

基于机会式网络编码的高效广播传输算法

卢冀^{1,2,3}, 吴成柯³, 肖嵩³, 张冉⁴

(1. 中国电科集团第 54 研究所, 河北 石家庄 050081; 2. 通信网信息传输与分发技术重点实验室, 河北 石家庄 050081;
3. 西安电子科技大学 ISN 重点实验室, 陕西 西安 710071; 4. 中国电科集团第 27 研究所, 河南 郑州 450005)

摘要: 为了提高无线网络广播传输的效率, 针对单跳无线网络提出了采用编码方法的广播传输算法。在传统的无线广播传输模型的基础上, 分别实现了基于机会式网络编码的单组合分组广播传输算法和多组合分组广播传输算法。它们采用不同的策略选择多个丢失分组编码组合成重传分组, 并通过从编码组合数据分组中恢复丢失分组的方式来提高广播传输的吞吐量。仿真结果表明, 新算法在不同无线信道传输模型下相比已有的算法有效地降低了广播传输所需的传输带宽。

关键词: 无线网络; 网络编码; 机会式网络编码; 广播传输; 带宽

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)01-0064-07

Efficient broadcast transmission algorithms based on opportunistic network coding

LU Ji^{1,2,3}, WU Cheng-ke³, XIAO Song³, ZHANG Ran⁴

(1. China Electronics Technology Group Corporation No.54 Institute, Shijiazhuang 050081, China;

2. Science and Technology on Information Transmission and Dissemination in Communication Network Laboratory, Shijiazhuang 050081, China;

3. National ISN Key Laboratory, Xidian University, Xi'an 710071, China;

4. China Electronics Technology Group Corporation No.27 Institute, Zhengzhou 450005, China)

Abstract: Opportunistic network coding (ONC) based broadcast transmission algorithms were proposed to improve the transmission efficiency for wireless single-hop networks. Based on the traditional wireless broadcast transmission model, ONC based solo combination packet broadcast transmission (ONCSB) algorithm and ONC based multiple combination packets broadcast transmission (ONCMB) algorithm were proposed respectively. By employing the method of combination different lost packets with different strategies, the ONCSB and ONCMB can improve the throughput with recovering lost packets via a combination packet efficiently. The simulation results show that either ONCSB or ONCMB can lead to better transmission bandwidth performance compared with other algorithms under different wireless channel conditions.

Key words: wireless networks; network coding; opportunistic network coding; broadcast transmission; bandwidth

1 引言

机会式网络编码(ONC, opportunistic network coding)^[1]是应用于无线网络的一种随机线性网络编码^[2,3]方法。ONC 因在提高无线信息传输效率^[4]和吞

吐量^[5]方面具有明显的优越性而得到广大研究人员的青睐。

在无线广播网络中, 信道拥塞和衰落等因素造成的数据分组丢失会导致广播传输性能的下降, 通常采用自动重传请求(ARQ)方法或前向纠错(FEC)

收稿日期: 2010-09-09; 修回日期: 2011-12-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60832001, 60702058, 60802076); 高等学校创新引智计划基金资助项目(B08038)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(60832001,60702058, 60802076); The 111 Project(B08038)

的传统方法提高广播传输的性能。ONC 为提高广播传输性能提供了新思路,Nguyen 等^[6]在理论上证明了基于 ONC 传输方式的广播传输效率明显优于传统方法,因此如何构造高效的编码算法成为关键问题。已有的方法可以分为 3 类:第 1 类是针对如何对分组丢失进行编码的方法,此类方法因没有考虑实际传输中编码分组丢失的问题而不实用,例如以最小重传次数为约束条件的 WBR 编码方法^[7];第 2 类是编码和 ARQ 相结合的方法,此类方法会因 ARQ 重传次数的增多使传输效率大幅降低,例如用于 WiMAX 网络的传输算法^[8]和利用反馈信息依次组合每个终端的分组丢失的算法^[9];第 3 类为选择分组丢失进行编码的方法,如何选择分组丢失是此类算法设计的关键。如 Fan 等^[10]提出的采用搜索的方法选择数据分组生成重传分组的算法,复杂度较高,并且没有动态的组合重传中的分组丢失而性能不佳,BENEFIT 算法^[11]考虑终端从多个重传分组中获取数据分组的情况,以解码终端数、重传分组有效性和组合分组数为条件选择分组丢失进行编码,有效地提高了分组丢失重传效率,但因选择分组丢失判断条件复杂而不易实现。

综上所述,为了提高无线网络广播传输效率,基于 ONC 传输方法的研究目的是如何实现实用且性能更优的数据分组编码算法,即第 2 类方法中设计分组丢失选择简单实用且 ARQ 重传次数少的方法,第 3 类方法中如何设计高效的数据分组组合策略在降低选择分组丢失复杂度的同时提高重传性能;针对上述 2 个问题,本文分别提出了基于 ONC 的多组合分组广播传输(ONCMB, ONC based multiple combination packets broadcast transmission)算法和基于 ONC 的单组合分组广播传输(ONCSB, ONC based solo combination packet broadcast transmission)算法。ONCSB 和 ONCMB 分别采用散列搜索的方法和组合每个终端分组丢失的方法生成重传分组,有效地降低了此类方法数据分组组合策略的复杂度,并提高分组丢失重传效率。理论分析和仿真实验都说明了 ONCSB 和 ONCMB 的可行性和有效性。新算法适用于单跳无线广播网络重传方法的设计,例如 Wi-Fi, WiMAX 或 LTE 网络,并且可用于设计 HARQ 算法^[12]。

2 基于 ONC 传输方法的思想

基于 ONC 的广播传输方法在源节点采用机会

式编码(OC, opportunistic coding)技术生成重传分组,不同终端可从一个重传分组中恢复其分组丢失,因此该方法可以减少广播传输的次数。OC 将多个数据分组通过异或(\oplus)运算编码成组合重传分组,假设 $P_i(1 \leq i \leq N)$ 为第 i 个数据分组, R 为组合重传分组,则 P_i 和 R 可以分别由二进制序列 $\{p_1^i, p_2^i, \dots, p_L^i\}$ 和 $\{r_1, r_2, \dots, r_L\}$ 表示,其中, L 表示长度,那么 OC 生成 R 中 $r_l(1 \leq l \leq L)$ 的方法为

$$r_l = \sum_{i=1}^N l_i p_l^i \text{ mod } 2, \quad l_i \in \{0,1\} \quad (1)$$

其中, $l_i=1$ 表示 P_i 编码于 R 中。

基于 ONC 的传输方法可以减少广播传输的次数。如图 1 所示, S 发送 P_1 、 P_2 和 P_3 后, T_1 、 T_2 和 T_3 分别丢失 P_1 、 P_2 和 P_3 , $R_k(k=1,2,\dots)$ 表示第 k 个重传分组。举 2 个例子:传输方法 A:重传 $R_1=P_1 \oplus P_2 \oplus P_3$ 时, T_1 通过 $R_1 \oplus (P_2 \oplus P_3)=P_1$ 恢复 P_1 , T_2 和 T_3 同理从 R_1 中得到 P_2 和 P_3 , A 只需 1 次重传;传输方法 B:当 $R_1=P_1 \oplus P_2$ 时,类似的, T_1 可以恢复 P_1 , T_2 可以恢复 P_2 , 但是需要传输 $R_2=P_3$ 使 T_3 恢复 P_3 , B 共需 2 次重传;传统 ARQ 方法需要分别重传 $R_1=P_1$, $R_2=P_2$ 和 $R_3=P_3$, 共需 3 次重传。因此基于 ONC 的传输方法可以减少分组丢失重传的次数,此外,数据分组的组合方式决定了基于 ONC 传输方法的性能。

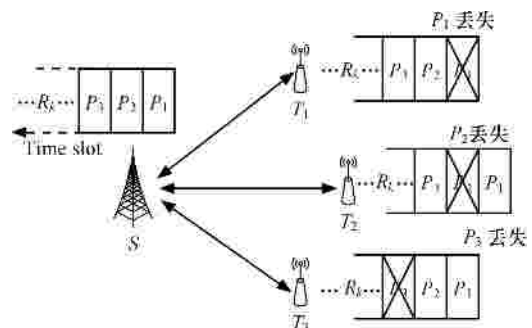


图 1 基于机会式网络编码重传方法示例

3 基于 ONC 的广播传输算法

3.1 广播单跳传输模型

在实际的广播无线网络中,数据分组一般通过基站(BS)或无线访问节点(AP)广播发 $P_i(1 \leq i \leq N)$, T_j 是否丢失 P_i 服从参数为 q_j 的贝努力实验,其中, q_j 表示 T_j 的分组丢失率。每个时隙 S 广播发送一个数据分组,全部终端通过可靠信道反馈 ACK/NAK

信号说明其是否收到该时隙传输的数据分组。当发送完数据分组后，源节点能获得终端分组丢失的信息。

定义 1 用 O 来表示 S 获得的终端丢失数据分组的信息，其可以表示为一个 M 行 N 列的矩阵，且 $M>1$ 。 O 中元素 $?_{ji} \in \{0,1\}$ 表示 T_j 是否成功收到 P_i ， $?_{ji}=0$ 表示 P_i 成功发送，反之表示 P_i 丢失。图 2 给出了 O 的示例。

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7
T_1	1	0	1	0	0	0	0
T_2	0	1	0	0	0	0	0
T_3	0	0	1	0	1	0	0
T_4	0	0	0	1	0	0	1
T_5	0	0	0	0	1	1	0

图 2 O 示例

定义 2 传输带宽 B 可以用来描述传输算法的性能^[6]，其表示为

$$B = \frac{N + K}{N} = 1 + \frac{K}{N} \quad (2)$$

其中， K 表示数据分组重传的次数。 B 反映了成功传输一个数据分组需要的平均传输次数。

3.2 ONCSB 算法

如何选择分组丢失决定了此类算法的复杂度和性能，此外，散列搜索算法具有较低的复杂度和较高的性能，因此 ONCSB 采用散列搜索的方法降低数据分组选择的复杂度并提高重传性能。

ONCSB 选择分组丢失的过程分为 4 个阶段：

- 1) 根据散列函数计算分组丢失的散列值；
- 2) 根据得到的散列值创建分组丢失的散列列表；
- 3) 从散列列表表中选择满足条件的分组丢失组合成重传分组；
- 4) 根据终端是否从重传分组中恢复数据分组的情况，更新散列列表。

阶段 1：计算分组丢失的散列值。根据 O 第 i 列的元素值计算 P_i 的散列值，计算该散列值的散列函数 F 为

$$F = \sum_{j=1}^M 2^{j-1} w_{ji}, \quad i = 1, 2, L, N \quad (3)$$

分组丢失对应的散列值跟该终端分组丢失信息对应。由式(3)得到 P_i 对应的散列值 h_i 满足 $0 < h_i < 2^M - 1$ 。

阶段 2：创建分组丢失的散列列表。根据分组丢失散列值由大到小得顺序建立分组丢失的散列列表，图 3 给出了图 2 所示分组丢失的散列列

表，该列表第 1 行是由式(3)计算得到的散列值 H ，第 2 行和第 3 行表示散列值为 H 的数据分组数和数据分组。

H	20	16	8	5	2	1
n_0	1	1	2	1	1	1
P_i	P_5	P_6	P_4	P_7	P_2	P_1

图 3 散列表

阶段 3：选择满足编码条件的分组丢失生成重传分组。具体过程是：A 在散列列表中，选择最大散列值 h_1 ；B 从已选择的散列值的邻域中选择最大的散列值，直到该邻域为空；C 把所选散列值对应的数据分组组合成一个重传分组。定义 U 表示散列值 $h_1, h_2, \dots, h_n (n \in \{1, 2, \dots, N\})$ 邻域， U 的计算式为

$$U = \left\{ \sum_j 2^{j-1} d_j \mid d_j \in \{0,1\}, \exists d_j \neq 0 \right. \\ \left. \text{subject to } j \in \{1, 2, L, M\} \text{ and } \forall b_i^j = 0 \right. \quad (4)$$

其中， $b_i^j (1 \leq i \leq n)$ 表示 h_i 的第 j 比特。如图 3 所示，首选选择最大的散列值 20，从其邻域中选择散列值 8，再从 20 和 8 的邻域中选择 2，最后从 20、8 和 2 的邻域中选择 1，之后邻域为空，搜索完成，将散列值 20、8、2 和 1 对应的数据分组 P_5 、 P_4 、 P_2 和 P_1 编码组合成一个重传分组。

阶段 4：传输第 3 阶段生成的数据分组，在一个传输时隙内，终端通过 ACK/NAK 信号反馈其是否收到该数据分组。当一个终端未收到该数据分组时，重新计算该终端分组丢失的散列值，计算公式为

$$\sum_{j=1}^M 2^{j-1} t_j, \quad t_j \in \{0,1\} \quad (5)$$

其中， $t_j=1$ 表示 T_j 没有从该重传分组中恢复其分组丢失，并根据上式计算的散列值将分组丢失更新到散列列表中。如果散列列表中存在分组丢失，至阶段 3，否则结束。

3.3 ONCMB 算法

ONCMB 算法在源节点依次选择每个终端的分组丢失组成重传分组，使每个终端的分组丢失依次编码于重传分组中，终端从收到的重传分组中解码其分组丢失，若该重传分组只包含终端一个分组丢失，该终端可以解码得到其分组丢失，否则，终端可以从多个重传分组解码得到多个分组丢失。与文献[9]方法相比，ONCMB 编码生成单个重传分组的

不同分组丢失数较多，因此有效地提高了终端恢复分组丢失的效率，提高了传输性能。

ONCMB 算法生成重传分组的过程可分为以下 2 个阶段。

阶段 1：每次传输， S 重传由每个终端的一个分组丢失编码组合成的重传分组，而后终端反馈 ACK/NAKs 信号说明其是否收到该时隙传输的数据分组。同理， S 生成并发送重传分组，再接收反馈得知未恢复的数据分组，依次类推，直到全部数据分组都成功发送。终端从收到的重传分组中恢复分组丢失，当重传分组中包含某终端一个分组丢失时，该终端立即恢复这个分组丢失，当重传分组中包含某终端多个分组丢失时，该终端可以从后续重传分组中恢复分组丢失后再恢复这个重传分组中包含的最后一个分组丢失。

具体的做法是：从 O 每行中选择第一个值为 1 的数据分组编码得到重传分组 R_1 ，传输 R_1 后，若 $T_j(1 \leq j \leq M)$ 未收到 R_1 ，则 O 中第 j 行所选择数据分组对应的元素值不变，否则，该元素值为零；继续生成 R_2 ，直到 O 为零矩阵。图 2 中， $R_1 = P_1 \oplus P_2 \oplus P_3 \oplus P_4 \oplus P_5$ ，假设只有 T_2 未收到 R_1 ，则 $R_2 = P_3 \oplus P_2 \oplus P_5 \oplus P_6 \oplus P_7$ ，若所有终端收到 R_2 ， T_1 、 T_4 和 T_5 通过 R_1 和 R_2 恢复各自的 2 个分组丢失。

阶段 2：ONCMB 使终端从多个重传分组中恢复其分组丢失，因把某终端的多个分组丢失组合到一个重传分组中，可能会导致该终端不能从收到的多个重传分组中恢复分组丢失^[13,14]，因此 ONCMB 依次传输这些终端所需的数据分组完成重传。此时，根据组合分组信息在发送端找出终端不能恢复的 $e(e \geq 2)$ 个数据分组，首先传输 $e-1$ 个不可恢复的数据分组，再解码获取最后一个分组丢失。

令 $E_i(n) = 1(1 \leq i \leq k, 1 \leq n \leq N)$ 表示数据分组 P_n 编码于 R_i ，反之 P_n 未编码于 R_i ，其中， k 表示阶段 1 生成的重传分组数。令 N 维行向量 $f = [f_1, f_2, \dots, f_n, \dots, f_N]$ ，其中， f_n 表示 P_n 编码在哪些重传分组中的信息，则 f 表示所有数据分组是否编码于重传分组中的信息。对于终端 $T_j(1 \leq j \leq M)$ ， f_n 的计算公式为

$$\begin{cases} a_0 = w_{jn} \\ a_i = 2^i E_i(n) a_{i-1} + a_{i-1}, i = 1, \dots, k \\ j_n = a_k \end{cases} \quad (6)$$

通过式(6)可得到 f ，从 f 中选择相等的非零元素即可推出 T_j 未恢复的分组丢失。如图 2 中 T_3 不能从重传分组 R_1 和 R_2 中恢复其分组丢失 P_3 和 P_5 ，因由式(6)计算可得 $f = [0, 0, 15, 0, 15, 0, 0]$ ，得到 $f_3 = f_5 = 0$ 。

4 平均传输带宽分析

当 N 足够大时，文献[6]给出了最优的平均传输带宽 B_{opt} ，其表示式为

$$B_{opt} = \frac{1}{1 - q_{max}} \quad (7)$$

其中， $q_{max} = \max\{q_1, q_2, \dots, q_M\}$ ， $q_j(1 \leq j \leq M)$ 表示终端 T_j 的分组丢失率。

令 R_s 和 B_s 分别表示 ONCSB 算法传输的平均数据分组数和平均传输带宽。当 N 足够大时，ONCSB 的重传分组中最多包含任一终端的一个分组丢失，因此其生成的平均重传分组数由分组丢失率最大终端的分组丢失数决定，于是 ONCSB 生成的平均重传分组数 r_1 为

$$r_1 = Nq_{max} \quad (8)$$

此外，传输 r_1 的过程仍然会有分组丢失，由上述分析可知，其平均分组丢失数 r_2 为

$$r_2 = r_1 q_{max} = Nq_{max}^2 \quad (9)$$

依此类推，传输 r_{i-1} 个分组丢失产生的平均分组丢失数 r_i 可以表示为

$$r_i = Nq_{max}^i \quad (10)$$

因此，ONCSB 传输的平均数据分组数为

$$R_s = N + \sum_{i=1}^{\infty} r_i = N \sum_{i=0}^{\infty} q_{max}^i = \frac{N}{1 - q_{max}} \quad (11)$$

代入式(2)，可得

$$B_s = \frac{R_s}{N} = \frac{1}{1 - q_{max}} = B_{opt} \quad (12)$$

令 R_M 和 B_M 分别表示 ONCMB 算法传输的平均数据分组数和平均传输带宽。在第 1 阶段，ONCMB 的重传分组中包含每个终端的分组丢失，平均重传分组数由分组丢失率最大终端的分组丢失数决定，由式(10)知，第 1 阶段的平均重传分组数 r^1 为

$$r^1 = N \sum_{i=1}^{\infty} q_{max}^i = \frac{N}{1 - q_{max}} \quad (13)$$

Yossef 等^[13]在理论上证明了采用二进制码对分

组丢失信息进行编码可使重传次数以很大的概率达到最优, 本文基于机会式编码的重传方法采用二进制码(如式(1)所示)进行编码, 满足上述结论, 该方法可使终端以很大概率从最少的重传分组(r^1)中恢复全部分组丢失, 即 r^2 以很大概率为零。因此, 当 N 足够大时, 第 2 阶段平均发送的数据分组数 r^2 近似为分组丢失率最大终端平均分组丢失数的无穷小量, 则 r^2 为

$$r^2 \approx No(q_{\max}) \quad (14)$$

由式(13)和式(14)可得, ONCMB 平均发送的数据分组数 R_M 为

$$R_M = N + r^1 + r^2 = \frac{N}{1 - q_{\max}} + No(q_{\max}) \quad (15)$$

代入式(2), 可得

$$B_M = \frac{1}{1 - q_{\max}} + o(q_{\max}) \approx \frac{1}{1 - q_{\max}} = B_{\text{opt}} \quad (16)$$

由式(12)和式(16)可知, 在一定条件下, 本文提出的 ONCSB 和 ONCMB 方法可以使网络平均传输带宽接近最优值。

5 仿真实验及分析

实验采用图 1 所示传统的多播网络, S 每次通过广播方式发送一个数据分组, 数据分组的长度和发送时间间隔相同。在相同的分组丢失信息 O 条件下, 仿真得出了不同算法成功发送全部分组丢失所需的传输次数, 再由式(2)得到传输带宽, 多次实验后得到平均传输带宽。由式(1)知, 平均传输带宽越小算法的性能越好。

为了验证算法的有效性和可行性, 并有效反映算法在真实网络环境下的性能, 仿真采用不同类型的分组丢失模型来模拟实际无线信道的状态, 分组丢失模型分为: 1) 随机分组丢失模型; 2) 连续分组丢失模型^[6]。仿真实验采用上述分组丢失率模型得到分组丢失信息 O , 并统计了不同算法针对相同 O 得到的平均传输带宽。

仿真中比较了下述算法: 1)传统的基于 ARQ 机制的传输算法, 记为 SF; 2)一种适用于 WiMAX 的传输算法^[8], 记为 TNC; 3)文献[9]的传输算法 NCWBR; 4)文献[10]的传输算法, 记为 DNC; 5)文献[11]的 BENEFIT 算法; 6)本文提出的基于 ONC 的单组合分组广播传输算法, 记为 ONCSB; 7)本文提出基于 ONC

的多组合分组广播传输算法, 记为 ONCMB。

5.1 随机分组丢失模型

分组丢失率 q 的范围是[0.01, 0.2] 步长为 0.01, 数据分组数 $N=\{10,100\}$, 终端数 $M=5$ 。当终端分组丢失率相等, 即 $q_1=q_2=\dots=q_M=q$ 时, 图 4 给出了分组丢失率变化对算法传输带宽性能的影响。基于 ONC 的传输算法的性能明显优于传统重传算法。随着分组丢失率的增加, ONCSB 和 ONCMB 算法的性能较其他算法更好。在一定分组丢失率的条件下, 分组丢失数随 N 值增大而增加, ONCSB 和 ONCMB 选择分组丢失的编码策略较好, 因此它们的平均传输带宽较小, 而 SF 算法不对数据分组进行编码, 其性能最差。ONCSB 的性能略好于 ONCMB 的性能, 原因在于前者从所有分组丢失中选择可以组合的分组丢失, 而后者是连续的选择终端的分组丢失, 因此 ONCMB 的重传分组可能不能使终端恢复分组丢失的情况, 需要重传分组丢失保证该终端可恢复其分组丢失, 导致 ONCMB 的传输带宽增加。

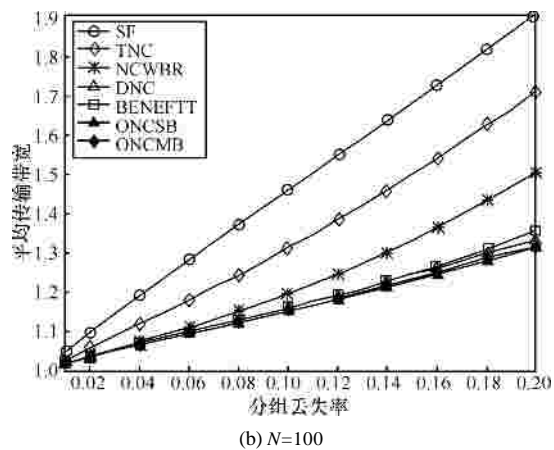
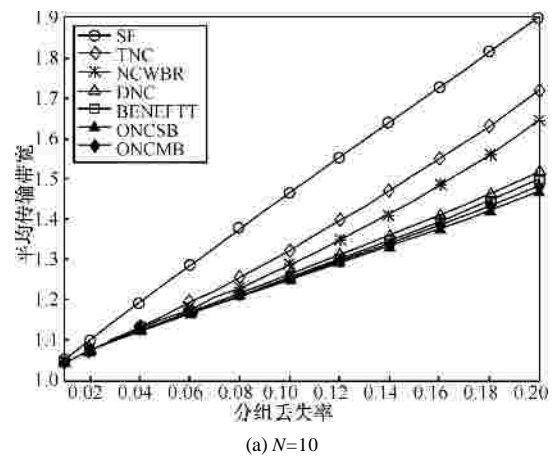


图 4 随机分组丢失模型下平均传输带宽比较

为了说明终端数同平均传输带宽的关系，图 5 给出了终端数 M 不同时对应的平均传输带宽，图中 $q_1=q_2=\dots=q_M = 0.1$ 且 $N=50$ 。由图可知，当 M 值不同时，ONCSB 和 ONCMB 的性能较好，并且随着 M 的增加，其平均传输带宽较其他几种算法收益增加。在一定分组丢失率的条件下，随着 M 的增加，丢失同一个数据分组的终端数增多，广播重传单个数据分组的效率增加，基于 ONC 的传输方法的性能接近于 SF 方法的性能^[15]。

5.2 连续分组丢失模型

为了比较信道发生连续分组丢失时算法的性能，定义二状态马尔可夫过程的 2 个状态为好信道状态 S_g 和坏信道状态 S_b 。 P_a 和 P_b 分别表示 S_g 到 S_b 和 S_b 到 S_g 的转移概率，信道处于状态 S_g 和 S_b 的概率分别为 $P_b/(P_a+P_b)$ 和 $P_a/(P_a+P_b)$ 。终端分组丢失率之间相互独立， P_a 的范围是 $[0, 0.2]$ ，变化步长为 0.02， P_b 为固定值 0.4， S_g 和 S_b 对应的分组丢失率分别为 0.01 和 0.5， $N=\{10,100\}$ ， $M=5$ 。

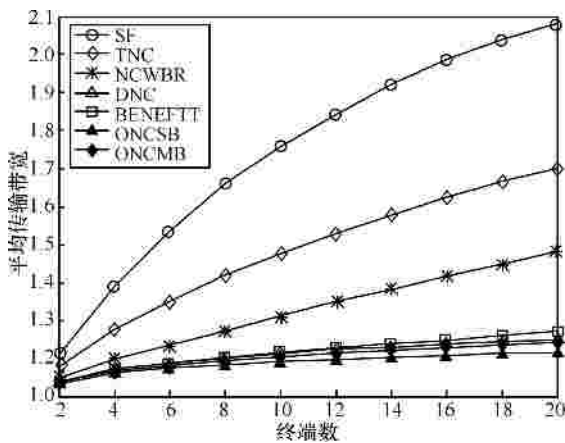
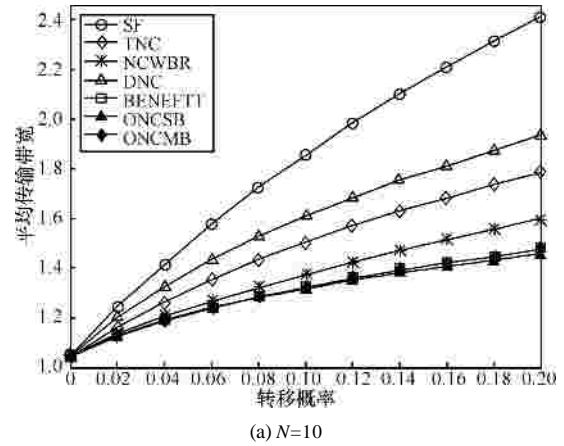


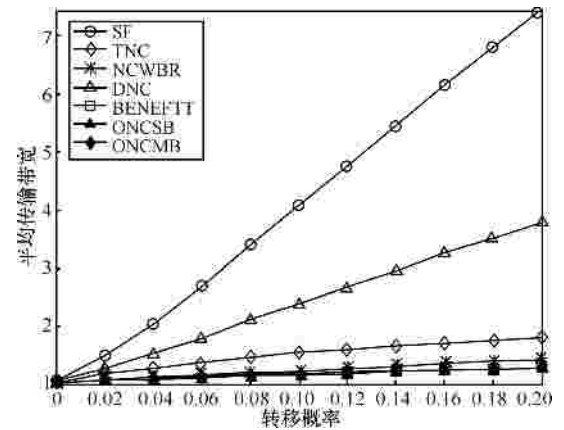
图 5 终端数不同时平均传输带宽比较

图 6 给出了算法的平均传输带宽， $P_a=0$ 时，信道处于好状态，终端分组丢失率较低(0.01)，所以全部传输算法的性能几乎相同，随着 P_a 的增加，信道处于坏状态的概率增加，分组丢失增多，并且 N 的增大有利于基于 ONC 的传输算法的重传分组中组合更多的分组丢失，因此随着 P_a 和 N 的增大，它们的性能比 SF 算法的性能更好，其中，ONCSB 和 ONCMB 算法的性能略优于 BENEFIT 算法，并明显好于其他传输算法的性能。随着 P_a 的增加，出现数据分组连续丢失的情况增多，在这种情况下，同本文算法一样，BENEFIT 算法能

使每个终端的分组丢失组合于单个重传分组使重传数量减少，因此其同本文算法性能接近；DNC 算法因没有动态的处理重传过程的分组丢失导致其重传次数增加，因此平均传输带宽在所有基于 ONC 的传输方法中最差。



(a) $N=10$



(b) $N=100$

图 6 连续分组丢失模型下平均传输带宽比较

5.3 算法时间比较

表 1 给出了不同算法的时间复杂度。采用随机分组丢失模型，终端分组丢失率均为 0.1， M 设为 10，实验得出了不同算法的平均执行时间，如图 7 所示。由比较知，ONCSB 由于采用了效率较高的散列搜索方法选择分组丢失，保证传输带宽性能最优的条件下，维持了较低的运行时间。ONCMB 搜索终端不可恢复分组丢失的过程增加了执行时间，但与复杂度相同的 NCWBR 和 DNC 相比，其传输效率最好，其平均执行时间随着数据分组数的增加明显优于 DNC 算法，ONCMB 性能略好于 BENEFIT 算法，但前者运行时间和复杂度性能明显优于后者。

表 1 算法时间复杂度

算法	复杂度
SF	$O(NM)$
TNC	$O(NM)$
NCWBR	$O(N^2M)$
DNC	$O(N^2M)$
BENEFIT	$O(N^2M^2)$
ONCSB	$O(NM)$
ONCMB	$O(N^2M)$

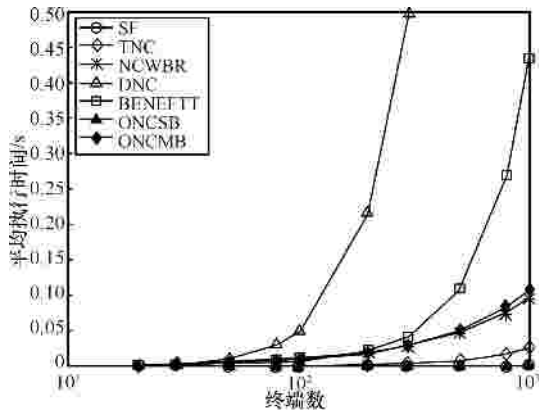


图 7 平均执行时间比较

6 结束语

为了提高无线网络中广播传输的传输效率,本文提出了 2 种基于机会式网络编码的广播传输算法,有效地解决此类算法选择数据分组复杂度高及性能不佳的问题。在引入的无线单跳网络广播传输模型的基础上,首先利用散列方法提出了一种高效的单组合分组广播传输(ONCSB)算法,其次在采用从多个重传分组中恢复分组丢失方法的基础上提出了一种多组合分组广播传输(ONCMB)算法。理论分析和仿真实验都说明了 ONCSB 和 ONCMB 的有效性和可行性。

参考文献 :

[1] KATTI S, RAHUL H S, HU W J, *et al.* XORs in the air: practical wireless network coding[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2008, 16(3):497-510.

[2] AHLWEDE R, CAI N, LIS Y R, *et al.* Network information flow[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 46(4):1204 -1216.

[3] HO T, MÉDARD M, KOETTER R, *et al.* A random linear network coding approach to multicast[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(10):4413-4430.

[4] LE J L, LUI C S J, CHIU D M. DCAR: distributed coding-aware routing in wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2010, 9(4):596-608.

[5] YOMO H, POPOVSKO P. Opportunistic scheduling for wireless network coding[A]. *Proc 2007 IEEE International Conference on*

Communications[C]. Scotland, 2007.5610-5615.

[6] NGUYEN D, TRAN T, NGUYEN T, *et al.* Wireless broadcast using network coding[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, 58(2):914-925.

[7] 卢冀, 肖嵩, 吴成柯. 无线网络中应用机会式网络编码的广播重传方法[J]. *西安交通大学学报*, 2011, 45(2):68-72.

LU J, XIAO S, WU C K. A broadcast retransmission method using opportunistic network coding in wireless networks[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2011, 45(2):68-72.

[8] CHOU C C, WEI H Y. Network coding based data distribution in WiMAX[A]. *Proc International Conference on Mobile Data Management: Systems, Services and Middleware*[C]. Taiwan, China, 2009. 393-394.

[9] 肖潇, 王伟平, 杨路明等. 基于网络编码的无线网络广播重传算法[J]. *通信学报*, 2009, 30(9): 69-75.

XIAO X, WANG W P, YANG L M, *et al.* Wireless broadcasting retransmission approach based on network coding[J]. *Journal on Communications*, 2009, 30(9):69-75.

[10] FAN P Y, CHEN Z, CHEN W, *et al.* Reliable relay assisted wireless multicast using network coding[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2009, 27(5):749-762.

[11] JALALUDDIN Q, CHUAN H F, CAI J F. An efficient network coding based retransmission algorithm for wireless multicast[A]. *Proc IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor Mobile Radio Communications*[C]. Japan, 2009. 691-695.

[12] TRAN T, NGUYEN T. A hybrid network coding technique for single-hop wireless networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2009, 27(5):685-697.

[13] YOSSEF Z B, BIRK Y, JAYRAM T S, *et al.* Index coding with side information[A]. *IEEE Symposium on Foundations of Computer Science*[C]. USA, 2006.197-206.

[14] ROUAYHEB S E, SPRINTSON A, GEORGHIADES C. On the index coding problem and its relation to network coding and atroid theory[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2010, 56(7):3187 -3195.

[15] SOROUR S, VALAEE S. Adaptive network coded retransmission scheme for wireless multicast[A]. *IEEE Symposium on Information Theory*[C]. Korea, 2009.2577-2581.

作者简介 :



卢冀 (1981-), 男, 陕西西安人, 博士, 中国电科集团第 54 研究所博士后, 主要研究方向为网络编码、多媒体传输和云计算。

吴成柯 (1938-), 男, 安徽黄山人, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为图像通信、压缩编码、计算机视觉和计算机图形学。

肖嵩 (1977-), 女, 陕西西安人, 博士, 西安电子科技大学教授, 主要研究方向为网络编码和多媒体通信。

张冉 (1986-), 男, 河南郑州人, 中国电科集团第 27 研究所技术员, 主要研究方向为网络编码。