

基于 XOR 选择重传 ARQ 的网络编码多播路由算法

王 静¹, 刘景美², 刘向阳³, 王新梅²

- (1. 长安大学信息工程学院, 陕西 西安 710064;
2. 西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室, 陕西 西安 710071;
3. 西安通信学院军事综合信息网教研室, 陕西 西安 710106)

摘要: 针对 XOR 选择重传 ARQ 协议, 提出了一种基于网络编码的多播路由算法, 有效地恢复链路传输错误。该算法分为两种情况: 一是信源发送正常的数据包, 在信源节点与各接收节点之间建立多播路径族, 并考虑不同路径族之间链路的共享; 二是信源发送 XOR 数据包, 搜索信源节点到各接收节点的最短路径, 并考虑最短路径之间的链路共享。仿真结果表明, 该算法有效地提高了网络吞吐量, 在资源消耗方面较传统的多播路由算法有更好的表现, 非常接近基于网络编码的最小费用多播算法。数学分析表明, 该算法的复杂度远小于最小费用多播算法。

关键词: 网络编码; 选择重传 ARQ; 多播传输; 吞吐量; 带宽消耗

中图分类号: TN 911.2 **文献标志码:** A

Multicast routing algorithm with network coding based on XOR selective repeat ARQ

WANG Jing¹, LIU Jing-mei², LIU Xiang-yang³, WANG Xin-mei²

- (1. School of Information Engineering, Chang'an Univ., Xi'an 710064, China;
2. State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian Univ., Xi'an 710071, China;
3. Military Comprehensive Information Network Teaching Office, Xi'an Communication Coll., Xi'an 710106, China)

Abstract: A new multicast routing algorithm with network coding to deal with transmission errors in the data links is proposed, which is based on XOR selective repeat ARQ. More specifically, this scheme contains two cases: when the source transmits the normal data packets, the routing groups from source to each sink are searched, and link-sharing between different path groups is considered in the process of searching; when the source transmits the XOR data packets, the shortest paths from source to each sink are searched, and link-sharing between different shortest paths is also considered. Simulation results show that this algorithm increases the network throughput effectively. Meanwhile, compared with traditional multicast routing algorithms, the performances of the routing algorithm are improved at a great extent in resource consumption, and closer to the minimum-cost multicast algorithm based on network coding. Mathematic analysis indicates that the complexity of the proposed algorithm is much lower than that of the minimum-cost multicast algorithm.

Keywords: network coding; selective repeat ARQ; multicast transmission; throughput; capacity consumption

0 引言

移动骨干网和其他具有多播功能网络的发展导致了多播传输的广泛应用, 例如视频会议, 分布式交互仿真以及消息的分发。我们需要可靠的多播协议, 确保从源节点向目的节点分发数据。

网络的数据链路不可避免地存在比特错误, 如何在发送节点与接收节点之间建立可靠的通信协议至关重要。在

数据链路层处理传输错误的一项通用技术就是具有差错检测功能的 ARQ 技术, 该技术简单, 且提供了更高的可靠性。传统的 ARQ 技术分为 3 类: (1) 停止等待式 ARQ (stop-and-wait ARQ, SW-ARQ); (2) 返回 n -ARQ (go back n ARQ, GB n -ARQ); (3) 选择重传 ARQ (selective repeat ARQ, SR-ARQ)。文献[1-3]已对这些基本协议进行了分析, 文献[4-6]已对这 3 种协议之间的区别进行了进一步的探讨, 这些协议基本上都是通过重复发送一个分组来提高成功传输的概率。

针对多播传输, Yong 和 Jolfaei 分别提出了 XOR 选择重传 ARQ 协议(XOR SR-ARQ)^[7-8], 基本思想是从物理角度通过 XOR 操作组合不同接收节点发出的否定应答数据包, 以减少重传的数目, 降低网络负荷, 提高网络吞吐量。Li 等人在 2000 年首次提出了网络编码的概念^[9], 基于网络编码多播传输的传输速率可以达到网络流量的理论上限值, 即最大流 $C^{[10]}$ 。此外, 网络编码还在负载均衡、资源消耗、管理、网络鲁棒性等方面带来了好处。

本文从网络编码的角度重新研究了 XOR SR-ARQ 协议, 考虑到多播网络的吞吐量以及带宽消耗问题, 提出了适用于 XOR SR-ARQ 的网络编码多播路由算法。源节点向接收节点发送正常数据包时, 在源节点与各接收节点之间建立多播路径族, 并考虑不同路径族之间链路的共享; 源节点发送 XOR 数据包时, 搜索源节点到各接收节点的最短路径, 并考虑最短路径之间链路的共享。算法考虑链路之间的共享, 以降低带宽资源消耗, 提高网络性能。最后用仿真实验验证了算法的有效性。

1 XOR 选择重传 ARQ 协议

本节首先介绍基本的 SR-ARQ 协议, SR-ARQ 是对 GBn-ARQ 的改进。在 GBn-ARQ 中, 如果前向传输的某个分组出错, 则在收到对方的否定应答后, 该分组及其后续的分组都要重传, 而不管这些后续分组是否传输正确。SR-ARQ 的思路与 GBn-ARQ 相同, 窗口仍为 n , 但仅重发有错的分组。

下面从网络编码的角度介绍 XOR SR-ARQ 协议。考虑包含一个源节点和 M 个接收节点的多播网络 $G=(V, E)$, 这里信源和接收节点之间通过多播信道进行通信。信源传输数据分组, 可以同时被 M 个接收节点接收。每个数据分组包含一个循环冗余校验(cyclic redundancy check, CRC), 确保接收节点能够检测出传输错误。接收节点收到数据分组, 首先检查 CRC 码。如果该分组被成功接收, 则向信源发送肯定应答(acknowledgement, ACK), 否则发送否定应答(negative acknowledgement, NACK)。假定接收节点相互独立接收数据包, 所有网络信道具有相同的丢包率 p 。进一步假定反馈信道不会发生错误, NACK 以及信源节点发送的 XOR 数据包不会丢失。忽略节点数据处理时间, 数据的暂停周期等于数据的传播延迟。每个数据分组具有一个序号, 唯一地确定分组在传输序列中的位置。

在 XOR SR-ARQ 协议中, 信源节点收到一个 NACK 后并不立即重传丢失的数据包, 当它收集到 X window 个 ACK 或者 NACK 后, 才决定重传 NACK 应答的数据包。基本思想是对 NACK 的数据包进行网络编码(XOR)操作, 然后发送出去, 相应得到的数据包称为 XOR 数据包。接收节点必须存储 XOR 数据包中除其丢失数据包以外所有的数据包, 以便重新得到丢失的数据包。接收节点对 XOR 数据包和已有正确接收的数据包进行网络编码(XOR)操作, 从而得到丢失的数据包。

图 1 为一个 XOR SR-ARQ 示例。信源收到 3 个重传请求 NACK, 生成 XOR 数据包 $P_1 \oplus P_2 \oplus P_3$, 将其多播到所有接收节点。接收节点可从如下表达式得到丢失的数据包

$$P_1 = \text{XOR 数据包} \oplus P_2 \oplus P_3$$

$$P_2 = \text{XOR 数据包} \oplus P_3 \oplus P_1$$

$$P_3 = \text{XOR 数据包} \oplus P_1 \oplus P_2$$

XOR SR-ARQ 协议从物理角度通过网络编码(XOR)操作组合需要重传的 NACK 的数据包, 显著减少了重传的数目, 降低了网络负荷, 进而提高网络吞吐量。

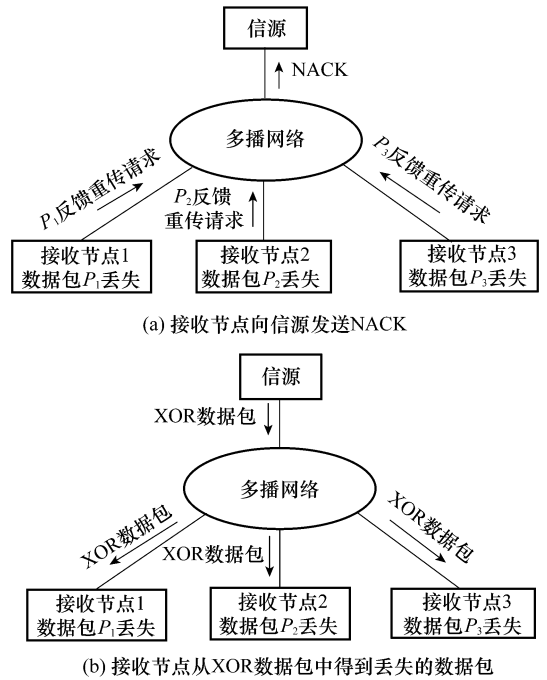


图 1 XOR SR-ARQ 示例

2 基于 XOR SR-ARQ 的网络编码多播路由算法

定义 1(离散路径)^[11] 从信源 s 到接收节点 t 的两条或多条路径相互离散当且仅当它们不具有共享链路。

实际通信网络, 如 Internet 网络, 任意两点之间的最大流是非常大的, 实际应用时通常两点间信息速率要远小于该最大流值, 即绝大多数多播传输速率低于多播容量的理论上限值 C 。假定在网络图 G 中对每个接收节点要搜索 m 条离散路径, 多播速率为 h , 这里 m 不大于网络 G 中源节点到各接收节点离散路径数目的最小值。将网络 G 中每条链路 $(i, j) \in E$ 的距离 d_{ij} 设为 1, 有线网络以带宽消耗作为资源消耗的标准, 若每条链路传输相同的信息比特, 则一条路径包含的链路越少其消耗的带宽资源也就越少。下面描述具体的基于 XOR SR-ARQ 的网络编码多播路由算法。

算法 1 输入: 网络 $G(V, E)$, 源节点 s , 接收节点集 T , 离散路径数目 m 。输出: 所有接收节点的 M 组路径族或者 M 条最短路径。

步骤 1 信源 s 发送正常数据包时, 进行步骤 2 和步骤 3 的操作; 当信源 s 发送 XOR 数据包时, 进行步骤 4 和步骤 5 的操作。

步骤 2 在网络 G 中, 使用 Dijkstra 路由算法重复搜索从信源 s 到接收节点 $t_i \in T(i \in [1, M])$ 的 m 条最短离散路径, 将多播速率 h 平均分配到这 m 条离散路径上。在搜索从信源 s 到 t_i 的路径族的过程中, 不考虑前 $i-1$ 组路径族,

并将前 $i-1$ 组路径族中所有链路的距离设为 0。

步骤 3 重复步骤 2 直到对所有接收节点找到 M 组路径族。

步骤 4 在网络 G 中,使用 Dijkstra 路由算法重复搜索从信源 s 到接收节点 $t_i \in T(i \in [1, M])$ 的 1 条最短路径,将 XOR 数据包通过此最短路径传送到接收节点 t_i 。在搜索从信源 s 到 t_i 最短路径的过程中,不考虑前 $i-1$ 条最短路径,并将前 $i-1$ 条最短路径中所有链路的距离设为 0。

步骤 5 重复步骤 4 直到对所有接收节点找到 M 条最短路径。

基于 XOR SR-ARQ 的网络编码多播路由算法,在搜索信源 s 到接收节点 $t_i (i \in [1, M])$ 的路径族(或最短路径)的过程中,不考虑前 $i-1$ 组路径族(或前 $i-1$ 条最短路径),并将前 $i-1$ 组路径族(或前 $i-1$ 条最短路径)中所有链路的距离设为 0,使信源 s 到接收节点 t_i 的路径族(或最短路径)能够共享前 $i-1$ 组路径族(或前 $i-1$ 条最短路径)中的链路,提高链路共享度,减少带宽资源消耗。

3 性能分析与仿真

3.1 吞吐量

为分析吞吐量,假定随机变量 $X_i (i=1, \dots, M)$ 表示接收节点 i 成功接收特定数据包需要的传输数目,且这些随机变量相互独立。数据包在 $X = \max \{X_i, 1 \leq i \leq M\}$ 次传输后被所有接收节点成功接收。网络吞吐量 T 定义^[8]为

$$T^{-1} = E[X] = 1 + \sum_{x=2}^{\infty} (x-1)P(X=x) \quad (1)$$

在 XOR SR-ARQ 模型中,每一次重传包含多个 XOR 数据包。给变量 X 分配随机变量 $(Y_{ix})_{1 \leq i \leq x}, x \in \mathbf{N}, x$ 表示所有 M 个接收节点成功接收到数据包所需的重传数目; Y_{ix} 表示在第 i 次重传中 XOR 数据包的数目。吞吐量表示为

$$T^{-1} = 1 + \sum_{x=2}^{\infty} \left(\sum_{i=1}^{x-1} \frac{1}{E[Y_{ix-1}]} \right) P(X=x) \quad (2)$$

假定 $E[Y_{ix}] = K \geq 1$ (K 是在一个 XOR 数据包里基本数据包的平均数目,不依赖参数 i 和 x),得到结果如下

$$T^{-1} = E[X] =$$

$$(1 - p_u)^{-1} \left(1 + 1/K \sum_{i=1}^M \left(1 - \prod_{j=1}^M (1 - p_j^i) \right) \right) \quad (3)$$

式中, p_u 和 p_i 分别表示上行链路和接收节点 i 下行链路的分组错误概率,本文假定上行链路不会发生传输错误,即 $p_u=0$ 。考虑所有网络链路具有相同分组错误概率 p 的情况,由于此式对于所有 $E[Y_{ix}] \leq M$ 都成立,将式(3)中的 K 用 M 代替得到 XOR SR-ARQ 吞吐量的上边界,表示为

$$T_{\max}^{-1} = 1 + 1/M \sum_{x=1}^{\infty} \left(1 - (1 - p^x)^M \right) \quad (4)$$

文献[8]中已经给出了式(1)~式(4)中吞吐量的详细推导过程。

图 2 给出了不同接收节点数目 M 时,网络吞吐量的上边界 T_{\max} 随链路分组错误概率 p 的变化曲线。结果表明, XOR SR-ARQ 方案对于具有多个参与者的网络特别有用,对于较大的 M , XOR SR-ARQ 策略获得较高的吞吐量。随着 M 值的增加, XOR SR-ARQ 策略在吞吐量上的区别逐渐变大。这是因为随着 M 值的增加,也就是参加 XOR 数据包的分组数目增加, XOR 数据包的数目减少。

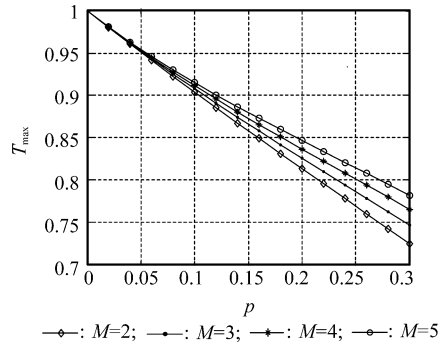


图 2 XOR SR-ARQ 吞吐量的上边界

3.2 资源消耗

采用文献[12]中的方法产生随机网络模型,平均带宽消耗为

$$W = \sum_{(i,j) \in E} \omega_{ij} / h \quad (5)$$

式中, ω_{ij} 表示链路 (i, j) 上的带宽资源消耗; h 为多播速率。

文献[13]中将基于网络编码的最小费用多播算法作为一个线性最优化问题进行求解,这里采用 LINGO 语言进行仿真。对于基于 XOR SR-ARQ 的网络编码多播路由算法以及传统路由算法(Dijkstra 和 Prim 算法),采用 C++ 语言进行仿真。

在节点度数保持不变的情况下,采用文献[12]中的方法分别产生 1 000 个具有 30 个节点和 5 个接收节点的随机网络,则每个数据点进行了 1 000 次仿真。本文以基于网络编码的最小费用多播算法为基准,假定其带宽资源消耗为 1。图 3 给出了不同节点度数时,传统路由算法(Dijkstra 算法和 Prim 算法)和基于 XOR SR-ARQ 的网络编码多播路由算法相对于最小费用多播算法的带宽资源消耗。可以看出,基于 XOR SR-ARQ 的网络编码多播路由算法的带宽消耗是最小的,非常接近最小费用多播算法,而 Prim 算法和 Dijkstra 算法的带宽消耗都远大于最小费用多播算法。

基于 XOR SR-ARQ 的网络编码多播路由算法根据信源发送数据包的情况,分别搜索到所有接收节点的 M 组路径族或者 M 条最短路径。网络编码理论认为网络链路上传输的信息可以进行叠加处理,且通过接收节点的译码操作能够恢复出叠加的信息,则搜索得到的 M 组路径族或者 M 条最短路径中的链路可以共享,从而提高了链路共享度,减小网络资源消耗。

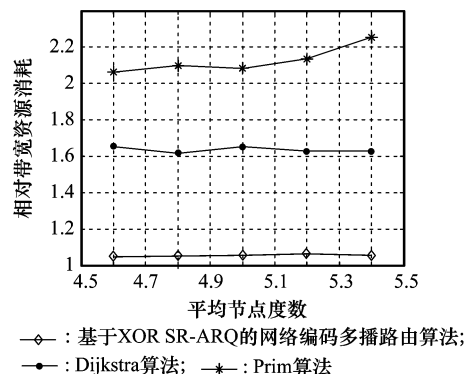


图 3 不同路由算法相对最小费用多播算法的带宽资源消耗

4 算法复杂度

Dijkstra 算法和 Prim 算法建立多播分布树的复杂度,依赖于 Dijkstra 算法和 Prim 算法的复杂度。Dijkstra 算法和 Prim 算法的复杂度都为 $O(|N|^2)$, 因此用 Dijkstra 算法和 Prim 算法建立多播分布树的复杂度为 $O(|N|^2)$ 。

基于网络编码的最小费用多播算法可以作为一个线性最优化问题进行求解,因此其寻找最佳路径的复杂度依赖于求解线性规划问题算法的复杂度。以单纯形法^[14]为例,它的复杂度为 $O(p^2q)$, p 是约束条件的数目, q 是变量的数目。应用于基于网络编码的最小费用多播算法,得到它的复杂度为 $O(|E|^3|S|^3)$, E 是链路集, S 是多播节点集。

基于 XOR SR-ARQ 的网络编码多播路由算法的复杂度要分两种情况进行分析。当信源发送正常的数据包时,在网络 G 的基础上,使用 Dijkstra 路由算法搜索信源 s 到接收节点 $t_i \in T(i \in [1, M])$ 的最短路径的复杂度依赖于 Dijkstra 路由算法的复杂度,即为 $O(|N|^2)$, 则搜索信源到接收节点 $t_i \in T$ 的 m 条离散路径需要 $O(m|N|^2)$ 次计算;重复搜索到 M 个接收节点的 m 条离散路径需要 $O(mM|N|^2)$ 次计算。如果信源发送 XOR 数据包,使用 Dijkstra 路由算法搜索信源 s 到接收节点 $t_i \in T(i \in [1, M])$ 的一条最短路径的复杂度为 $O(|N|^2)$, 则重复搜索到所有接收节点的 M 条最短路径需要 $O(M|N|^2)$ 次计算。

由于节点数 $|N|$ 远小于链路数 $|E|$ 且 $m < |N|$, 则 $m < |N| \ll |E|$, 从而 $m|N|^2 \ll |E|^3$, $|N|^2 \ll |E|^3$ 。接收节点的集合是多播节点集 S 中的一个子集,因此接收节点数目 M 小于多播节点数 $|S|$, 即 $M < |S|$, 由于 M 和 $|S|$ 都为大于 1 的整数,则 $M < |S|^3$ 。根据 $m|N|^2 \ll |E|^3$, $|N|^2 \ll |E|^3$ 及 $M < |S|^3$ 这 3 个不等式容易得到:基于 XOR SR-ARQ 的网络编码多播路由算法的复杂度 $O(mM|N|^2)$ (或 $O(M|N|^2)$) 远小于最小费用多播算法的复杂度 $O(|E|^3|S|^3)$, 但比传统路由算法 (Dijkstra 算法和 Prim 算法) 的复杂度 $O(|N|^2)$ 略高。

5 结论

本文从网络编码的角度重新研究了 XOR SR-ARQ 协议,提出了一种能有效恢复链路传输错误的网络编码多播路由算法。信源收到 NACK 后并不立即重传丢失的数据包,当信源收到 X window 个 NACK 后,通过网络编码 (XOR) 操作组合需要重传 NACK 的数据包,显著减少了重传的数目,降低了网络负荷,进而提高了网络吞吐量。

网络编码理论认为网络链路上传输的信息可以进行叠加处理,基于 XOR SR-ARQ 的网络编码多播路由算法考虑不同路径族 (或者最短路径) 之间的链路共享,从而减小网络资源消耗。该路由算法可以应用于各种有线网络,特别是具有较多共享链路的网络,仿真实验验证了该算法的有效性。网络吞吐量方面,随着参加 XOR 数据包的分组数目增加, XOR 数据包的数目减少,获得的网络吞吐量也越高。

该算法的带宽资源消耗要小于传统的多播路由算法,接近基于网络编码的最小费用多播算法。数学分析表明,该算法的复杂度远小于最小费用多播算法,但比 Dijkstra 算法和 Prim 算法的复杂度略高。

需要指出,基于 XOR SR-ARQ 的网络编码多播路由算法在获得较好网络吞吐量以及资源消耗性能的同时,将不可避免地引进一些额外的开销,比如较大的网络时延以及节点数据处理。

参考文献:

- [1] Benice R, Frey A J. An analysis of retransmission system[J]. *IEEE Trans. on Communications*, 1964, 12(4): 135 - 145.
- [2] Bruneel H, Moeneclaey M. On the throughput performance of some continuous ARQ strategies with repeated transmissions [J]. *IEEE Trans. on Communications*, 1986, 34(3): 244 - 249.
- [3] Burton H O, Sullivan D D. Errors and error control[C]// *Proc. of the IEEE*, 1972, 60(11): 293 - 1301.
- [4] Sastry A. Improving automatic repeat-request (ARQ) performance on satellite channels under high error rate conditions[J]. *IEEE Trans. on Communications*, 1975, 23(4): 436 - 439.
- [5] Towsley D, Mithal S. A selective repeat ARQ protocol for a point to multipoint channel[C]// *Proc. of the IEEE Conference on Computer Communications*, San Francisco, 1987: 521 - 526.
- [6] Weldon E J. An improved selective-repeat ARQ strategy[J]. *IEEE Trans. on Communications*, 1982, 30(3): 480 - 486.
- [7] Yong S, Sung L B. XOR retransmission in multicast error recovery[C]// *Proc. of IEEE International Conference on Networks*, Singapore, 2000: 336 - 340.
- [8] Jolfaei M, Martin S, Mattfeldt J. A new efficient selective repeat protocol for point-to-multipoint communication [C] // *Proc. of IEEE International Conference on Communications*, Geneva, Switzerland, 1993: 1113 - 1117.
- [9] Ahlswede R, Cai Ning, Li S Y R, et al. Network information flow[J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2000, 46(4): 1204 - 1216.
- [10] Taku N, Takahiro M, Miki Y. Performance evaluation of new multicast architecture with network coding[J]. *IEICE Trans. on Communications*, 2003, E86B(6): 1788 - 1795.
- [11] Zhu Y, Li B C, Guo J. Multicast with network coding in application-layer overlay networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(1): 107 - 120.
- [12] Waxman B M. Routing of multipoint connections[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1988, 6(9): 1617 - 1622.
- [13] Lun D S, Ratnakar N, Medard M, et al. Minimum-cost multicast over coded packet networks[J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2006, 52(6): 2608 - 2623.
- [14] Fang S C, Puthenpura S. *Linear optimization and extensions: theory and algorithms* [M]. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1993.