

移动自组织网络中的多信道 MAC 调度码的设计与分析

李西洋^{1,2}, 范平志¹

(1. 西南交通大学 移动通信研究所, 四川 成都 610031; 2. 广西师范学院 数学科学学院, 广西 南宁 530023)

摘要: 基于有限域上多项式, 设计了一类用于支持多类业务移动自组织网络的多信道拓扑透明 MAC 调度码。推导了这类调度码的最小码长, 同时与一类单信道拓扑透明 MAC 调度码的码长进行对比。研究表明, 当信道数为 H 时, 这类多信道拓扑透明 MAC 调度码的码长约为单信道拓扑透明 MAC 调度码码长的 $1/H$, 因此能够利用多信道资源有效地减小码长。另外, 在相同的网络参数情形下, 这类多信道拓扑透明 MAC 调度码在码长以及最小保证吞吐量等方面优于扩展的 TDMA 固定分配方案。

关键词: 自组织网络; 多信道; 拓扑透明; 服务质量; 吞吐量

中图分类号: TN915.04

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)05-0057-08

Design and analysis of multi-channel MAC scheduling code for mobile ad hoc network

LI Xi-yang^{1,2}, FAN Ping-zhi¹

(1. Institute of Mobile Communications, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. School of Mathematical Sciences, Guangxi Teachers Education University, Nanning 530023, China)

Abstract: A multi-channel topology-transparent MAC scheduling code was proposed for mobile ad hoc network supporting multi-classes of users via polynomials over finite field. The code length was derived and compared with the single-channel topology-transparent MAC scheduling code. It is shown that when the number of channel is H , the code length of the proposed multi-channel topology-transparent MAC scheduling code is approximately H times smaller than the code length of single-channel topology-transparent MAC scheduling code. Thus the proposed code can reduce the code length by using multi-channels resources. Moreover, under the same network parameters, the proposed multi-channel topology-transparent MAC scheduling codes have better performance than the extended TDMA fixed assignment scheme in terms of code length, minimum guaranteed throughput, and so on.

Key words: ad hoc network; multi-channel; topology-transparent; quality of services; throughput

1 引言

移动自组织网络 (MANET, mobile ad hoc network) 具有组网灵活、设备价格低廉等特点, 因而在军事通信、灾后救援、车载通信等众多领域具有广泛的应用价值。然而, 由于无线信道的广播特性, 移动自组织网络中节点之间的信号容易产生碰撞。

为了使网络节点有效利用无线信道资源, 一般通过媒质接入控制 (MAC, media access control) 协议来协调节点接入无线信道的的时间。无线网络的 MAC 协议可以分为 2 种类型: 1) 竞争型 MAC 协议; 2) 调度型 MAC 协议^[1,2], 例如, 基于 IEEE 802.11 的载波侦听多址 (CSMA, carrier sensing multiple access) 协议是竞争型 MAC 协议, 而基于时分多址 (TDMA,

收稿日期: 2013-01-09; 修回日期: 2013-08-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61032002); 教育部科技重大基金资助项目(311031); 四川省科技创新团队基金资助项目(2011JTD0007/SWJTU12ZT02)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61032002); The Foundation for Key Program of Ministry of Education(311031); The Science and Technology Innovative Research Team Foundation of Sichuan Province (2011JTD0007/SWJTU12ZT02)

time division multiple access)的 MAC 协议则属于调度型 MAC 协议类型。由于调度型 MAC 协议利用确定的算法让节点接入信道,可以有效地避免用户之间的信号碰撞,从而有利于保证用户的服务质量(QoS, quality of service)。本文中,主要关注移动自组织网络中基于时分多址的调度机制 MAC 协议设计问题。在这种 MAC 协议设计中,信道被分成等长的帧,一帧由若干时隙组成,各个节点依据确定的 MAC 调度算法接入信道。传统的 TDMA 固定分配方案是给各个节点预先分配一个确定时隙,在这个时隙中只有该节点可以传输数据。在具有大量节点的多跳网络中,传统 TDMA 方案的帧长快速增长,从而降低了信道利用率。

为了提高信道利用率,改善系统性能,人们对 MAC 调度算法展开了大量研究,其中,文献[3]设计了一种拓扑透明(topology-transparent)MAC 调度算法——PRS(proper robust scheduling),这种调度算法不易受到网络拓扑结构变化的影响,并能够为节点提供有保证的服务质量,因此适用于拓扑结构快速变化的移动自组织网络,如车载移动自组织网络。拓扑透明 MAC 调度算法的主要设计思想可以理解成给网络中每个节点分配具有某种汉明互相关的二元 $\{0, 1\}$ 码字,从而减小节点之间的信号碰撞;节点依据码字中的 1 确定每帧中发送数据的时隙,码长即为帧长,即一帧包含的时隙数目。因此,拓扑透明 MAC 调度算法也被称为拓扑透明 MAC 调度码^[2]。目前,大部分文献中拓扑透明 MAC 调度码的设计方案只针对一个业务类型^[3-6]。随着越来越多的应用场景要求移动自组织网络能够支持多媒体业务,支持多类业务的拓扑透明 MAC 调度码的设计问题受到了学术界的关注。例如,文献[7]基于有限域子域等数学结构,提出了一类支持多类业务的拓扑透明 MAC 调度算法。文献[8]利用变重量光正交码,设计了一类支持多类业务的拓扑透明 MAC 调度码,并分析了调度码的性能。文献[9]基于集合划分与有限域上多项式,提出了支持多类业务的拓扑透明 MAC 调度码,并使得码长最优化。然而,以上这些支持多类业务拓扑透明 MAC 调度码的设计都是针对单信道情形。由于多信道通信系统具有可靠性高、容易提高网络吞吐量等诸多优点^[1],近年来成为了研究的热点之一^[5,10]。例如,文献[5]基于有限域理论,设计了多信道拓扑透明 MAC 调度算法——MCGD(multichannel galois field design),并

使得码长最优化。文献[10]基于正交拉丁方,提出了一类多信道拓扑透明 MAC 调度算法。文献[5]中的研究表明,基于多信道的调度码具有更短的码长,这意味着能够有效减少节点间的传输时延,改善系统性能。因此,支持多类业务的多信道拓扑透明 MAC 调度码的设计问题具有重要的理论价值。

本文基于文献[5,9]中的思想,将集合划分与有限域上多项式理论运用到多信道拓扑透明 MAC 调度码的设计中,提出了一类支持多类业务的多信道拓扑透明 MAC 调度码的设计方案。性能分析表明,本文提出的调度码不仅能够节点提供有保证的服务质量,而且能够利用多信道资源有效地减小码长。另外,本文提出的拓扑透明 MAC 调度码在码长以及最小保证吞吐量等方面优于扩展的 TDMA 固定分配方案。

2 基本概念和数学引理

本节首先介绍网络模型以及编码理论中的一些基本知识,读者可以通过文献[4,8~10]及其参考文献详细了解这些知识。假设无向图 $G = (\bigcup_{i=1}^M V_i, E)$ 表示一个包含 M 个业务类型的无线多媒体自组织网络,每个节点属于一个特定的业务类型,其中,点集 V_i 是第 i 类无线节点的集合,且 $|V_i| = N_i, 1 \leq i \leq M$,边集 E 是无线链路的集合。如果 $i > j$,则称第 i 类节点的优先级高于第 j 类节点的优先级。假设网络必须为高优先级节点分配更大的保证成功传输带宽,并且假设网络是一个基于 TDMA 的多信道系统,系统中总共可利用的信道数为 H ,各个信道在时间上被划分为等长的帧,每个帧包含若干个定长的时隙,信道之间保持帧同步。每个时隙分成 2 部分,其中,第 1 部分用于传输数据分组。当接收节点接收到数据分组时,则利用第 2 部分发送一个确认消息。另外,不考虑噪声等因素对信号的干扰,只有信号之间的冲突才引起信号传输失败。假设网络中的每个无线节点配备了一个信号发送器, H 个信号接收器,在一个特定的时隙内,每个节点只能在一个信道上发送信息,但可以在多个信道上同时接收信息。每个节点不能在一个信道上同时发送和接收消息。如果节点 v_j 在节点 v_i 的传输范围之内,则称 v_j 是 v_i 的邻居节点。对于第 i 类节点,假设它的同类最大邻居节点数目为 D_i ,每个不同类型的最大邻居节点个数为 D_c ,因此,第 i 类节点的最大邻居节点总数为 $D_{\max}^{(i)} = D_i + (M - 1)D_c$ 。

在本文中， $GF(p)$ 表示包含 p 个元素的有限域，其中， p 是一个素数或者素数幂。设 $f(x) = a_0x^0 + a_1x^1 + \dots + a_nx^n$ 表示系数属于有限域 $GF(p)$ 上的多项式，若 $a_n \neq 0$ ，则称 $f(x)$ 为 n 次多项式。

设

$$A = \begin{bmatrix} a_{0,0} & a_{0,1} & \cdots & a_{0,n-1} \\ a_{1,0} & a_{1,1} & \cdots & a_{1,n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m-1,0} & a_{m-1,1} & \cdots & a_{m-1,n-1} \end{bmatrix}$$

是一个 m 行 n 列的二元 $\{0, 1\}$ 阵列 (码字)，本文利用 $w(A)$ 表示码字的汉明重量，即阵列中分量 1 的个数。对于 2 个 m 行 n 列的二元 $\{0, 1\}$ 阵列 A, B ，利用 $R(A, B)$ 表示 A 和 B 之间的汉明互相关，其大小等于 2 个阵列中对应分量同为 1 的位置个数。另外，对任意一个码字 A ， $\Delta(A)$ 表示 A 中分量 1 的下标构成的集合。本文使用二元 $\{0, 1\}$ 阵列刻画多信道 TDMA 系统中用户享有的信道资源，其中码字的行对应各个无线信道，列对应一帧中的各个时隙。具体的，如果码字 A 的分量 $a_{i,j}$ 等于 1，则表示使用码字 A 的用户在第 i 个信道的第 j 个时隙传输数据。

例 1 令

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

是 2 个 3 行 4 列的码字，则 $w(A) = 3, w(B) = 4; \Delta(A) = \{(0,0), (1,1), (1,2)\}$ ， $\Delta(B) = \{(0,0), (1,1), (2,2), (2,3)\}$ ； $R(A, B) = 2$ 。在一个移动自组织网络中，如果用户使用码字 A ，则这个用户将根据 A 中 1 的位置确定在一帧中发送数据的信道和时隙。

接下来介绍集合划分，本文利用文献[11]中的定义。设 S 为一个 n 元集合， t 为一固定的正整数。假设 $X_i (1 \leq i \leq t)$ 为 S 上的 t 个互不相交的子集，且 S 中的每个元素恰好包含在一个子集中，则称 $X_i (1 \leq i \leq t)$ 为 n 元集合 S 的一个划分，每个子集为这个划分的一个部分； $|X_i|$ 为 X_i 中元素的个数。

定义 $GF(p) \times GF(p)$ 上的子集

$$g(X) = \{(g(x_1), x_1), (g(x_2), x_2), \dots, (g(x_h), x_h)\} \quad (1)$$

其中， $X = \{x_1, x_2, \dots, x_h\} \subset GF(p)$ ， $g(x)$ 是 $GF(p)$ 上的多项式。在以上概念的基础上，下面引述文献[9]

中的定理 1 以备后用。

引理 1 设 X_1, X_2 是 $GF(p)$ 上的 2 个不交的子集； $g_1(x), g_2(x)$ 是 $GF(p)$ 上的 2 个次数不大于 k 的多项式。设 $i, j \in \{1, 2\}$ ， $r, s \in \{1, 2\}$ ，若 $(X_i, g_r(x))$ ， $(X_j, g_s(x))$ 不完全相同，则 $g_r(X_i)$ 与 $g_s(X_j)$ 最多只有 k 个公共点。特别的，如果 $i \neq j$ ，则 $g_r(X_i)$ 与 $g_s(X_j)$ 没有公共点。

例 2 假设 $g_1(x)$ 和 $g_2(x)$ 是有限域 $GF(p)$ 上的 2 个 k 次多项式， $X = \{x_1, x_2, \dots, x_s\}$ 和 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_t\}$ 是 $GF(p)$ 的 2 个非空子集，定义 2 个以 $GF(p)$ 中的元素为行标， $X \cup Y$ 中的元素为列标的 p 行 $|X \cup Y|$ 列的二元阵列 A, B ，其中，

$$\Delta(A) = \{(g_1(x_1), x_1), (g_1(x_2), x_2), \dots, (g_1(x_s), x_s)\}$$

$$\Delta(B) = \{(g_2(y_1), y_1), (g_2(y_2), y_2), \dots, (g_2(y_t), y_t)\}$$

则 $w(A) = s$ ， $w(B) = t$ ；由引理 1 可知， $R(A, B) \leq k$ 。进一步，如果 $X \cap Y = \emptyset$ ，则 A, B 是 2 个 p 行 $s+t$ 列二元阵列，且 $R(A, B) = 0$ 。

3 多信道拓扑透明 MAC 调度码的设计

在本文 MAC 调度码设计中，假设 $C = (c_1, c_2, \dots, c_M)$ 是一个长度为 M 的向量，其中，各分量为正整数，且 $c_1 = 1$ ，如果 $i > j$ ，则 $c_i > c_j$ ；假设 $N_i = N$ ， $D_i = D_c = D$ ， $1 \leq i \leq M$ [9]。多信道 TDMA 系统中的各个信道在时间上被划分为等长的帧，每帧由一些定长的时隙组成，信道之间保持帧同步。本节基于文献[5,9]的思想，将集合划分与有限域上的多项式运用到多信道拓扑透明 MAC 调度码的设计中，提出一类多信道拓扑透明 MAC 调度码的设计方案。在基于这类多信道 MAC 调度码的网络中，每个节点将依据预先分配的调度码字确定自己在每帧中传输信息的时隙，并且第 $i (1 \leq i \leq M)$ 类中每个节点在一帧内至少有 c_i 个时隙能够成功传输消息。

3.1 MAC 调度码码字的生成过程及互相关性

首先，对于一个选定的有限域 $GF(p) = \{\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{p-1}\}$ ，选定 $GF(p)$ 上 t 个互不相交的子集 $X_i (1 \leq i \leq t)$ ，且 $|X_i| = T_i$ ， $\sum_{i=1}^t |X_i| \leq p$ 。然后给 $V_i (1 \leq i \leq M)$ 中的每个节点 v 分配相同的子集 X_i 以及一个 $GF(p)$ 上次数不大于 k 的多项式 $g_r(x)$ ；节点 v 构造一个 p 行 p 列的二元阵列 A ，

其中,

$$\Delta(\mathbf{A}_r) = \{(g_r(\alpha_0), \alpha_0), (g_r(\alpha_1), \alpha_1), \dots, (g_r(\alpha_{p-1}), \alpha_{p-1})\} \quad (2)$$

接下来, 节点 $v \in V_i$ 从阵列 \mathbf{A}_r 中删去列标不属于集合 $\bigcup_{1 \leq i \leq M} X_i$ 的列, 得到一个 p 行 $\sum_{i=1}^M T_i$ 列的二元阵列, 然后填补全为 0 的行, 得到一个 $\lceil p/H \rceil H$ 行 $\sum_{i=1}^M T_i$ 列的阵列 \mathbf{A}'_r , 将 \mathbf{A}'_r 中列标不属于 X_i 的列的元素全部设为 0, 得到一个阵列 $\mathbf{A}'_{i,r}$; 接下来依次连续选取 $\mathbf{A}'_{i,r}$ 的 H 行, 串联成一个 H 行 $\lceil p/H \rceil \sum_{i=1}^M T_i$ 列的二元阵列 $\mathbf{A}_{i,r}$, 这个阵列即为第 i 类节点 v 的调度码字, 其码长为 $\lceil p/H \rceil \sum_{i=1}^M T_i$, 它由 $\lceil p/H \rceil$ 个子码字组成, 每个子码字为一个 H 行 $\sum_{i=1}^M T_i$ 列的阵列。

如上所述, $\mathbf{A}_{i,r}$ 由 $(X_i, g_r(x))$ 确定。节点 v 将依据自己的调度码字 $\mathbf{A}_{i,r}$, 在一帧中 T_i 个时隙传输信息。具体地, 如果 $\mathbf{A}_{i,r}$ 中第 a 个子码字的第 b 行 c 列的元素为 1, 则表示该节点在第 a 个子码字的第 b 个信道中第 c 个时隙传输信息; 为了表示方便, 称 (a,b,c) 为这个 1 在码字 $\mathbf{A}_{i,r}$ 中的位置, 记 $\Delta(\mathbf{A}_{i,r}) = \{(a,b,c) : \mathbf{A}_{i,r}$ 中位置为 (a,b,c) 的元素为 1 $\}$ 。

下面说明调度码字之间的互相关性。设 $\mathbf{A}_{i,s}$ 和 $\mathbf{A}_{i,r}$ 是第 i ($1 \leq i \leq M$) 类的任意 2 个调度码字, 它们分别由 $(X_i, g_r(x))$ 和 $(X_i, g_s(x))$ 确定。根据引理 1 可知, $\mathbf{A}_{i,r}$ 和 $\mathbf{A}_{i,s}$ 的互相关最多为 k , 这说明相同业务类调度码字之间的互相关最多为 k 。此外, 根据引理 1 也可以知道不同业务类调度码字之间的互相关为 0。另外, 各个调度码字的每列中最多只有一个 1, 这意味着节点在一个时隙中, 不会同时在多个信道上传输数据, 因此可用于只有一个发送器的节点。

3.2 多信道 MAC 调度码的最小码长

本节分析调度码码长 $\lceil p/H \rceil \sum_{i=1}^M T_i$ 的最小值。根据 3.1 节描述的码字生成过程和互相关性, 同时为了满足网络节点的需求, 则需要如下不等式成立

$$t \geq M \quad (3)$$

$$p^{k+1} \geq N \quad (4)$$

$$T_i - kD \geq c_i \quad (5)$$

其中, 式(3)和式(4)保证了每个业务类中各个节点能够分配一个不同调度码字, 式(5)使得第 i 类节点在一帧内至少有 c_i 个时隙传输成功。下面依据式(3)~式(5)确定使码长最小的 p 和 k 。假设 k_0 是方程

$$xMD + \sum_{i=1}^M c_i = N^{1/x+1} \quad (6)$$

的唯一正数根, 类似于文献[5]中的定理 4, 可以证明使得码长最小的 k 一定不大于 $\lceil k_0 \rceil$ 。

令 p_1 是一个不小于 $\lceil k_0 \rceil MD + \sum_{i=1}^M c_i$ 的最小的素数或者素数幂, $p_{2,k}$ 是一个不小于 $N^{1/k+1}$ 的最小的素数或者素数幂, 其中, $k = 0, 1, \dots, \lceil k_0 \rceil$ 。

综上所述, 可以得到本文多信道 MAC 调度码码长的最小值 L_{\min} 为

$$L_{\min} = \min \{ \lceil p_1 / H \rceil (\lceil k_0 \rceil MD + \sum_{i=1}^M c_i), \lceil p_{2,k} / H \rceil (kMD + \sum_{i=1}^M c_i) : k = 0, 1, \dots, \lceil k_0 \rceil \} \quad (7)$$

3.3 多信道拓扑透明 MAC 调度码的设计算法

step1 假设移动自组织网络的参数为: N, D, M, C, H 。基于这些参数, 由式(6)确定 k_0 , 进而确定 $p_1, p_{2,k}$, 其中, $k = 0, 1, \dots, \lceil k_0 \rceil$; 再由式(7)确定最小的码长 L_{\min} 以及相应的最优的 k 。

step2 当 $k = \lceil k_0 \rceil$ 时, 则 $p = p_1, T_i = \lceil k_0 \rceil D + c_i$; 否则令 $p = p_{2,k}$, 且 $T_i = kD + c_i$ 。

step3 设有限域 $GF(p) = \{\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{p-1}\}$, $g_r(x)$ 是 $GF(p)$ 上任意一个次数不大于 k 的多项式。另外构造集合 $S = \{\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{n-1}\}$ 上一个包含 M 个部分的划分 X_i ($1 \leq i \leq M$), 其中, $n = \sum_{i=1}^M T_i, |X_i| = T_i$ 。

step4 第 i 类的每个用户根据一个不完全相同的二元组 $(X_i, g_r(x))$ 生成一个码字 $\mathbf{A}_{i,r}$, 其码长为 $L_{\min} = \lceil p/H \rceil n$ 。

下面举例说明。

例 3 设 $N = 500, D = 3, M = 2, C = (1, 2), H = 5$ 。由式(6)可得 $k_0 = 1.5$, 从而由式(7)可得 $L_{\min} = 45$, 进一步可知 $k = \lceil k_0 \rceil = 1, p = 23, T_1 = 4, T_2 = 5$ 。选择集合 $S = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$ 上的一个划分, 其中, 这个划分的各个部分为 $X_1 = \{0, 1, 4, 7\}, X_2 = \{2, 3, 5, 6, 8\}$ 。现在取 $GF(23)$

上的 2 个多项式 $g_1(x) = x + 5$, $g_2(x) = 2x$ 。根据 $(X_i, g_r(x))$, $i, r \in \{1, 2\}$, 则可以生成 4 个调度码字 $A_{i,r}$, $i, r \in \{1, 2\}$, 其中,

$$\Delta(A_{1,1}) = \{(1, 0, 0), (1, 1, 1), (1, 4, 4), (2, 2, 7)\}$$

$$\Delta(A_{1,2}) = \{(0, 0, 0), (0, 2, 1), (1, 3, 4), (2, 4, 7)\}$$

$$\Delta(A_{2,1}) = \{(1, 2, 2), (1, 3, 3), (2, 0, 5), (2, 1, 6), (2, 3, 8)\}$$

$$\Delta(A_{2,2}) = \{(0, 4, 2), (1, 1, 3), (2, 0, 5), (2, 2, 6), (3, 1, 8)\}$$

对应的码字分别为

$$A_{1,1} = \begin{bmatrix} 00000000 & 10000000 & 00000000 & 00000000 & 00000000 \\ 00000000 & 01000000 & 00000000 & 00000000 & 00000000 \\ 00000000 & 00000000 & 00000010 & 00000000 & 00000000 \\ 00000000 & 00000000 & 00000000 & 00000000 & 00000000 \\ 00000000 & 00001000 & 00000000 & 00000000 & 00000000 \end{bmatrix}$$

$$A_{1,2} = \begin{bmatrix} 10000000 & 00000000 & 00000000 & 00000000 & 00000000 \\ 00000000 & 00000000 & 00000000 & 00000000 & 00000000 \\ 01000000 & 00000000 & 00000000 & 00000000 & 00000000 \\ 00000000 & 00001000 & 00000000 & 00000000 & 00000000 \\ 00000000 & 00000000 & 00000010 & 00000000 & 00000000 \end{bmatrix}$$

$$A_{2,1} = \begin{bmatrix} 00000000 & 00000000 & 00001000 & 00000000 & 00000000 \\ 00000000 & 00000000 & 00000100 & 00000000 & 00000000 \\ 00000000 & 00100000 & 00000000 & 00000000 & 00000000 \\ 00000000 & 00010000 & 00000001 & 00000000 & 00000000 \\ 00000000 & 00000000 & 00000000 & 00000000 & 00000000 \end{bmatrix}$$

$$A_{2,2} = \begin{bmatrix} 00000000 & 00000000 & 00001000 & 00000000 & 00000000 \\ 00000000 & 00010000 & 00000000 & 00000001 & 00000000 \\ 00000000 & 00000000 & 00000100 & 00000000 & 00000000 \\ 00000000 & 00000000 & 00000000 & 00000000 & 00000000 \\ 00100000 & 00000000 & 00000000 & 00000000 & 00000000 \end{bmatrix}$$

每个调度码字由 5 个长度为 9 的子码字构成, 每个子码字是一个 5 行 9 列的阵列; 此外, 各个码字的每列中最多只有一个 1, 因此可以用于只有一个发送器的节点。各类节点将依据自己的调度码字确定在一帧中传输数据的信道和时隙。由 $w(A_{1,1}) = w(A_{1,2}) = 4$, $w(A_{2,1}) = w(A_{2,2}) = 5$, 可知第一类节点可以在一帧中的 4 个时隙传输数据, 第二类节点可以在一帧中的 5 个时隙传输数据。由于 $k=1$, 因此 $A_{1,1}$ 和 $A_{1,2}$ (类似地, $A_{2,1}$ 和 $A_{2,2}$) 的汉明互相关最多为 1; 同时也容易知道不同类型调度码字间的互相关都为 0; 这些相关性保证了各类节点在一帧中可以成功传输数据的时隙数, 从而达到了提供有保证的服务质量的目的。

文献[9]基于有限域提出了一类支持多类业务的单信道拓扑透明 MAC 调度码。为了表述方

便, 下文中利用 L_{\min}^{mc} 表示本文提出的多信道 MAC 调度码的最小码长 L_{\min} , L_{\min}^{sc} 表示文献[9]中单信道 MAC 调度码的码长, 其中, L_{\min}^{mc} 由式(7)给出, 而 L_{\min}^{sc} 由文献[9]可知, 为了读者方便, 本文引述如下

$$L_{\min}^{sc} = \min \{ p_1 (\lceil k_0 \rceil MD + \sum_{i=1}^M c_i), p_{2,k} (kMD + \sum_{i=1}^M c_i) : k = 0, 1, \dots, \lfloor k_0 \rfloor \} \quad (8)$$

其中, M 也为业务类型的个数, p_1 和 $p_{2,k}$ 与式 (7) 中的取值相同。当 $M=1$ 时, 本文的多信道调度码即为文献[5]中的 MCGD。在网络参数 N, D 相同时, 文献[5]已经说明了 MCGD 的码长约为单信道拓扑透明 MAC 调度码码长的 $1/H$ 。类似地, 由式 (7) 和式 (8) 可知, 在 $M > 1$ 的情形下, 本文多信道拓扑透明 MAC 调度码的码长也约为单信道拓

扑透明 MAC 调度码码长的 $1/H$ 。因此, 如果使用本文的调度码, 可以通过增加无线信道的数目来有效地减小码长。表 1 给出了在 $M=2, C=(1, 2), H=5$ 时, 多信道与单信道 MAC 调度码的码长对比情况。

表 1 多信道 MAC 调度码码长与单信道情形的对比

N	D	L_{\min}^{sc}	L_{\min}^{mc}
500	3	207	45
500	4	253	55
500	6	345	75
1 500	4	361	76
1 500	7	697	153
1 500	12	1 107	243

4 多信道拓扑透明 MAC 调度码性能分析

本节分析基于本文多信道拓扑透明 MAC 调度码的移动自组织网络的性能, 主要考虑 2 种业务类的情形, 即 $M=2, C=(c_1, c_2)$ 的情形。同时在网络参数 N, D, M, C, H 相同的条件下, 将本文提出的多信道 MAC 调度码与一种扩展 TDMA 固定分配方案进行对比, 这里扩展 TDMA 方案是指将传统的 TDMA 固定分配方案以及文献[8]的改进 TDMA 方案中时隙分配方法推广到多信道情形, 即给第一类的每个用户分配某个信道中的 c_1 个时隙, 在一帧中只有该用户使用这个特定时隙; 而给第二类的每个用户分配一个或多个信道中的 c_2 个时隙, 并且这种分配可供只有一个发送装置的节点使用。从调度码字的角度来看, 扩展 TDMA 方案是指给各类用户分配了一个 H 行的阵列, 第一类的每个用户的阵列中只有 c_1 个 1, 其他分量都是 0, 第二类用户的码字中恰好有

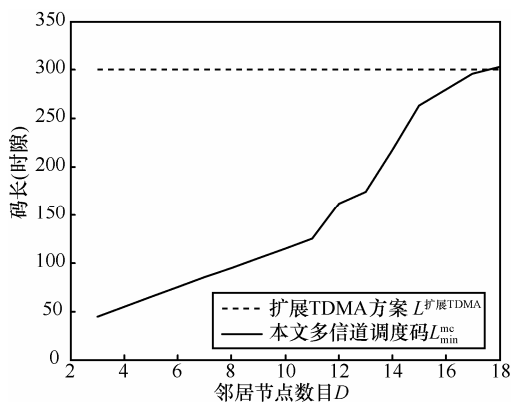
c_2 个 1, 且适用于只有一个发送器的节点。基于以上说明, 不难得到扩展 TDMA 方案码长(帧长)的一个下界为 $\left\lceil \frac{N(c_1+c_2)}{H} \right\rceil$, 下文中将用这个下界刻画扩展 TDMA 方案的码长, 为了表示方便, 将 $\left\lceil \frac{N(c_1+c_2)}{H} \right\rceil$ 简记为 $L^{\text{扩展 TDMA}}$ 。

图 1 和图 2 从 2 个角度分析本文调度码码长的变化情形, 同时将其与扩展的 TDMA 方案对比。

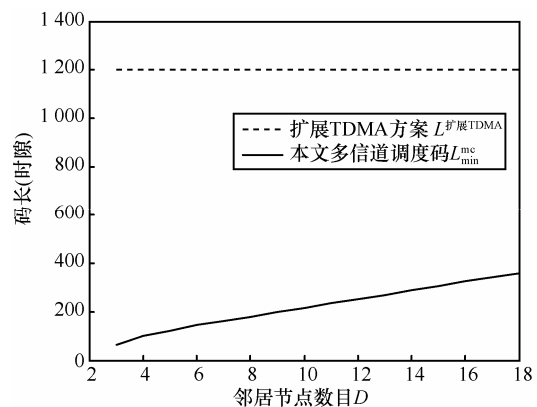
图 1 中给出了当邻居节点数 D 增加时, 调度码码长的变化情况, 其中, D 从 3 增长到 18; 图 1(a)中的网络参数为 $N=500, M=2, C=(1, 2), H=5$; 图 1(b)中的参数为 $N=1500, M=2, C=(1, 3), H=5$ 。由图 1 可知, 本文提出的调度码的码长随 D 的增加而增长, 而扩展 TDMA 方案因为其固定分配的特性, 码长保持不变。当 D 较小时, 本文提出的调度码的码长明显小于扩展 TDMA 方案的码长。

图 2 分析调度码码长随信道数目 H 增加时的变化情况, 其中, H 从 2 增长到 30。图 2(a)中的给定网络参数为 $N=500, D=3, M=2, C=(1, 2)$; 图 2(b)中的参数为 $N=1500, D=8, M=2, C=(1, 3)$ 。从图 2 中的曲线可知, 两类调度码的码长都随 H 的增加而减小。此外, 图 2 进一步说明了当 D 较小时, 本文提出的多信道 MAC 调度码的码长比扩展 TDMA 方案的码长小。

接下来, 本文分析多信道拓扑透明 MAC 调度码的各类节点的最小保证吞吐量。类似于文献[8~10], 可以定义如下多信道拓扑透明 MAC 调度码的最小保证吞吐量。

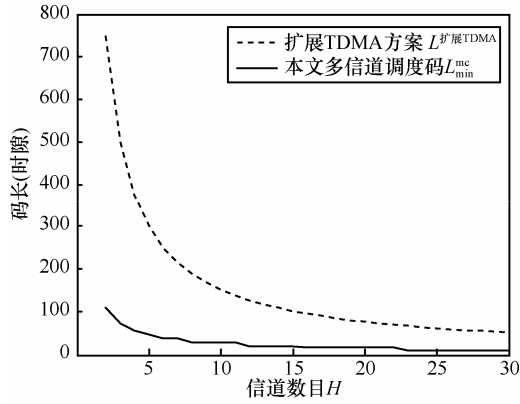


(a) $N=500, M=2, C=(1, 2), H=5$

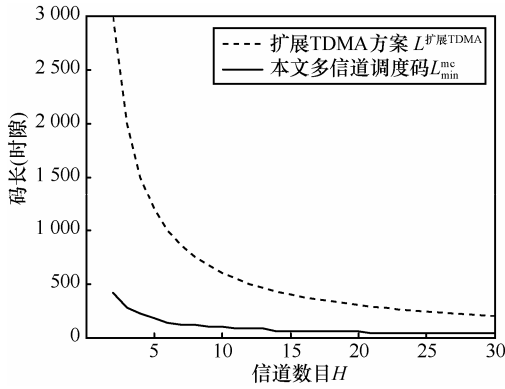


(b) $N=1500, M=2, C=(1, 3), H=5$

图 1 码长随邻居节点数 D 增加时的变化情况



(a) $N = 500, D = 3, M = 2, C = (1, 2)$



(b) $N = 1500, D = 8, M = 2, C = (1, 3)$

图 2 码长随信道数目 H 增加时的变化情况

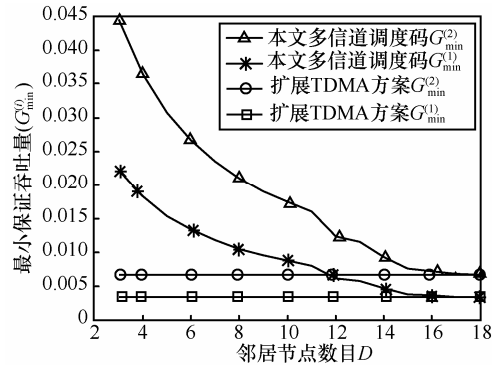
定义 1 对于一个包含 M 个业务类型的多信道移动自组织网络, 定义第 i ($1 \leq i \leq M$) 类节点的最小保证吞吐量为第 i 类节点在一帧内可以保证传输成功的时隙数 $T_{\min}^{(i)}$ 与码长 L 的比值。

$$G_{\min}^{(i)} = \frac{T_{\min}^{(i)}}{L} \quad (9)$$

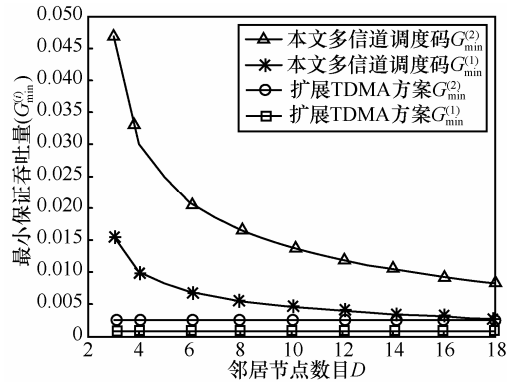
由于本文多信道拓扑透明 MAC 调度码码长为 L_{\min}^{mc} , 而且 $T_{\min}^{(i)} = c_i$, 从式 (9) 可知, 本文提出的多信道 MAC 调度码中第 i ($1 \leq i \leq M$) 类节点的最小保证吞吐量为 $G_{\min}^{(i)} = \frac{c_i}{L_{\min}^{mc}}$ 。类似地, 可知扩展 TDMA 方案中第 i ($1 \leq i \leq M$) 类节点的最小保证吞吐量为 $G_{\min}^{(i)} = \frac{c_i}{L_{\text{扩展TDMA}}}$ 。

图 3 分析了当邻居节点数 D 从 3 增加到 18 时, 2 类调度码的各类节点最小保证吞吐量的变化情况。图 3(a) 中的网络参数为 $N = 500, M = 2, C = (1, 2), H = 5$; 图 3(b) 中的网络参数为 $N = 1500, M = 2, C = (1, 3), H = 5$ 。从图 3 可以发现, 在 2 类调度码中, 第二类节点的吞吐量大于第一类节点的吞吐量。当 D

逐渐增加时, 本文调度码的每类节点的吞吐量都逐步下降, 这是因为当节点的邻居节点数增加时, 节点发送消息时遇到的碰撞越多, 为了提供保证的吞吐量, 则码长相应增加, 从而使得吞吐量下降; 同时扩展 TDMA 方案中各类节点的吞吐量保持不变, 这是因为其码长在 D 变化时保持不变。另外, 在网络参数 N, M, C, H 相同的条件下, 当 D 较小时, 本文提出的多信道 MAC 调度码的各类节点的吞吐量明显大于扩展 TDMA 方案的相应类型的吞吐量。



(a) $N = 500, M = 2, C = (1, 2), H = 5$



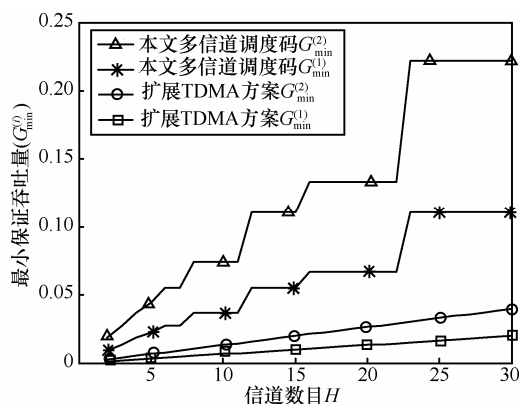
(b) $N = 1500, M = 2, C = (1, 3), H = 5$

图 3 节点的吞吐量随邻居节点数 D 增加时的变化情况

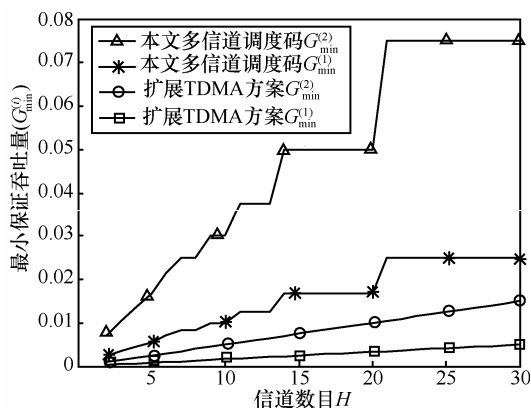
图 4 分析各类节点的吞吐量随信道数目 H 增加时的变化情况, 其中, H 从 2 增长到 30。图 4(a) 中给定的网络参数为 $N = 500, D = 3, M = 2, C = (1, 2)$; 图 4(b) 中的参数为 $N = 1500, D = 8, M = 2, C = (1, 3)$ 。从图 4 可以发现, 第二类节点的吞吐量大于第一类节点的吞吐量, 而且当 H 逐渐增加时, 每类节点的吞吐量都逐步上升。此外, 图 4 也说明了当 D 较小时, 本文提出的多信道 MAC 调度码的各类节点的吞吐量比扩展 TDMA 方案相应类型节点的吞吐量大。

对于传输时延特性, 文献[4,9]通过码长与节点

在一帧内保证传输成功的时隙数的比值 $\frac{L}{T_{\min}^{(i)}}$ 刻画第 i ($1 \leq i \leq M$) 类节点的最大传输时延。将这个刻画方式用于多信道的情形, 则使用本文调度码的网络中第 i 类节点的最大传输时延为 $\frac{L_{\min}^{\text{mc}}}{c_i}$, 同时扩展 TDMA 方案中第 i 类节点的最大传输时延为 $\frac{L^{\text{扩展TDMA}}}{c_i}$; 结合图 1 和图 2 中关于码长的分析可知, 当 D 较小时, 本文提出的调度码的最大传输时延比扩展 TDMA 方案更小。此外, 也容易说明第二类节点的最大传输时延比第一类节点更小。



(a) $N = 500, D = 3, M = 2, C = (1, 2)$



(b) $N = 1500, D = 8, M = 2, C = (1, 3)$

图 4 节点的吞吐量随信道数 H 增加时的变化情况

以上分析表明, 本文提出的多信道 MAC 调度码可以用于支持多类业务的移动自组织网络, 并且最小保证吞吐量等性能优于扩展 TDMA 方案。这种 MAC 调度码可以使得系统根据节点的业务类型分配不同的信道资源, 大重量的码字可以分配给需要提供有保证服务质量的实时业务类节点, 小重量

的码字可以给传输服务质量需求较低的节点, 从而提升系统的性能。

5 结束语

本文研究了支持多类业务的多信道拓扑透明 MAC 调度码的设计问题, 并对所设计的调度码在网络中的性能展开分析。本文的主要贡献和结论如下。

1) 基于有限域上的多项式理论, 提出了一类支持多类业务的多信道拓扑透明 MAC 调度码的设计方案。推导了这类调度码的最小码长。

2) 说明了当信道数为 H 时, 本文多信道拓扑透明 MAC 调度码的码长约为文献[9]中单信道拓扑透明 MAC 调度码码长的 $1/H$ 。

3) 将本文提出的多信道 MAC 调度码与扩展 TDMA 方案对比, 在网络参数相同的条件下, 本文提出的多信道 MAC 调度码在码长及最小保证吞吐量等方面优于扩展 TDMA 固定分配方案。

参考文献:

- [1] 张晓玲, 梁炜, 于海斌等. 无线传感器网络传输调度方法综述[J]. 通信学报, 2012, 33(5): 143-157.
ZHANG X L, LIANG W, YU H B, *et al.* Survey of transmission scheduling methods in wireless sensor networks[J]. Journal on Communications, 2012, 33(5): 143-157.
- [2] 徐朝农, 徐勇军, 范永开. 无线自组织网络 MAC 调度技术研究[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(1): 10-16.
XU C N, XU Y J, FAN Y K. Survey of MAC scheduling technique of wireless ad hoc networks[J]. Application Research of Computers, 2011, 28(1): 10-16.
- [3] CHLAMTAC I, FARAGO A. Making transmission schedules immune to topology changes in multi-hop packet radio networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1994, 2(1): 23-29.
- [4] JU J H, LI V O K. An optimal topology transparent scheduling method in multihop packet radio networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1998, 6(3): 298-306.
- [5] CAI Z, LU M, GEORGHIADES C N. Topology-transparent time division multiple access broadcast scheduling in multihop packet radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2003, 52(4): 970-984.
- [6] 张光辉, 李建东, 周雷等. 多跳 ad hoc 网络中支持 MIMO 的拓扑未知预约时分多址接入协议[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(5): 785-788.
ZHANG G H, LI J D, ZHOU L, *et al.* Topology-transparent reservation time division multiple access in multihop ad hoc networks with MIMO links[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006, 28(5): 785-788.
- [7] BOZTAS S. A robust multi-priority topology-independent transmission

(下转第 69 页)

tional Symposium, 1992.AP-S. 1992 Digest. Held in Conjunction with: URSI Radio Science Meeting and Nuclear EMP Meeting[C]. Chicago IL, USA, IEEE, 1992.524-527.

- [9] HIROTOMO M, MOHRI M, MORII M. A probabilistic computation method for the weight distribution of low-density parity-check codes[A]. Information Theory 2005 ISIT 2005. Proceedings. International Symposium on[C]. Adelaide, SA, IEEE, 2005.2166-2170.
- [10] BERSON T. Failure of the McEliece public-key cryptosystem under message-resend and related-message attack[A]. Cryptology CRYPTO97[C]. California, USA, 1997.213-220.
- [11] SENDRIER N. McEliece Public Key Cryptosystem[M]. Encyclopedia of Cryptography and Security, Springer Berlin Heidelberg, 2005.375-378.2011,767-768.
- [12] SUN H. Improving the security of the McEliece public-key cryptosystem[A]. ASIACRYPT'98[C]. 1998.200-213.

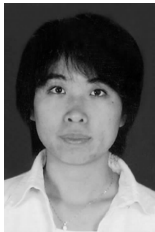


王延丽 (1987-), 女, 山东兖州人, 西安电子科技大学硕士生, 主要研究方向为密码分析。



梁斌 (1989-), 男, 河南焦作人, 西安电子科技大学硕士生, 主要研究方向为密码分析。

作者简介:



刘景美 (1979-), 女, 山东烟台人, 博士, 西安电子科技大学副教授, 主要研究方向为密码分析。



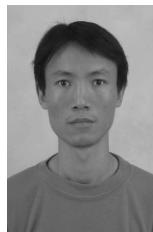
赵林森 (1977-), 男, 山东聊城人, 西安邮电大学讲师, 主要研究方向为网络安全与数字通信。

(上接第 64 页)

schedule for packet radio networks[J]. Information Processing Letters, 1995, 55(5): 291-295.

- [8] LIU Y, ZHANG L, LI V O K, *et al.* Topology-transparent scheduling in mobile ad hoc networks supporting heterogeneous quality of service guarantees[A]. 2012 46th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)[C]. Princeton, NJ, 2012. 1-6.
- [9] 李西洋, 范平志. 支持多类业务的移动 ad hoc 网络拓扑透明 MAC 调度码[J]. 计算机应用, 2012, 32(9): 2400-2404.
- LI X Y, FAN P Z. Topology-transparent MAC scheduling code for mobile ad hoc network supporting multi-class services[J]. Journal of Computer Applications, 2012, 32(9): 2400-2404.
- [10] JU J H, LI V O K. TDMA scheduling design of multihop packet radio networks based on latin squares[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17(8): 1345-1352.
- [11] BRUALDI R. Introductory Combinatorics[M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1999.

作者简介:



李西洋 (1979-), 男, 湖北荆州人, 西南交通大学博士生, 主要研究方向为序列设计和多址接入理论。



范平志 (1955-), 男, 四川广汉人, 博士, 西南交通大学教授、博士生导师, 主要研究方向为信息与编码、多址接入和高移动性无线通信理论。