

无线网络中应用机会式网络编码的广播重传方法

卢冀, 肖嵩, 吴成柯

(西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 710071, 西安)

摘要: 为了提高无线网络中数据包的传输效率,提出了一种利用机会式网络编码的无线广播重传方法(WBR方法).该方法在基站先以最小重传次数下限为约束条件选择编码数据包,再传输采用机会式网络编码方法生成的组合重传包,在终端从收到的单个或多个组合重传包中恢复丢包.由于选择了更多的丢包编码生成组合重传包,使终端能从更少的组合重传包中恢复其丢包,从而有效地减少了广播重传次数.相比传统自动重传请求方法和基于网络编码的重传方法,WBR方法具有传输效率更高的特点.仿真结果表明,与自动重传请求方法和已有的基于网络编码方法相比,WBR方法的平均广播重传次数最少,而且相比自动重传请求方法的平均重传次数减少了55%.

关键词: 无线网络;广播;机会式网络编码;网络编码;重传

中图分类号: TN92 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)02-0068-05

A Broadcast Retransmission Method Using Opportunistic Network Coding in Wireless Networks

LU Ji, XIAO Song, WU Chengke

(The State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A novel wireless broadcast retransmission method (WBR) is proposed to improve transmission efficiency over wireless networks. The lost packets from multiple terminals are selected subject to the lower-bounds on the minimum number of retransmissions at base stations. Then the selected packets are combined to generate retransmission packets by employing the opportunistic network coding. Finally, the lost packets are retrieved at terminals from the transmitted retransmission packets. Because the number of retransmission packets is less than that of lost packets, the proposed method can improve network transmission efficiency significantly. Comparisons with the automatic repeat request (ARQ) method and the existing network coding (NC) based methods show that the improvement obtained from the WBR method is clear. The simulation results show that the average number of retransmissions of WBR method is 55% less than that of ARQ method, and the WBR method also outperforms the existing NC based methods.

Keywords: wireless network; broadcast; opportunistic network coding; network coding; retransmission

广播方法可以使多个终端同时收到基站发送的数据,是一种广泛应用于无线网络中的数据傳輸技术.然而,无线信道的多径干扰和衰落造成的丢包严

重影响了无线广播传输的效率,因此需要设计更有效的重传方法来提高无线网络中数据的广播传输效率.目前,已有的可以分为两类:自动重传请求

收稿日期:2010-06-29. 作者简介:卢冀(1981—),男,博士生;吴成柯(联系人),男,教授,博士生导师. 基金项目:国家自然科学基金资助项目(60702058,60832001);高等学校创新引智计划资助项目(B08038);中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(JY10000901008).

网络出版时间:2010-11-29

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20101129.1458.001.html>

(ARQ)重传方法^[1]和基于网络编码(Network Coding, NC)的重传方法^[2-4].

基于NC重传方法的数据传输效率明显优于ARQ方法^[5],因此如何利用NC技术设计重传次数少的传输方法是此类方法研究的关键问题.在已有的方法中:Chou等人^[2]提出了一种适用于WiMAX网络的重传方法,通过设置门限值来判断是否重传,该方法的重传效率较低;肖潇等人^[3]提出的方法按数据包发送顺序组合丢失包,但当某一终端出现连续丢包时会导致重传效率大幅降低;Fan等人^[4]提出的重传方法降低了终端解码的复杂度,但是其本质是在组合丢失包进行编码时减少了丢包组合的可能性,从而使重传次数增加.此外,文献^[2-4]方法中的丢包组合策略仅仅利用单个重传包获取丢包,而没有考虑从多个重传包中获取丢包的情况.

为了提高无线网络数据传输效率,减少丢包重传的次数,本文提出了一种新的适应于无线网络的广播重传(wireless broadcast retransmission, WBR)方法.利用终端反馈的丢包信息,WBR方法在基站以最小重传次数下限为原则选择丢失包,然后采用机会式网络编码(opportunistic network coding, ONC)^[6-11]生成组合重传包,有效地减少了重传次数,并在终端采用从多个重传包中恢复丢包的方法,提高了终端恢复丢包的效率.该方法可以应用于单跳无线网络,例如Wi-Fi、WiMAX或TD-LTE网络等.

1 基本原理

在无线网络中,WBR方法在基站中采用机会式编码(opportunistic coding, OC)^[6]选择多个数据包进行编码,再把编码生成的数据包通过无线信道广播发送给终端.假设 $X_i (1 \leq i \leq N)$ 表示一个数据包, Y 表示一个编码组合包, $X_i (1 \leq i \leq N)$ 和 Y 可以用二进制序列 $[x_{i1}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{iL}]$ 和 $[y_1, \dots, y_j, \dots, y_L]$ 表示,其中 L 表示序列的长度,则OC方法广播发送的数据包 Y 序列的某一元素 y_j 可以描述为

$$y_j = \sum_{i=1}^N \mu_i x_{ij} \bmod 2, \quad \mu_i \in \{0, 1\} \quad (1)$$

式中: μ_i 表示 X_i 的编码参数.当 $\mu_i = 1$ 时, X_i 获得参与编码的机会.

WBR方法可以有效地减少重传次数.假设基站(BS)发送数据包 X_1, X_2 和 X_3 后,终端 T_1, T_2 和 T_3 分别丢失 X_1, X_2 和 X_3 ,此时基站传输编码组合包 $Y = X_1 \oplus X_2 \oplus X_3$ ($\oplus$ 表示异或运算),那么 T_1 可

以通过 $Y \oplus (X_2 \oplus X_3) = X_1$ 恢复出 X_1 ,同理 T_2 和 T_3 可以分别恢复出 X_2 和 X_3 ,因此只需1次重传,而ARQ方法则需要分别重传 X_1, X_2 和 X_3 ,如图1所示.

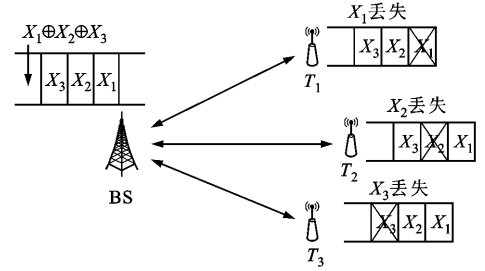


图1 WBR方法的基本原理

2 传输方法

2.1 WBR方法的设计目标

在无线网络中,基站BS广播发送数据包 $X_i (1 \leq i \leq N)$,每发送一个数据包,终端 $T_j (1 \leq j \leq M)$ 就利用ACK/NAKs同步反馈其丢包信息.当BS发送 N 个数据包后,能得到 M 个终端的丢包信息,记为 M 行 N 列的矩阵 Ω . Ω 中的第 j 行表示 T_j 的丢包信息,第 i 列表示全部终端丢失 X_i 的信息, Ω 中的元素 ω_{ji} 表示 T_j 是否接收到 X_i , $\omega_{ji} = 1$ 表示 T_j 丢失 X_i ,反之表示 T_j 成功接收 X_i .图2给出了 Ω 的一个示例.

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
T_1	1	1	0	0	1	0
T_2	1	0	1	0	1	0
T_3	1	0	0	1	1	0
T_4	0	1	1	0	1	0
T_5	0	0	1	1	1	0

图2 丢包信息示例

平均重传次数 $R^{[5]}$ 是衡量重传方法的重要指标,满足^[12]

$$R \geq \max\{S_1(\Omega), \dots, S_j(\Omega), \dots, S_M(\Omega)\} \quad (2)$$

式中: $S_j(\Omega) (1 \leq j \leq M)$ 表示 T_j 的丢包数.令 $R_0 = \max(S_1(\Omega), S_2(\Omega), \dots, S_M(\Omega))$ 表示 M 个终端丢包数的最大值,即最小重传次数的下限.文献^[12]证明了采用编码方法构造广播重传次数等于 R_0 的重传方法是NP困难问题.本文方法以 R_0 为约束条件,选择最多的丢包生成重传包以提高丢包恢复的效率,从而减少重传次数.

2.2 WBR方法的编码策略

WBR的重传数据包包括数据包和编码组合数

据包,有以下3种情况.

(1)全部终端都丢失数据包 $X_i (1 \leq i \leq N)$, 此时, X_i 为重传包, 例如图2中的 X_5 .

(2)在余下的丢包中,选择满足最小重传次数下限条件的丢包以生成编码组合数据包. 如图2中,广播 $\{X_1 \oplus X_2 \oplus X_3\}$ 和 $\{X_2 \oplus X_3 \oplus X_4\}$ 编码组合包, T_1 和 T_2 能恢复各自的2个丢包.

(3)由于某一终端的丢包被组合于多个重传包中,因此可能会出现该终端不能从重传包中恢复其丢包^[12]的情况. WBR 依次传输每个终端不能恢复的数据包直到完成整个重传过程. 以图2为例, T_4 收到上述2个重传包后,不能恢复出 X_2 和 X_3 , 因此传输 X_2 来完成重传.

WBR 方法用于无线网络的 BS 广播数据包. 首先, BS 根据终端的反馈得到丢包信息 Ω , 然后生成并传输重传包. 假设 α_1 , α_2 和 α_3 分别是上述3种生成重传包的个数, 生成和传输重传包的具体过程如下.

(1)当 $C_i = M$ 时, 重传所有终端丢失的数据包 X_i , 其中 $C_i (1 \leq i \leq N)$ 表示丢失 X_i 的终端数.

(2)当 $0 < C_i < M$ 时, 选择丢包进行编码组合. 令 $M \times \gamma_k$ 维矩阵 Θ_k 表示第 k 个重传包中的 γ_k 个数据包的信息, 其行和列分别表示 γ_k 个数据包和终端的丢包信息. Θ_k 由以下2步生成. ①生成重传包的数目以满足最小重传次数下限的约束条件, 丢包信息 Ω 对应的最小重传次数的下限为 $R_0 = \alpha_1 + \alpha_2$. WBR 在生成第 k 个重传包时, 选择一定数量的丢包使未选择丢包生成重传包时满足最小重传次数下限的限制条件, 即满足

$$S_j(\mathbf{W}_r^*) = R_0 - \alpha_1 - k \quad (3)$$

式中: $\mathbf{W}_r^*$ 表示 Ω 中未被选择的列组成的矩阵; $S_j(\mathbf{W}_r^*)$ 表示 $\mathbf{W}_r^*$ 中第 j 行的丢包数. ②若第1步生成的 Θ_k 中包括任意一个终端的2个或2个以上丢包时, 即

$$S_j(\Theta_k) \geq 2, \quad j \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (4)$$

该终端无法从 Θ_k 生成的重传包中恢复其丢包, 用 M 维列向量 $\mathbf{e}$ 且 $\mathbf{e}(j) = 1$ 表示 T_j 不能恢复的数据包, 此时将丢包 $\mathbf{e}$ 编码于其他重传包, 即当

$$S_j(\Theta_{k'}) = 0, \quad \mathbf{e}(j) = 1, \text{ 且 } k' \in \{1, 2, \dots, \alpha_2\} \quad (5)$$

成立时, 将列向量并入到 Θ_k 中, 使 T_j 可以从重传包 k' 中恢复 $\mathbf{e}$. 当得到 $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_{\alpha_2}$ 后, 依次广播传输由 $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_{\alpha_2}$ 中数据包编码得到的重传包.

(3)首先, 从第2个过程中生成的所有 $\Theta_k (1 \leq k \leq \alpha_2)$ 中搜索每个终端不能恢复的数据包, 这些数据包数为

$$\alpha_3 = \sum_{j=1}^M (\lambda_j - 1), \quad \lambda_j > 0 \quad (6)$$

式中: λ_j 表示 T_j 未恢复的数据包数. 然后, 依次传输这 α_3 个数据包完成重传.

2.3 WBR 的性能分析

2.3.1 复杂度 以数据包数 N 来衡量方法的复杂度, WBR 步骤1中计算 $C_i (1 \leq i \leq N)$ 的时间复杂度和存储中间变量的空间复杂度均为 $O(N)$, 步骤2生成一个重传包的时间复杂度为 $O(N)$, 存储 $\mathbf{e}$ 等中间变量所需的空间复杂度为 $O(1)$, 因此该步骤生成全部重传包的时间复杂度和空间复杂度分别是 $O(N^2)$ 和 $O(N)$, 步骤3判断终端不能恢复数据包的时间复杂度为 $O(N^2)$, 因此 WBR 方法总的时间复杂度和空间复杂度分别为 $O(N^2)$ 和 $O(N)$.

2.3.2 重传次数 WBR 的重传次数为

$$R^* = R_0 + \alpha_3 \quad (7)$$

当 $\alpha_3 = 0$ 时, WBR 的重传次数可以达到多播最小重传次数的下限.

WBR 重传 R^* 个数据包后, 所有终端可以恢复丢包. 丢包分2种情况: ① $C_i (1 \leq i \leq N) = M$ 时, 终端恢复 X_i 需要一次重传, 此时共需 α_1 次重传; ② $0 < C_i < M$ 时, 当 $\alpha_3 = 0$, 若 $S_j(\Theta_k) = 0$, 则 $P(\Theta_k)$ 没有包含 T_j 的丢包; 若 $S_j(\Theta_k) = 1$, T_j 可恢复出该丢包; 若 $S_j(\Theta_k) \geq 2$ 时, T_j 先从其他 $S_j(\Theta_k) - 1$ 个重传包中解出 $S_j(\Theta_k) - 1$ 个丢包, 再解码出 Θ_k 中的丢包. 因此 $\alpha_3 = 0$ 时, d_2 次重传可使终端恢复全部丢包, 式(7)成立. 同理可得 $\alpha_3 \neq 0$ 时, 命题成立.

3 仿真结果

仿真实验采用如图1所示的多播网络, 数据包的长度相同. 经多次对 Ω 相同的丢包进行重传后, 实验得出了不同方法的平均重传次数 R . R 越小, 方法的性能越好. 为了验证本文方法的有效性和可行性, 用随机丢包模型和连续丢包模型^[5]生成终端的丢包, 模型中采用参数为 P 的贝努利实验判断一个数据包是否丢失, 其中 P 为丢包率.

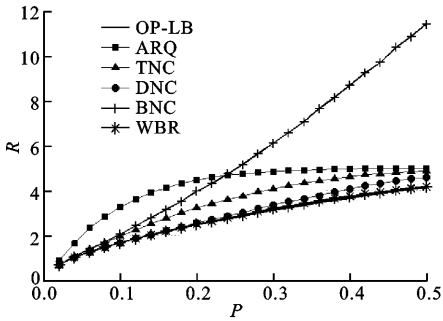
比较了 ARQ、文献[2]方法(TNC)、文献[3]方法(BNC)、文献[14]方法(DNC)以及本文 WBR 方法的复杂度, 结果如表1所示.

比较了5种方法的平均重传次数(最小重传次数的下限记为 OP-LB), 结果如图3所示. 其中丢包

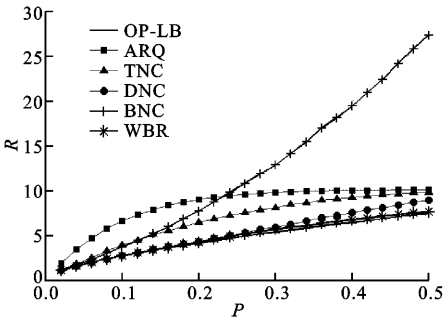
表 1 几种方法的时间和空间复杂度比较

分类	复杂度				
	ARQ	TNC	BNC	DNC	WBR
时间	$O(N)$	$O(N)$	$O(N^2)$	$O(N^2)$	$O(N^2)$
空间	$O(1)$	$O(N)$	$O(N)$	$O(N)$	$O(N)$

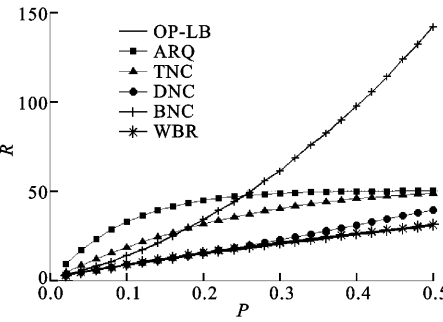
率 P 的变化范围是 $[0.02, 0.5]$, 步长为 0.02, 数据包数 $N=\{5, 10, 50\}$, 终端数 $M=10, T_j (1\leq j\leq M)$ 的丢包率 $P_j=P$. 从图 3 可以看出:随着丢包率的增加,本文提出的 WBR 方法较其他方法的性能更好,在一定丢包率的条件下,丢包数随 N 值增大而增加;WBR 选择丢包的编码策略较好,生成的重传包



(a) $N=5$



(b) $N=10$



(c) $N=50$

图 3 随机丢包模型下平均重传次数比较

数较少,因此其平均重传次数 R 最小,而 ARQ 方法不对数据包进行编码,其 R 最大. 本文方法的平均重传次数是 ARQ 方法的 45%.

为了比较当信道发生连续丢包时方法的性能,用二状态马尔可夫过程来描述无线信道的丢包状况. S_g, S_b 表示系统的好状态和差状态, P_{gb} 和 P_{bg} 分别表示 S_g 到 S_b 的转移概率和 S_b 到 S_g 的转移概率. 实验中, P_{gb} 的变化范围是 $[0, 0.5]$, 步长为 0.02, P_{bg} 为固定值 0.4, S_g 和 S_b 对应的丢包率分别为 0.02 和 0.5. 图 4 给出了 $N=10, M=5$ 时几种方法的性能比较:连续丢包时 WBR 选择丢包进行组合的策略优于其他方法,当 P_{gb} 增加而 P_{bg} 保持不变时,本文方法组合的丢包更多,其平均重传次数相对于其他方法更少.

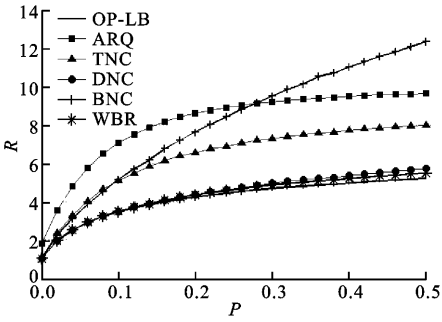


图 4 连续丢包模型下平均重传次数比较

当无线信道随机或连续丢包时,本文方法可以有效地减少无线广播重传次数,并使平均重传次数逼近最小重传次数的下限,因此该方法可以应用于实际的无线多播网络,减少无线信道重传丢包的次数,提高无线广播网络数据包的传输性能.

4 结束语

本文提出了一种适用于无线网络的广播重传方法——WBR. 该方法以最小重传次数下限为约束条件选择丢包,并采用机会式网络编码生成重传包. 理论分析了 WBR 的可行性和有效性. 仿真实验表明, WBR 方法在不同信道条件下都可以有效地减少广播重传的次,适用于单跳无线网络,例如 Wi-Fi、WiMAX 或 TD-LTE 网络.

参考文献:

[1] CHANDRAN S R, LIN Shu. Selective-repeat-ARQ schemes for broadcast links [J]. IEEE Trans on Communication, 1992, 40(1):12-19.
[2] CHOU Chingchou, WEI Hungyu. Network coding based data distribution in WiMAX [C]// Proceedings

- of the 10th IEEE International Conference on Mobile Data Management: Systems, Services and Middleware, Piscataway, NJ, USA; IEEE Press, 2009;393-394.
- [3] 肖潇,王伟平,杨路明,等. 基于网络编码的无线网络广播重传方法 [J]. 通信学报,2009, 30(9):69-75.
XIAO Xiao, WANG Weiping, YANG Luming, et al. Wireless broadcasting retransmission approach based on network coding [J]. Journal on Communications, 2009, 30(9):69-75.
- [4] FAN Pingyi, CHEN Zhi, CHEN Wei, et al. Reliable relay assisted wireless multicast using network coding [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(5):749-762.
- [5] NGUYEN D, TRAN T, NGUYEN T, et al. Wireless broadcast using network coding [J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2009, 58(2):914-925.
- [6] KATTI S, RAHUL H S, HU Wenjun, et al. XORs in the air: practical wireless network coding [C]//Proceedings of the ACM Conference of the Special Interest Group on Data Communication. New York, USA; ACM Press, 2006;243-254.
- [7] KATTI S, RAHUL H S, HU Wenjun, et al. XORs in the air: practical wireless network coding [J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2008, 16(3):497-510.
- [8] LE Jilin, LUI C S J, CHIU Dah-ming. DCAR: distributed coding-aware routing in wireless networks [J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2010, 9(4):596-608.
- [9] YOMO H, POPOVSKO P. Opportunistic scheduling for wireless network coding [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, Piscataway, NJ, USA; IEEE Press, 2007;5610-5615.
- [10] CUI Tao, CHEN Lijun, HO T. Energy efficient opportunistic network coding for wireless networks [C]//Proceedings of the 30th IEEE International Conference on Computer Communications. Piscataway, NJ, USA; IEEE Press, 2008;361-365.
- [11] KIM Y, VECIANA G D. Is rate adaptation beneficial for inter-Session network coding? [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(5):635-646.
- [12] YOSSEF Z B, BIRK Y, JAYRAM T S, et al. Index coding with side information [C]//Proceedings of the 47th IEEE Symposium on Foundations of Computer Science. Piscataway, NJ, USA; IEEE Press, 2006;197-206.

(编辑 刘杨)