

应用于CDMA Ad hoc网络的TRBC协议:性能分析

王春江 刘元安 高锦春
(北京邮电大学无线通信中心 北京 100876)

摘要 该文分析了应用于CDMA Ad hoc网络的TRBC(Transmitter and Receiver Based Coding)协议,其性能同传统的TBC(Transmitter Based Coding)和RBC(Receiver Based Coding)协议进行了比较。数值结果分析表明,由于TRBC协议采用两级编解码,在带宽充足或用户数量较小的环境下,其性能高于RBC协议,低于TBC协议。但是其系统复杂度也高于RBC协议,低于TBC协议。因此,TRBC协议作为性能与系统复杂度的一种权衡,对于设计可行的CDMA Ad hoc网络,具有重要意义。

关键词 CDMA Ad hoc网络, TRBC协议, 性能分析

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)02-0295-04

TRBC Protocol Adopted in CDMA Ad hoc Networks: Performance Analysis

Wang Chun-jiang Liu Yuan-an Gao Jin-chun

(Center for Wireless Communication, Beijing Univ. of Posts and Telecommunications Beijing 100876, China)

Abstract The TRBC (Transmitter and Receiver Based Coding) protocol adopted in CDMA Ad hoc networks is analyzed in this paper, its performance is compared with the traditional TBC (Transmitter Based Coding) and RBC (Receiver Based Coding) protocols. The analysis of numerical results indicates that the performance of TRBC protocol using two levels of encoding and decoding is better than that of RBC protocol, and worse than that of TBC protocol under the environments with enough bandwidth or a small quantity of users. However, its system complexity is also more than that of RBC protocol, and less than that of TBC protocol. Therefore, as a trade-off between performance and system complexity, the TRBC protocol has great significance for the designing of a practical CDMA Ad hoc networks.

Key words CDMA Ad hoc networks, TRBC protocol, Performance analysis

1 引言

Ad hoc网络是一种灵活的组网技术,不需要任何中心控制设备就可以部署局部的无线网络。由于其简单及快捷的部署能力,在军事、救援及商业上取得了广泛的应用。传统Ad hoc网络普遍采用载波监听多址接入(CSMA)协议共享无线资源,CSMA协议应用简单,在轻负载环境下,由于数据包冲突较小,因此具有较高的性能。但是在重负载环境下,数据包冲突快速增加,CSMA协议为了避免冲突,要求在发送节点两跳的范围内的邻节点不能发送或接收数据。因此节点发送干扰范围大于其实际的传输范围,在一定程度上浪费了无线资源。随着Ad hoc网络的不断发展,具有更高无线

资源利用效率的接入协议逐渐成为研究的热点。而CDMA技术通过扩频序列区分用户,可以有效地抑制干扰信号,从而降低用户的干扰范围,有助于提高了无线资源利用效率,因此应用CDMA技术的Ad hoc网络(简称CDMA Ad hoc网络)正在成为可行的高效的无线网络技术。另外,在CDMA Ad hoc网络中,由于多个数据包可以同时传输,因此其性能远高于基于CSMA协议的Ad hoc网络。

CDMA Ad hoc网络在近20年受到极大的关注,在网络传输范围的优化,多址接入,路由及功率控制策略等方向取得了大量的研究成果^[1-6](分组无线网络是20世纪70-80年代Ad hoc网络的名称),其中多址接入协议是本文研究的重点。应用于CDMA Ad hoc网络的多址接入协议主要分为3类:基于发送节点扩频的TBC(Transmitter Based Coding)协议,基于接收节点扩频的RBC(Receiver Based Coding)协议和

2004-07-02收到,2005-04-08改回

国家863计划(2003AA12331004),欧盟IST-FP6 DAIDALOS项目和NTT DoCoMo公司与北京邮电大学合作项目资助课题

同时采用发送和接收扩频方式的TRBC (Transmitter and Receiver Based Coding)协议^[7]。3种协议都基于时隙ALOHA协议,即在当前时隙内到达的数据包以概率 p 在下一个时隙开始时刻发送,节点之间相互独立。其主要区别是对发送数据的编码方式:假设每个节点分配一个唯一的扩频序列,TRBC协议采用发送节点的扩频序列对数据编码;RBC协议用接收节点的扩频序列对数据编码;而TRBC协议首先用发送节点的扩频序列对数据编码,然后用接收节点的扩频序列对编码后的数据再一次编码。作者在文献[8]中分析了TBC和RBC协议的性能,并且给出了协议性能的简化表达式。但是,到目前为止,文献中还没有对TRBC协议的性能分析。因此,本文对TRBC协议的性能分析,对于更深入地理解TRBC协议及CDMA Ad hoc网络的性能具有重要意义。

本文后续章节安排如下:第2节简要描述TRBC协议,第3节理论分析了TRBC协议的性能,数值结果在第4节中分析,第5节对全文作了总结。

2 TRBC 协议

首先,本文简要描述TRBC协议:系统时间划分为时隙,数据包在时隙开始时刻发送,时隙长度稍大于传输一个数据包所用时间,保证数据包和必要的控制信息的可靠传输。节点工作于半双工模式,即不能同时接收和发送数据。节点的状态分别定义为活动状态和空闲状态,在时隙开始时刻,如果节点有数据包需要发送,则此节点称为活动节点,反之为空闲节点。数据发送模型采用DFT(Defer First Transmission)模型,即在当前时隙到达的数据包在下一个时隙开始时刻以概率 p 发送;如果目的节点成功接收到数据包,则发送反馈控制包ACK;反之,则不发送ACK;源节点收到ACK,则发送结束;如果,源节点没有收到ACK,则在队列顶端缓存此数据包,在下一个时隙重传。

TRBC协议的发送和接收过程都需要两级完成:假设为每个节点已经分配一个唯一的扩频序列,节点用此序列作为发送扩频序列,每个节点随机选择一个节点作为目的节点,并且用目的节点的序列作为接收扩频序列。定义数据包长度为 L_c ,首先用长度为 N_2 发送扩频序列对数据包进行第一级编码,然后对第一级编码的输出数据,用长度为 N_1 的接收扩频序列进行第二级编码,此时待编码数据长度实际是 $L_c \times N_2$,最后发送数据。在目的节点,第一级检测器通过接收扩频序列(分配给目的节点的扩频序列)检测数据,第一级解码输出的数据是多个来自不同节点的长度为 $L_c \times N_2$ 的数据的叠加结果,在第二级检测器中,这些数据进一步通过发送扩频序列(分配给源节点的扩频序列)分别检测。出于公平性的考虑,3

种协议使用相同的带宽进行通信,因此在TBC和RBC协议中采用的扩频码长度为 $N = N_1 \times N_2$ 。

2 性能分析

在TRBC协议中,数据包被成功接收需要满足以下条件:

(1)由于节点工作方式半双工,只有当目的节点空闲时,数据包才能被成功接收;(2)由于网络中同时有多个数据包被传输,这些数据包相互干扰。因此,在多址干扰下,成功检测数据包中所有比特,才能表示数据包成功接收。本文假设以上条件视为相互独立的随机事件,成功接收概率也视为相互独立随机变量的联合概率。那么,当有 n 个活动节点发送数据,数据包被成功接收的概率为

$$P_s(n) = P\{\text{目的节点空闲}\} P\{\text{数据包成功接收的概率}\} \\ = \left(\frac{M-n}{M-1} \right) \left[\sum_{l=0}^{n-1} \binom{n-1}{l} \cdot P_o^l(n) \cdot (1-P_o(n))^{n-l-1} (1-P_{b1}(l+1))^{L_c \times N_2} \right. \\ \left. \times \sum_{s=0}^{n-l-1} \binom{n-1}{s} \cdot \left(\frac{1}{M-1} \right)^s \cdot \left(1 - \frac{1}{M-1} \right)^{n-s-1} (1-P_{b2}(s+1))^{L_c} \right] \quad (1)$$

其中 L_c 是数据包长度, $(M-n)/(M-1)$ 表示目的节点为空闲节点的概率, P_{b1} 和 P_{b2} 分别表示第一级和第二级检测的比特误码率,由文献[9]可知,在标准高斯白噪声的假设下,误码率由扩频增益 N 与干扰信号数量 n 决定,所以 P_{b1} 和 P_{b2} 分别表示为

$$P_{b1}(l+1) = Q\left(\sqrt{\frac{3N_1}{l}}\right), \quad P_{b2}(s+1) = Q\left(\sqrt{\frac{3N_2}{s}}\right) \quad (2)$$

其中 $Q(x) = (1/\sqrt{2\pi}) \cdot \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$ 。式(2)引用的比特误码率公式是在理想假设条件下的分析结果,在实际应用中,需要进一步分析非理想功率控制及多径衰落信道等因素的影响。 $P_o(n)$ 为任何一个目的节点至少被一个源节点选中的概率,表示为

$$p_o(n) = 1 - \frac{M-n}{M-1} \left(1 - \frac{1}{M-1} \right)^{n-1} - \frac{n-1}{M-1} \left(1 - \frac{1}{M-1} \right)^{n-2} \quad (3)$$

本节的后续部分将详细解释式(1)。由上文分析可知,数据的检测分两级进行,因此成功传输概率也分两步计算。

首先,为了计算第一级检测的成功概率,由式(2)可知,需要确定网络中干扰信号的数量。从上文对TRBC协议的定义可知,第一级检测的数据是发送节点第二级编码的数据。那么,第一级检测所受的干扰信号数量,应该等于所有第二级发送编码使用的互不相同的扩频序列的数量。进一步分析,由于任何一个被选中目的节点将占用一个扩频序列,也就是说,对于第一级检测,干扰信号的数量由被选中的目的节点数量决定。对于被多个源节点选中的目的节点,其产生

的干扰信号也可以认为只有一个,因为这些源节点使用的是相同的接收扩频序列。因此,网络中被选中的目的节点数量决定第一级检测所受的干扰节点数量,定义任何一个目的节点至少被一个源节点选中的概率为 $P_o(n)$,如式(3)所示。其中,如果目的节点是空闲节点(概率为 $(M-n)/(M-1)$),其没有被选中的条件是其它 $n-1$ 个源节点都没有选中这个目的节点(概率为 $(1-1/(M-1))^{n-1}$);否则,条件为其它 $n-2$ 个源节点都没有选中这个目的节点(概率为 $(1-1/(M-1))^{n-2}$)。

因此,对于某一指定的目的节点,除了其自身外,还有 l 个目的节点被占用的概率服从二项式分布。由上文分析可知,第二级编码的输入数据长度实际是 $L_c \times N_2$,对于第一级检测来说,如果由 l 个干扰节点,其成功接收数据包的概率为 $(1-P_{b1}(l+1))^{L_c \times N_2}$ 。

其次,为了计算第二级检测的成功概率,需要确定发送向同一个目的节点的数据包的数量,这些数据包将互为干扰信号。由于所有源节点以相同的概率 $1/(M-1)$ 随机选择目的节点,因此对于指定的源节点,其选择的目的节点收到 s 个来自其它节点的数据包的概率同样服从二项式分布。因此,对于第二级检测来说,如果有 s 个干扰数据,其成功接收数据包的概率为 $(1-P_{b2}(s+1))^{L_c}$ 。另外,由第一级检测的分析可知,如果除了指定的目的节点外还有 l 个其它节点被占用,这 l 个节点将至少被一个源节点选中。因此 s 最大不能超过 $n-l-1$,如式(1)所示。

网络吞吐量的定义为在一个时隙内平均成功传输的数据包数量。在已知传输成功概率 $P_s(n)$ 和活动节点数量 n 情况下,网络平均吞吐量表示为

$$\beta(p) = \sum_{n=1}^M \binom{M}{n} p^n (1-p)^{M-n} k \cdot n \cdot P_s(n) \quad (4)$$

4 结果分析

根据上文的理论分析,图1比较了TRBC, TBC和RBC协议的性能。其中,节点数量定义为16,扩频序列长度分别为: $N=256$, $N_1=16$ 和 $N_2=16$,数据包长度 $L_c=1000$ 。当网络负载较小(p 较小),TRBC协议的性能高于RBC协议,但低于TBC协议,介于两种协议之间。显然,由上文对TRBC协议的分析可知,协议通过两次编码后才发送数据,目的节点可以通过发送数据的第二级编码过滤掉部分干扰信号,即通过目的节点的扩频序列检测数据,那么发送给其它节点的数据将被过滤掉,从而减小了第二级检测的干扰信号数量,提高数据包成功接收概率。但是,当网络负载较大(p 大于0.55),TRBC协议的性能低于TBC和RBC协议。由于TRBC检测数据包的扩频增益只有TBC和RBC协议的1/16(本文定

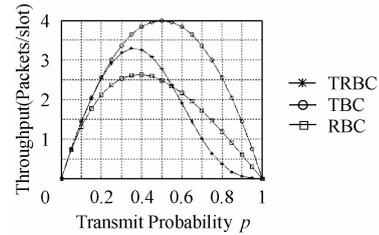


图1 TRBC, TBC和RBC性能比较(吞吐量-发送概率)

$$(N_1=16, N_2=16, M=16, L_c=1000)$$

义),因此当网络负载较大时,活动节点的数量增加,干扰信号的数量接近于扩频序列的长度,第一级检测的误码率快速增加,虽然第二级检测的误码率下降,但是两级综合的误码率仍然上升,从而最终降低了吞吐量性能。

图2分析了不同扩频序列长度对TRBC协议性能的影响,当 N_1 增加即 N_2 减小,TRBC协议的性能增加。由于 N_1 增加可以降低目的节点的第二步检测的误码率,在保证第一级检测的成功概率的前提下,最终可以提高协议的吞吐量性能。但是当 N_1 继续增加到64,即 N_2 减小到4时,TRBC协议的性能反而下降。说明 N_1 增加带来的扩频增益不足以弥补 N_2 减小带来的性能损失,从而最终降低了吞吐量性能。

以上数值结果说明:TRBC协议适合应用于带宽充足或节点数量相对较小的环境,否则其综合性能不如简单的RBC协议。相对于TBC协议,在一定程度上,TRBC协议可以降低系统实现的复杂度。通过基于接收扩频序列的第一级检测器,TRBC协议过滤掉一部分干扰用户,从而减少了影响第二级检测器的干扰信号数量。实际上,如果用户数量较多,影响第二级检测器的干扰信号数量远小于系统中发送信号的总数,即同时选中某一个目的节点的源节点数量远小于实际源节点数量。基于以上分析,在TRBC协议中,第二级检测器的实现复杂度将小于TBC协议中采用的检测器。虽然TRBC协议采用了两级检测器,但是其第一级检测器只需要处理一次解扩处理,即只需要用目的节点自己的扩频序列进行解码处理,因此,其复杂度远低于TBC协议采用的检测器。另外,就采用的检测器的复杂度来说,TRBC协议要高于RBC协议。综上所述,TRBC协议增加了一定的系统复杂度,提高了系统性能。

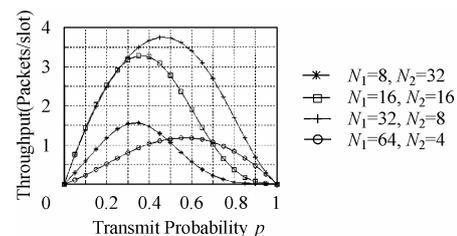


图2 扩频序列长度对TRBC性能的影响(吞吐量-发送概率)

$$(M=16, L_c=1000)$$

5 结束语

该文分析了基于 TRBC 协议的 CDMA Ad hoc 网络性能, 并且同 TBC 和 RBC 协议进行了比较。数值结果说明 TRBC 协议适合应用于带宽充足或节点数量相对较小的环境。合理地分配两级扩频序列的长度是实现高吞吐量性能的关键, 一般情况下, TRBC 协议的性能介于 TBC 和 RBC 协议之间, 但是当任何一级扩频序列过短时, 其性能将低于 TBC 和 RBC 协议。

参 考 文 献

- [1] Sousa E, Silvester J. Optimum transmission ranges in a direct-sequence spread-spectrum multihop packet radio network. *IEEE J. on SAC*, 1990, 8(6): 762 – 771.
- [2] Zorzi M, Pupolin S. Optimum transmission ranges in multihop packet radio networks in the presence of fading. *IEEE Trans. on Commun.*, 1995, 43 (7): 2201 – 2205.
- [3] Sanada Y, Nakagawa M. Power control techniques in a multihop CDMA packet radio network. *IEICE Trans. on Commun.*, 1996, 79 (9): 1287 – 1294.
- [4] Wang C J, Liu Y A. Performance analysis of routing strategy MFR in Ad hoc DS-CDMA network. *IEEE ICCT 2003*, Beijing, 2003, 2: 1274 – 1277.
- [5] Subbarao M W, Hughes B L. Optimum transmission ranges and code rates for frequency-hop packet radio networks. *IEEE Trans. on Commun.*, 2000, 48(4): 670 – 678.
- [6] Subbarao M W, Hughes B L. Optimizing information efficiency in a direct-sequence mobile packet radio network. *IEEE Trans. on Commun.*, 2003, 51(1): 22 – 24.
- [7] Lin D D, Lim T J. Subspace-based active user identification for a collision-free slotted Ad hoc network. *IEEE Trans. on Commun.*, 2004, 52 (4): 612 – 621.
- [8] 王春江, 耿方萍, 刘元安等. 一种应用于Ad hoc无线局域网的随机接入协议. *电子学报*, 2005, 33(1): 26 – 31.
- [9] Morrow R K Jr., Lehnert J S. Bit-to-bit error dependence in slotted DS/SSMA packet systems with random signature sequences. *IEEE Trans. on Commun.*, 1989, 37 (10): 1052 – 1061.

王春江: 男, 1975年生, 讲师, 博士生, 研究方向为无线接入技术、无线局域网、Ad hoc网络接入与路由技术研究等。

刘元安: 男, 1963年生, 博士, 教授, 博士生导师. 中国电子学会和中国通信学会高级会员, 中国通信学会无线和移动通信委员会成员. 在国内外学术刊物发表研究论文70余篇, 出版专著4本, 获得国防科技进步一等奖1项、二等奖1项及其它荣誉称号多项. 申请日本发明专利3项, 中国发明专利5项. 研究兴趣为信息安全、移动通信等相关领域的理论和技术研究。

高锦春: 女, 1962年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为无线通信技术、电磁场与微波技术。