

网络编码下不可靠自组织网络高效路由算法^{*}

卢文伟, 李光辉

(浙江农林大学 信息工程学院, 浙江 临安 311300)

通讯作者: 李光辉, E-mail: lgh@zafu.net

摘要: 无线自组织网络(wireless ad hoc network)中链路的不可靠性与高丢包率是影响网络性能和应用的主要缺陷. 为了优化多跳的不可靠无线网络中完成数据传输所需的数据分组发送次数, 提出了融合路径切换思想的基于网络编码的路由协议(network coding routing with path switching, 简称 NCPS). 为了发现潜在的适合网络编码的路径, 首先分析并提出了网络中路径可编码与可解码条件; 其次对比于传统的最优路径, 分析得出了在网络编码下路径切换所能获取的编码收益; 最后以优化网络中数据分组发送次数为目标, 设计了网络编码下结合路径切换的路由协议. 实验结果表明, 在不同的网络环境参数下, NCPS 能够有效减少网络中的数据发送次数, 获取稳定的编码收益.

关键词: 无线自组织网络; 不可靠性; 网络编码; 路径切换

中文引用格式: 卢文伟, 李光辉. 网络编码下不可靠自组织网络高效路由算法. 软件学报, 2014, 25(Suppl. (1)): 56-65. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14007.htm>

英文引用格式: Lu WW, Li GH. Efficient routing algorithm based on network coding in unreliable ad hoc networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2014, 25(Suppl. (1)): 56-65 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14007.htm>

Efficient Routing Algorithm Based on Network Coding in Unreliable Ad Hoc Networks

LU Wen-Wei, LI Guang-Hui

(School of Information Engineering, Zhejiang A&F University, Lin'an 311300, China)

Corresponding author: LI Guang-Hui, E-mail: lgh@zafu.net

Abstract: Wireless ad hoc networks suffer from link unreliability and high packet loss rate. To reduce the number of sending data packets in unreliable multihop wireless networks, a network coding based routing protocol with path switching, NCPS, is proposed. To ensure the paths are suitable for network coding, this study first analyzes the sufficient conditions that paths in wireless network can be encoded and decoded. Next, it analyzes the coding gain with path switching in contrast to the traditional optimal routing algorithm. Finally, in order to optimize the data packet transmission times in wireless networks, it proposes a routing protocol which combines path switching and network coding. Experimental results show that under different environmental parameters of networks, NCPS can reduce the number of data transmission in network effectively and obtain stable coding gain.

Key words: wireless ad hoc network; unreliability; network coding; path switching

无线自组织网络(wireless ad hoc network)是网络中各终端以自组织方式组网,并通过无线链路多跳通信的对等网络.与传统的以固定基站为基础进行通信的无线蜂窝网络相比,无线自组织网络不需要固定设备的支持,各终端自行组网.通信时,无线自组织网络中的各终端既可为数据的发送或接收端,也可充当其他数据流的路由节点.这些特征使得无线自组织网络能够快速、高效地进行部署,在战争、抢险救灾、野外通信等领域有广泛应用前景.然而,由于环境、无线干扰、信号衰竭等因素影响,各终端间的无线链路往往表现出不可靠性.如何以较小的代价,确保网络中的数据成功传递,提高网络性能,是针对不可靠的无线自组织网络研究的关键.

* 基金项目: 国家自然科学基金(61174023); 浙江省自然科学基金(Y1110791); 浙江农林大学人才启动项目(2012FR088)

收稿时间: 2014-05-10; 定稿时间: 2014-08-26

网络编码自从 2000 年被提出以来,就对无线网络的许多研究方向产生了深刻影响.在以往传统的网络路由中,中继点机械的担任“接收-存储-发送”的转发角色;在网络编码思想下,中继节点被赋予更多职能,可以对接收到的多个数据分组进行编码组合操作,产生若干编码后的数据分组并发送;当接收到足够多的编码后的数据分组时,也可进行解码,获得源数据.随着摩尔定律成为现实,无线网络的终端硬件性能日新月异,网络的发展瓶颈已经逐步转移到了无线链路的限制,网络编码的使用能够以极小的运算消耗为代价,获取在网络无线信道等方面出色的效果,已被国际学术界认定为解决网络传输问题的重要手段.特别地,在无线网络中,网络编码的研究可以有效利用无线信道的广播特性.区别于以往无线网络路由算法中非路径节点将接收到的广播数据作为冗余而丢弃,在网络编码下,各节点可缓存接收的数据分组,结合节点缓存数据的信息动态地进行路由选择与编码,从而使得网络从编码中获益.如图 1 所示,节点 A 将数据 α 发送至 D , B 发送数据 β 至 C ,受制于发射功率,该两组数据的传送均需经过中继点 E .如图 1(a)所示,在传统的路由机制中,为使数据成功传递,网络中的节点总共需要 4 次数据的广播发送过程(A 广播 1 次 α , B 广播 1 次 β , E 分别广播 1 次 α 与 β);由于 A 和 B 在各自的广播发送过程中 C 与 D 分别能接收到 α 和 β ,这在传统的路由机制中将被丢弃,而在网络编码下,如图 1(b)所示,利用 C 与 D 分别接收到的 α 和 β , E 只需广播发送 1 次 $\alpha \oplus \beta$, C 和 D 就能通过 $(\alpha \oplus \beta) \oplus \alpha$ 及 $(\alpha \oplus \beta) \oplus \beta$ 操作分别得到 β 与 α ,在这种机制下,完成两组数据的传递只需进行 3 次数据的广播发送,比传统的方法减少了 25%,有效提升了网络的性能.

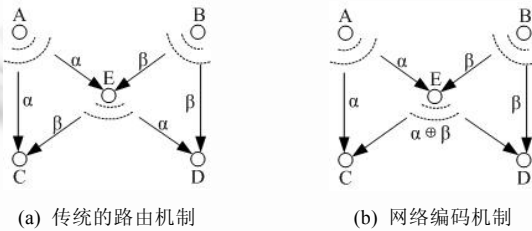


Fig.1 Network coding

图 1 网络编码

此外,无线网络中根据各节点实时缓存数据的信息,网络的数据传输路径可以进行动态调整,从而能够主动地创造编码机会并获取编码收益.在如图 2(a)所示拓扑结构的网络中,节点 C 和 D 分别将数据分组 α 和 β 发送至 A 与 F .根据预先设定的性能最优路径(如最短路径、负载平衡路径等),各数据分组在传递时所选择的最佳路径分别为 $\alpha(C \rightarrow B \rightarrow A)$, $\beta(D \rightarrow E \rightarrow F)$,如图 2(b)所示,由于路径不存在共同节点可供编码,因此在以往的编码感知的路由算法中(如 COPE^[1])并不存在编码机会.由于无线网络的复杂性,网络中往往存在着其他可供选择的路径,其中的一些路径能够创造编码机会并获取理想的收益.如图 2(c)所示,由于节点 C 和 D 在无线广播发送数据时, F 和 A 分别能接收到 α 与 β ,在此情形下,若主动将 α 的传输路径切换为 $C \rightarrow E \rightarrow A$,即可创造编码机会,当 E 接收到 α 与 β 后,广播发送编码后的数据分组 $\alpha \oplus \beta$ 至 A 和 F ,结合自身缓存的数据分组, A 和 F 分别能解码得到 α 和 β .与图 2(b)中的方法相比,图 2(c)中通过路径切换的方法主动创造编码机会有效地减少数据分组发送次数,提高网络的性能.

本文针对不可靠的无线自组织网络中多个单播请求的情形,研究基于网络编码的高效路由算法.区别于以往基于网络编码的路由算法,本文的路由算法充分利用无线网络空间多样性,智能地进行路径切换,主动创造编码机会,以获取理想的编码收益,提升网络性能.本文的研究首先对网络中的路径存在编码机会的条件进行分析,进而分析得出网络编码的收益,最后,以优化不可靠网络中成功完成数据传输所需数据分组的发送次数为目标设计高效率的路由算法.

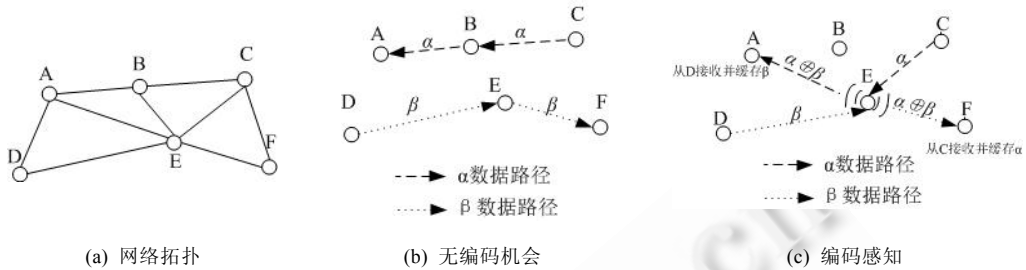


Fig.2 Create coding opportunity actively

图 2 主动创造编码

1 相关研究现状

无线网络的链路不可靠性严重影响了网络的性能,是当今研究的重点和热点问题,其中,针对不可靠无线网络的路由算法研究是其重要的方向.我们将这些路由算法分为两大方向:非编码路由算法和基于编码的路由算法.

1.1 非编码路由

在非编码路由算法中,网络中的中继节点简单地担任数据分组中转功能,因而对终端的数据处理、缓存等性能要求较低.在初期的 802.11 协议标准中,为使数据分组能成功传递,采用了重传(retransmission)与确认(acknowledgement)的数据链路层机制,然而在无线网络中,由于高丢包率,重传往往会使网络产生不可预期的高时延、高网络拥塞及无线干扰等负面影响,因此现在常通过改进重传或采用其他方法来实现.多路径路由(multipath routing)是针对不可靠无线网络路由算法研究的一种常用方法,SMR 协议^[2]是一种按需多路径路由协议,可建立和维护最大数目不相交的多条路径.文献^[3]将源数据分割成若干大小相同的数据分组,每个数据片只在 1 条路径中传递,根据路径的数目以及每条路径的出错概率设计最佳的分片方式,以提高网络的可靠性.ReInForM^[4]从数据源节点开始,考虑可靠性要求、信道质量以及传感器节点到汇聚节点的跳数,决定需要的传输路径数目,以及下一跳节点数目和相应的节点,实现满足可靠性要求的数据传输.AOMDV^[5]是一种按需多路径路由协议,通过获取多条无环和不相交的路径来实现多路径协议.此外,Chen 等人^[6]使用博弈的思想对不可靠无线网络的广播传输方式进行了最优化模型设计;Bu 等人^[7]针对不可靠的无线网络利用训练机制获取了容延迟控制方案.

1.2 编码路由

在基于网络编码的路由算法研究中,网络中的中继节点除了接收、发送数据外,还需承担编码、解码等操作,因而对网络中终端的性能有较高的要求,在当今硬件技术快速发展背景下,这些要求容易达到.在网络编码理论的基础性研究方面,Li 等人^[8]和 Koetter 等人^[9]先后证明线性网络编码、随机网络编码可以达到组播传输吞吐量方面的理论最大值,并对网络编码的数学框架进行了阐述,为网络编码在无线组播传输吞吐量方面的研究提供了必要的理论条件;COPE 协议^[1]是第一个用于实际无线网络中的基于网络编码的协议,其利用机会监听(opportunistic listening)和机会编码(opportunistic coding)等技术在网络的数据传递中使用网络编码.针对不可靠无线网络基本编码的路由研究中,文献^[10]以数据包成功到达目的节点时所有节点的发送次数为指标,对网络编码在有损无线网络的可靠性进行了量化评价;Fujimura 等人^[11]还利用仿真手段对网络编码(network coding)和擦除码(eraser coding)对无线自组织网络的可靠性做了分析和比较;Karbashi 等人^[12]利用网络编码对不可靠无线网络路由的公平问题进行了研究.此外,Zhang 等人^[13]利用随机线性编码(random linear coding)针对容分裂无线网络中单播情形进行了研究,提出了优化时延为目标的编码方案;Keller 等人^[14]提出了传感器网络中基于网络编码的性能优异的可靠性与能量有效性平衡的方案.

不同于以往的基于网络编码的路由算法研究,本文针对不可靠的无线自组织网络,探索网络编码动机下自

主路径切换的路由协议,以优化网络中总的分组传送次数为目标,结合编码及路径切换,设计性能优的路由算法.

2 网络模型及问题描述

2.1 网络模型

本文假设自组织网络中的节点随机分布于一个较大范围的区域内.这些节点具有如下的性质:

- (1) 所有节点具有相同的传输半径且静止;
- (2) 网络不可靠,且各节点能够通过探测数据包获得到各邻居节点成功传输数据概率;
- (3) 假设时间分槽,且数据分组在传输过程中每跳耗时一个时间槽,数据分组大小固定,忽略终端处理数据的时间;
- (4) 每个节点可监听其邻居的状况.

2.2 问题描述

在无线自组织网络中,每个节点均可能是数据发送端、数据接收端或充当其他数据流的中继角色.区别于传统的以基站为基础的无线网络,无线自组织网络中的各终端自组成网,节点间多跳的路径形成了网状的无线网络.

定义 V 为无线网络中所有节点的集合,在每个时间槽内,各节点以一定的概率随机向网络中的某个节点发送数据.若 $s \in V$ 为一个数据流的发送端,对应的接收端为 $d \in V$,则记该数据流为 $FL(s,d)$;若存在从 s 到 d 有序节点序列 (s,v_1,v_2,\dots,d) 连通,则记 $P(s,d)=(s,v_1,v_2,\dots,d)$ 为数据流 $FL(s,d)$ 的一条路径.

在网状的无线自组织网络中,由于无线链路的广播特性,网络的拓扑结构异常复杂,每条数据流 $FL(s,d)$ 对应的路径也可以有很多选择.在以往的路由算法中,往往根据一定的性能优化指标选择相应的路径传输数据,如最短距离路径、负载平衡路径等等,如图 3(a)根据最短距离路径对数据流 $FL(s_1,d_1)$ 和 $FL(s_2,d_2)$ 选择了各自的路径 $P(s_1,d_1)=(s_1,A,B,F,J,K,d_1)$, $P(s_2,d_2)=(s_2,D,C,F,I,H,d_2)$.

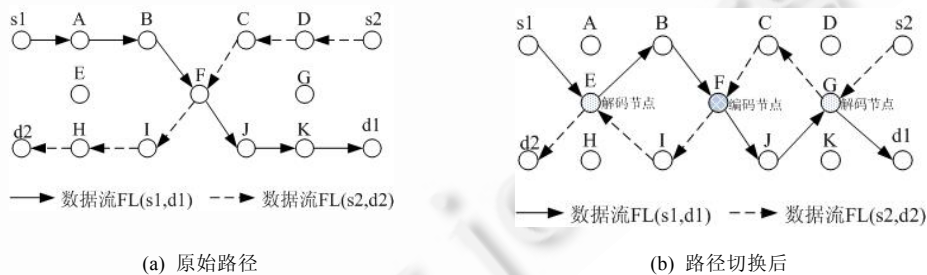


Fig.3 Path switching

图 3 路径切换

考虑到网络编码在无线网络中的优异表现,COPE 等协议将网络编码引入到路由协议的设计当中,但是,由于以往如 COPE 等协议的研究中,各数据流在路由选择过程并不考虑网络编码因素,只是在选定路径后伺机进行编码,由于 $P(s_1,d_1)$ 和 $P(s_2,d_2)$ 不存在后续的数据交换,因而在以往的相关研究中并不存在编码机会.考虑到数据流 $FL(s_1,d_1)$ 和 $FL(s_2,d_2)$ 存在多条可用路径,因此本文主要研究对数据流的路径智能地进行切换,主动创造编码机会,只要结合了网路编码的路径切换能比原有路由算法达到更理想的效果,获取编码收益就执行相应的路径切换.如图 3(b)所示,我们将数据流 $FL(s_1,d_1)$ 和 $FL(s_2,d_2)$ 的路径分别切换为 $P(s_1,d_1)=(s_1,E,B,J,G,d_1)$, $P(s_2,d_2)=(s_2,G,C,F,D,E,d_2)$,如此,节点 E 就存在编码机会,并将编码后的数据分组广播发送,分别能在节点 G 和 E 解出数据流 $FL(s_1,d_1)$ 和 $FL(s_2,d_2)$ 原始数据,最终传输给各自接收端.通过路径切换,能够减少网络中数据分组发送

次数,达到提高网路性能的效果.

由以上描述可以得到,设计编码感知的路由能创造编码机会,从而提升网络性能.然而,根据网络编码的基本原理及网络性能要求,编码感知路由的设计必须构建支持编码的条件,即:(1) 数据流的路径存在共同经过的节点作为编码节点,我们称为可编码条件;(2) 经编码节点编码后的各条数据流能够有效解码,得到源数据,我们称之为可解码条件;(3) 在能够满足编码、解码条件的前提下,编码感知路由由性能上需优于原路由协议,获取编码收益.

3 支持编码的条件

3.1 可编码条件

要使不同的数据流能够编码,结合成编码后的数据流,则必须存在编码节点,在此节点上相应数据流进行编码.编码节点须是相互编码的各数据流路径的共同经过节点.即要使数据流 $FL(s_1,d_1)$ 和 $FL(s_2,d_2)$ 满足可编码条件,则必有 $P(s_1,d_1) \cap P(s_2,d_2) \neq \emptyset$.如图 2(b)所示,数据流 $FL(C,A)$ 和 $FL(D,F)$ 的路径 $P(A,B)=(C,B,A),P(D,F)=(D,E,F)$ 不存在共同的经过节点,故不存在编码机会;图 4(a)和图 4(b)中,数据流 $FL(A,I)$ 和 $FL(D,F)$ 均有路径 $P(A,B)=(A,B,E,H,I),P(D,F)=(D,C,E,G,F)$ 存在共同的经过节点 E ,都满足可编码条件.

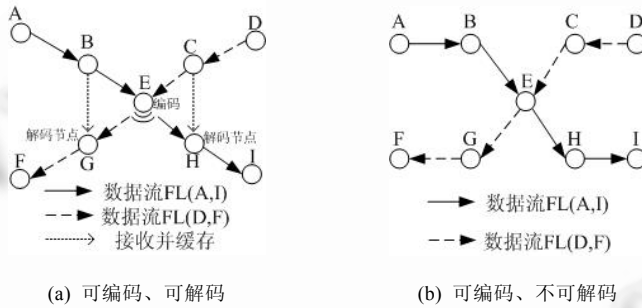


Fig.4 Condition of network coding

图 4 编码条件

3.2 可解码条件

在满足了可编码条件后,各数据流通过编码节点,产生编码组合后的数据分组.要使各数据分组成功地传递,必须确保编码后的数据分组能解码还原出各自原始的数据,并送达接收端.在图 4(a)和图 4(b)中均存在编码节点,满足可编码条件,然而在图 4(b)中,由于 $P(A,I)$ 在编码节点后的所有节点中均无法监听到 C 发送的原始数据,从而无法解码还原出 A 发送的原始数据,同样, D 发送的原始数据也无法解码还原.不同于图 4(b),在图 4(a)中,由于 $P(A,I)$ 在编码节点 E 后的 H 节点中通过监听缓存了 C 发送的数据,则通过编码数据分组及 H 中缓存数据能在 H 中解码还原出 A 发送的原始数据分组,并最终能发送至 I ;同理,通过编码数据及 G 中缓存的 B 发送的数据分组,能在 G 中解码还原出 D 发送的原始数据分组,发送至接收端 F .

如上所述,如果数据流 $FL(s_1,d_1)$ 和 $FL(s_2,d_2)$ 满足可编码条件,且编码节点为 $e \in V, e \in P(s_1,d_1) \cap P(s_2,d_2)$,要使 $FL(s_1,d_1)$ 和 $FL(s_2,d_2)$ 可解码,必须满足以下条件:

- (1) 存在节点 $e_1 \in P(s_1,d_1)$ 且 e_1 位于路径 $P(s_1,d_1)$ 节点序列中 e 的后继,节点 e_1 中缓存有数据流 $FL(s_2,d_2)$ 的原始数据.
- (2) 存在节点 $e_2 \in P(s_2,d_2)$ 且 e_2 位于路径 $P(s_2,d_2)$ 节点序列中 e 的后继,节点 e_2 中缓存有数据流 $FL(s_1,d_1)$ 的原始数据.

简而言之,两条路径若要满足可解码条件,首先需满足可编码条件,在此基础上每条路径均有编码节点的下游节点正好位于另一条路径编码节点的上游节点或上游节点的邻居节点.

3.3 编码收益

为了满足可编码条件与可解码条件,创造编码机会,网络中数据流的传输路径可能会从传统的性能最佳路径(如时延最小、发送次数最优等)进行切换.切换后的路径在一些性能指标上(如时延、发送次数)将会下降,然而在网络编码下,路径的一些性能又将会得到提升.考虑到具体网络设计的性能要求,如果切换后的路径在网络编码作用下其性能优于原先未切换路径,我们将执行路径切换与网络编码,否则就使用原先的路径.

鉴于无线网络的不可靠特性,我们以数据平均发送次数为指标衡量网络中路由机制性能.假设 $P(s1,d1),P(s2,d2)$ 为传统的发送次数最优的路由机制下数据流 $FL(s1,d1)$ 和 $FL(s2,d2)$ 的最佳路径,如经路径切换后存在行的路径满足可编码与可解码条件,且切换后的路径分别为 $P'(s1,d1)$ 及 $P'(s2,d2)$,我们记数据流 $FL(s1,d1),FL(s2,d2)$ 相互间进行编码操作获得的收益为 $G[FL(s1,d1),FL(s2,d2)]$, 并有

$$G[F(s1,d1),F(s2,d2)] = ETX[P(s1,d1)] + ETX[P(s2,d2)] - ETX[P'(s1,d1) \oplus P'(s2,d2)] \quad (1)$$

其中,在式(1)中, $ETX[P(s1,d1)]$ 以及 $ETX[P(s2,d2)]$ 分别代表路径 $P(s1,d1)$ 与 $P(s2,d2)$ 的平均数据传送次数; $ETX[P'(s1,d1) \oplus P'(s2,d2)]$ 表示路径 $P'(s1,d1)$ 及 $P'(s2,d2)$ 在网络编码下平均的数据发送次数.

当 $G[F(s1,d1),F(s2,d2)] > 0$ 时,路径切换与网络编码获取了正向收益,我们将执行路径切换与编码,否则就不执行.

4 路由度量及设计

4.1 路由度量

我们以网络中数据的平均发送次数(expected transmission count,简称 ETX)为指标衡量路由算法的性能优劣.如有数据流 $FL(s,d)$ 的路径 $P(s,d)$ 共有 n 跳,第 i 跳上数据成功发送的概率为 $R_i, i \in [1,n]$, 则

$$ETX[P(s,d)] = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \quad (2)$$

如果有两条数据流 $FL(s1,d1)$ 和 $FL(s2,d2)$ 的路径分别为 $P1$ 与 $P2$, 且 $P1, P2$ 满足编码条件,编码节点为 e , 如图 5 所示, 则路径 $P1$ 和 $P2$ 的跳数分别为 n_1 和 $n_2, R1_i$ 与 $R2_i$ 分别为第 i 跳数据成功发送概率.

编码节点 e 发送的数据在路径 $P1$ 和 $P2$ 上成功传输到下一节点的概率分别为 $R1(e)$ 和 $R2(e)$. 由于节点 e 将编码后的数据广播发送到路径 $P1$ 和 $P2$ 的下一个节点, 则

$$ETX[P1 \oplus P2] = \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{R1_i} + \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{R2_i} - \frac{1}{R1(e)} - \frac{1}{R2(e)} + ETX(e) \quad (3)$$

其中, $ETX(e)$ 为节点 e 将数据成功广播发送至路径 $P1$ 和 $P2$ 的下一个节点发送次数期望值. 根据期望的定义, 可以得到:

$$\begin{aligned} ETX(e) &= \sum_{m=1}^{\infty} m[S1(e)^{m-1} R1(e) \sum_{i=1}^m S2(e)^{i-1} R2(e) + S2(e)^{m-1} R2(e) \sum_{i=1}^m S1(e)^{i-1} R1(e) - S1(e)^{m-1} S2(e)^{m-1} R1(e) R2(e)] \\ &= \frac{1}{R1(e)} + \frac{1}{R2(e)} - \frac{1}{R1(e) + R2(e) - R1(e)R2(e)} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $S1(e) = 1 - R1(e), S2(e) = 1 - R2(e)$ 分别为节点 e 将数据广播发送至路径 $P1$ 和 $P2$ 的下一个节点的失败概率.

由公式(3)和公式(4)我们可以得到,网络编码下的路径 $P1, P2$, 编码节点为 e , 成功完成两条数据流的数据传输, 数据平均传输次数为

$$ETX[P1 \oplus P2] = \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{R1_i} + \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{R2_i} - \frac{1}{R1(e) + R2(e) - R1(e)R2(e)} \quad (5)$$

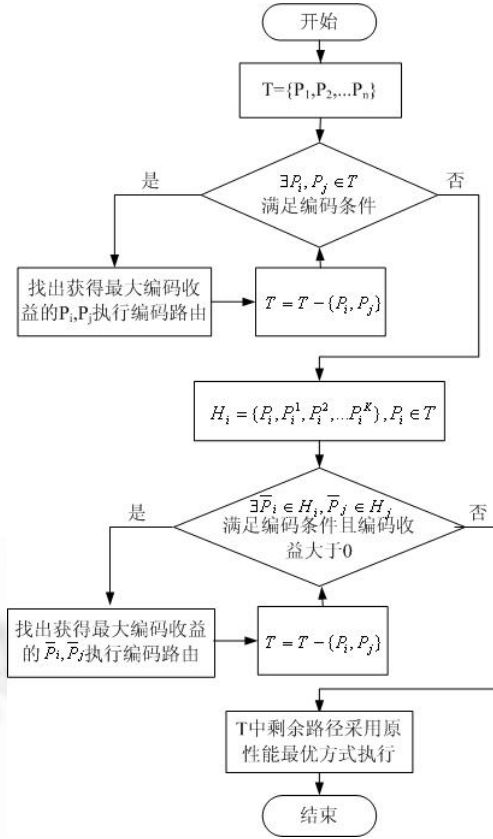


Fig.5 Routing algorithm

图 5 路由算法

4.2 路由设计

根据数据流的路径是否存在编码机会,以及是否能获取正向的编码收益,网络中的数据流分为编码数据流以及未编码数据流,其数据平均发送次数分别如式(2)和式(5)所示。

为了能使网络获取优异性能,降低平均数据发送次数,我们在路由设计过程中引入网络编码,以最大化编码收益为目标,对原始的无编码最优路径进行智能切换,主动创造编码机会。

假设共有 n 条数据流 FL_1, FL_2, \dots, FL_n , 在传统无编码的性能最优(平均发送次数最少)路由机制下相应的路径分别为 P_1, P_2, \dots, P_n , 该最优路径可采用 Aguayo 等人针对多跳无线网络提出的 ETX 机制^[15]获得, 该机制通过最小化数据成功传递到接收端的总的的数据数的期望值来提高网络的吞吐量。除此性能最优路径外, 我们为每条数据流准备 K 条性能较优的路径作为切换的备选路径($K \geq 0$), 分别为 $(P_1^1, P_1^2, \dots, P_1^K), (P_2^1, P_2^2, \dots, P_2^K), \dots, (P_n^1, P_n^2, \dots, P_n^K)$, 多条路径的获取可以通过 ReInForM^[4], AOMDV^[5]等多路径协议得到, 其中, $ETX(P_i) \leq ETX(P_i^1) \leq ETX(P_i^2) \leq \dots \leq ETX(P_i^K)$ 且网络中不存在 $P_i^j \notin \{P_i^j | j=1, 2, \dots, K\}$ 使得 $ETX(P_i) < ETX(P_i^K), 1 \leq i \leq n$ 。

在具体的路由算法设计过程中, 我们首先获取 n 条数据流对应的传统无编码考虑下的最佳路径及备选的 K 条路径(在实验中, 我们设置 $K=4$), 并对最佳路径寻找编码机会, 并执行相应的编码路由; 在传统的无编码考虑下的最佳路径不存在编码路由机会的数据流, 我们尝试用备选路径进行路径切换, 并查找编码机会, 若能获取编码机会且获得理想的编码收益, 则执行主动路径切换下的编码路由; 最后对以上两种情况都不能执行的数据流, 我们直接采用传统最优路径执行路由。具体的路由算法设计流程如图 5 所示。

5 实验与分析

为了验证本算法的性能,我们使用 Matlab 程序设计语言编制仿真程序进行实验,并对不同环境下得到的实验结果进行分析.不失一般性,我们假设有 n 个节点随机分布在一个 20×20 的正方形区域中,每个节点具有相同的发送半径 r .同时,假定在每个时间槽内,网络中的各节点均以概率 $q(0 < q \leq 1)$ 随机选择一个除自身外的其他节点作为接收端发送一个数据包,数据包的大小固定.数据包通过多跳方式发送至接收端,网络中所有无线链路具有相同的成功发送数据的概率 $PR(0 < PR \leq 1)$.

首先我们将本文算法与 ETX 及 COPE 算法的性能进行比较.取定 $r=7, q=0.5, PR=0.9, n=40$.为使结果更具普遍性,摆脱单一时间槽内随机环境的不确定因素,我们以 5 个时间槽为一个时间段,比较不同算法的网络数据平均发送次数,如图 6 所示.可以看到,本算法在减少不可靠网络中数据发送次数上,性能均明显优于 ETX 和 COPE.

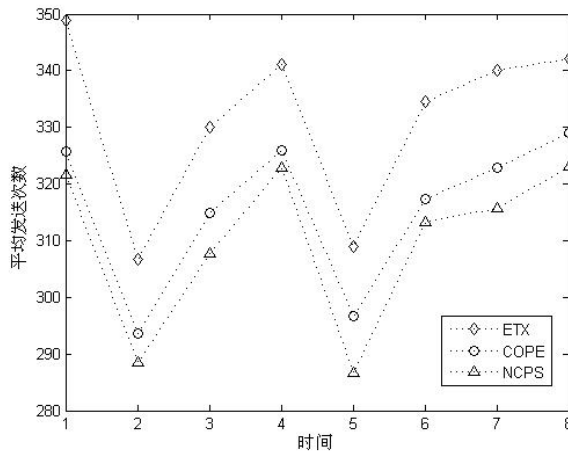


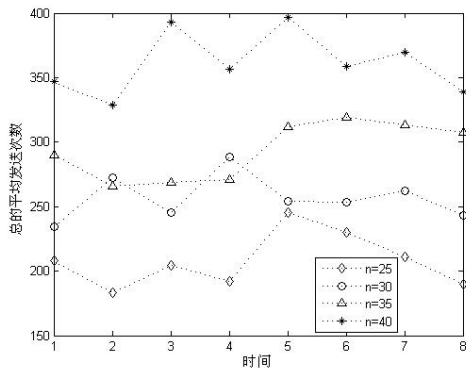
Fig.6 Comparison of different algorithms

图 6 不同算法的比较

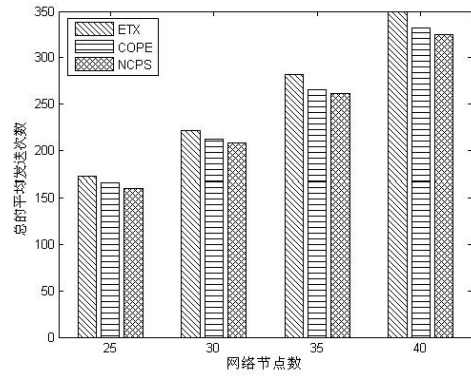
我们对不同参数下算法的性能进行研究,首先考虑不同的节点数 n 对算法的影响,取定 $r=7, q=0.5, PR=0.9$, 令 $n=25, 30, 35, 40$, 比较在 5 个时间槽的时间段内,不同的节点数 n 下,成功完成网络中所有数据发送及接收所需总数据包的平均发送次数,如图 7(a)所示的是 8 个时间段中不同网络节点数据的平均发送次数;如图 7(b)所示的是不同算法性能的对比.可以看到,随着节点数的增加,网络中的数据发送次数也会增加,这是由于在固定的节点发送数据概率 q 下,节点数的增加会使网络中产生更多的数据流的概率增大,从而容易产生更多的数据发送次数;同时,我们也看到,当节点数增加时,基于编码的算法性能比 ETX 的优越性更加突出,而且本文所提出的算法比 COPE 均有较大的性能提升,这是因为当节点数增加时,网络中各路径的编码机会也会相应地增加.

固定节点数 n , 我们研究在不同的节点发送半径 r 时算法的性能.取 $n=40, q=0.5, PR=0.9$, 令 $r=6, 8, 10, 12$. 比较在经历 5 个时间槽的一个时间段内,不同发送半径下网络中总的分组发送次数的期望值.如图 8(a)所示的是在 8 个时间段过程中不同发送半径时的 NCPS 算法性能,图 8(b)显示的是一个时间段内各算法的性能对比,可以看到,与 ETX 算法和 COPE 算法相比,本文提出的 NCPS 算法能降低数据分组的发送次数,获取较稳定的收益;在较小的节点发送半径下,数据的发送次数会增加,这是由于随着发送半径的减小,源节点将数据分组发送至接收端的路径所历经的跳数将增加,在固定的链路成功发送数据的概率 PR 下,加大了数据分组的发送次数.

最后,固定节点数 n , 节点的发送半径 r , 考虑在不同的节点发送数据的概率 p 下算法的性能.取 $n=40, r=7, PR=0.9$, 令 $q=0.3, 0.35, \dots, 0.8$. 如图 9 所示,随着每个时间槽节点发送数据概率的增加,网络中数据流的条数也会相应增加,因此网络中总的分组发送次数持续增长;同时,我们也得到,本文提出的算法在不同的数据发送概率 q 下,性能均优于 ETX 和 COPE.



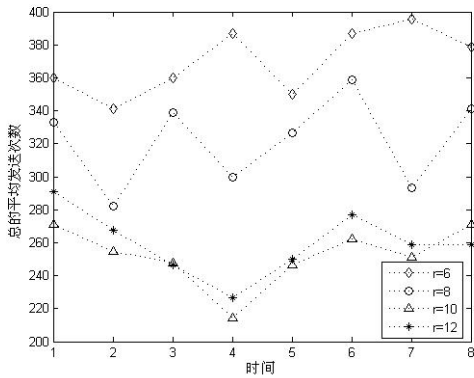
(a) 不同的节点数



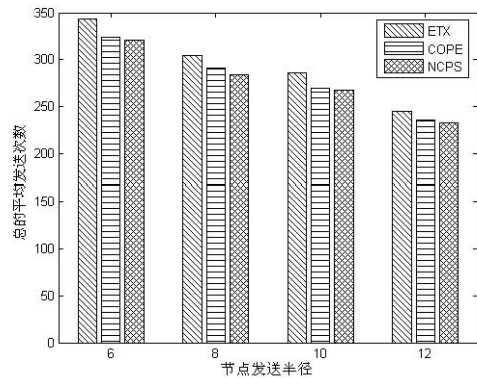
(b) 不同算法的比较

Fig.7 Compared with different number of nodes

图 7 不同节点数的性能比较



(a) 不同的发送半径



(b) 不同算法的比较

Fig.8 Compared with different sending radii

图 8 不同发送半径的性能比较

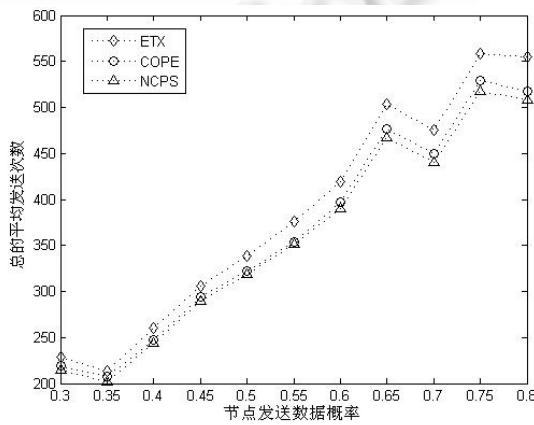


Fig.9 Compared with different sending probabilities

图 9 不同发送概率的性能比较

6 总 结

无线网络在数据传输过程中的不可靠性和高丢包率是其相对于传统有线网络的主要不足之处,如何以最小的数据分组发送次数成功将数据发送至接收端是无线网络特别关注的重点问题.本文利用了无线信道的共享广播特征,引入网络编码的思想.同时,又区别于以往基于编码的路由算法,本文在讨论分析了编码条件的基础之上,根据编码收益,提出了基于网络编码的智能路径切换的路由算法 NCPS.实验结果表明,NCPS 算法在不同的网络环境参数下,均能不同程度地减少网络中数据分组的发送次数,获取稳定的编码收益.然而,本文提出的 NCPS 算法在减少网络中数据分组的发送次数的同时也存在不足之处,主要是为形成编码机会,网络中的编码与解码节点需各自等待相应编码或解码的数据分组,这会带来一定程度的网络时延,我们将在后续的研究中进行探索.

References:

- [1] Katti S, Rahul H, Hu WJ, Katabi D, Médard M, Crowcroft J. XORs in the air: Practical wireless network coding. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2008,16:497–510.
- [2] Lee SJ, Gerla M. Split multipath routing with maximally disjoint paths in ad hoc networks. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC 2001)*. 2001. 3201–3205.
- [3] Dulman S, Nieberg T, Wu J, Havinga P. Trade-Off between traffic overhead and reliability in multipath routing for wireless sensor networks. In: *Wireless Communications and Networking*. 2003. 1918–1922.
- [4] Deb B, Bhatnagar S, Nath B. ReInForm: Reliable information forwarding using multiple paths in sensor networks. In: *Proc. of the 28th Annual IEEE Conf. on Local Computer Networks*. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2003. 406–415.
- [5] Marina MK, Das SR. On-Demand multipath distance vector routing for ad hoc networks. In: *Proc. of the 9th Int'l Conf. on Network Protocols*. 2001. 14–23.
- [6] Chen FW, Kao JC. Game-Based broadcast over reliable and unreliable wireless links in wireless multihop networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2013,12(8):1613–1624.
- [7] Bu B, Yu FR, Tang T, Gao CH. A delay tolerant control scheme for communication-based train control (CBTC) systems with unreliable wireless networks. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications*. 2013. 5173–5177.
- [8] Li SYR, Yeung RW, Cai N. Linear network coding. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2003,49:371–381.
- [9] Koetter R, Médard M. An algebraic approach to network coding. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2003,11(5):782–795.
- [10] Ghaderi M, Towsley D, Kurose J. Reliability gain of network coding in lossy wireless networks. In: *Proc. of the IEEE INFOCOM*. 2008. 2171–2179.
- [11] Fujimura A, Oh SY, Gerla M. Network coding vs. erasure coding: Reliable multicast in ad hoc networks. In: *Proc. of the IEEE Military Communications Conf. 2008 (Milcom 2008)*. 2008. 1–7.
- [12] Karbaschi G, Viana AC, Martin S, Agha KA. On using network coding in multi hop wireless networks. In: *Proc. of the 2009 IEEE 20th Int'l Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*. 2009. 420–424.
- [13] Zhang XL, Neglia G, Kurose J, Towsley D. Benefits of network coding for unicast application in disruption-tolerant networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2013,21(5):1407–1420.
- [14] Keller L, Atsan E, Argyraki K, Fragouli C. SenseCode: Network coding for reliable sensor networks. *ACM Trans. on Sensor Networks*, 2013,9(2):1–20.
- [15] De Couto DSJ, Aguayo D, Bicket J, Morris R. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. In: *Proc. of the ACM MobiCom 2003*. ACM Press, 2003. 134–146.



卢文伟(1979—),男,浙江临安人,讲师,主要研究领域为无线网络路由算法,网络编码。

E-mail: lww@zafu.edu.cn



李光辉(1970—),男,博士,教授,CCF 高级会员,主要研究领域为无线传感器网络可靠性,智能无损检测技术。

E-mail: lgh@zafu.edu.cn