 CLAODV 不仅可以发现路径上更多的编码机会,还考虑了路径上各中间节点的负载程度,使其能够降低网络负载不均衡现象发生的概率,减小因网络拥塞带来的丢包率,减少在负载重的节点上重传数据流的次数,提高了网络效率,从而降低了带宽资源开销。

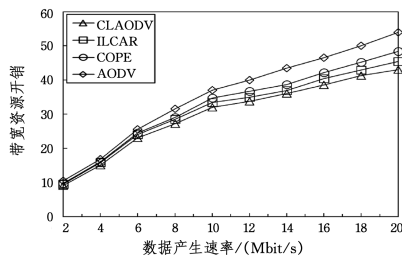


图 5 带宽资源开销与数据产生速率的关系

Fig. 5 Relationship between bandwidth overhead and data generation rate

结束语 本文研究了如何使流间编码和负载均衡这两种技术更好地在 AODV 路由协议中发挥作用的问题,提出了一种优化的路由策略 CLAODV。CLAODV 允许编码节点的多个下游节点共同解码同一个编码包来增加路径上的编码机会。同时,设计了新路由度量 ECTXL,综合了路径上编码增益、路径丢包率和路径负载程度 3 种因素来选取最佳路径发

送数据流。仿真实验表明,与其他 3 种路由策略相比,CLAODV 能够发现更多的编码机会,降低路由时延,提高网络吞吐量。

参 考 文 献

- [1] ZHAO X R. Algorithm of network maximum flow with lower bound[J]. Computer Science, 2015, 42(S1): 349-350. (in Chinese)
赵晓蓉. 带上下限的网络最大流的算法[J]. 计算机科学, 2015, 42(S1): 349-350.
- [2] NAEEM A, REHMANI M H, SALEEM Y, et al. Network coding in cognitive radio networks: A comprehensive survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, PP(99): 1.
- [3] CHEN C, DONG C, MAO Y F, et al. Survey on network coding-aware routing in wireless network[J]. Journal of Software, 2015, 26(1): 82-97. (in Chinese)
陈晨,董超,茅娅菲,等. 无线网络编码感知路由综述[J]. 软件学报, 2015, 26(1): 82-97.
- [4] WANG S Y. The perceived opportunities network coding in wireless Mesh network routing technology research[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2013. (in Chinese)
王少园. 无线 Mesh 网络中网络编码感知机会路由技术研究[D]. 南京:南京邮电大学, 2013.
- [5] ZHENG Y. Research on network coding perception routing in wireless Mesh network[D]. Changchun: Jilin University, 2016. (in Chinese)
郑宇. 无线 Mesh 网络中网络编码感知路由研究[D]. 长春:吉林大学, 2016.
- [6] HAI L, WANG J, WANG P, et al. High-throughput network coding aware routing in time-varying multihop networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(7): 6299-6309.
- [7] VU T V, NGUYEN T M T, PUJOLLE G. Distributed opportunistic and diffused coding in multihop wireless networks[J]. IEEE International Conference on Communications, 2014, 11(18): 5583-5587.
- [8] ZHOU Z, ZHOU L. Network joint coding-aware routing for wireless ad hoc networks[C]// IEEE International Conference on Wireless Communications, NETWORKING and Information Security. New York: IEEE Press, 2010: 17-21.
- [9] MEI Z, YANG Z. Active intersession network coding-aware routing[J]. Wireless Networks, 2017, 23(4): 1161-1168.
- [10] SHI W X, WU D, XU Y L, et al. Routing metric of interference-aware link quality: An improved ETX in wireless mesh networks[J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2014, 21(5): 61-67.
- [11] PENG Y H. Research on routing and reliable transport mechanism in wireless mesh networks [D]. Shenyang: Northeastern University, 2013. (in Chinese)
彭玉怀. 无线 Mesh 网络路由与可靠传输机制研究[D]. 沈阳:东北大学, 2013.
- [12] KISARA V. A new routing metric for wireless mesh networks [D]. Ames: Iowa State University, 2010.