

## 基于 OFDM 系统的随机信道接入方案

俞一帆 尹长川 罗涛 乐光新

(北京邮电大学电信工程学院 北京 100876)

**摘要:** 双忙音多址信道接入 (DBTMA) 协议是一种信道利用率较高的无线局域网信道随机接入控制方案。但是, 该协议的硬件实现复杂度较高。该文在对 DBTMA 协议进行简单修改的基础上, 结合节能意识多址接入(PAMAS) 协议提出了一种基于 OFDM 系统的 DBTMA 信道接入系统, 并对此系统做了简要分析。分析结果显示, 该文提出的随机信道接入系统的性能良好且实现方式简单。

**关键词:** 双忙音多址信道, 正交频分复用, 节能意识多址, 随机接入, 无线局域网

**中图分类号:** TN919.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2005)06-0943-05

## A Random Access Mechanism Based on OFDM System

Yu Yi-fan Yin Chang-chuan Luo Tao Yue Guang-xing

(Institute of Telecommunication Engineering, BUPT, Beijing 100876, China)

**Abstract** A MAC protocol, termed Dual Busy Tone Multiple Access(DBTMA), is a random access mechanism with high channel utilization for WLAN. However, it is difficult to realize the protocol with hardware. This paper proposes a new random access mechanism based on OFDM system by making simple modification on DBTMA and integrating it with power aware multi-access protocol with signalling. Furthermore, the new protocol is analysed and the result indicates that the proposed random access system shows well performance and is easy to be realized.

**Key words** Dual bust tone multiple access, OFDM, Power aware multi-access protocol with signalling, Random access, WLAN

### 1 引言

在无线局域网里, 节点之间通过无线信道进行通信。网络利用信道随机接入协议控制节点的随机接入过程。目前, 双忙音多址信道接入(Dual Bust Tone Multiple Access, DBTMA)<sup>[1]</sup>协议是一种比较好的信道随机接入控制协议。它通过节点间竞争来决定信道的访问权限, 协议实现方法较简单, 其网络吞吐量比 RTS/CTS (Request To Send / Clear To Send)握手法几乎高一倍。但是, DBTMA 协议要求节点可以同时数据信道和控制信道上发送和接收数据, 并且在控制信道上增加了两个窄带信号, 这增加了硬件复杂度, 提高了设备成本, 目前还没有简单实用的硬件实现方案。

正交频分复用 (OFDM) 系统<sup>[2]</sup>是一种实现复杂度低, 应用广泛的多载波传输方案。它已被 IEEE 802.11a 协议采纳, 并有可能成为第四代移动通信系统的主流传输技术。其不同正交子载波上传输数据的特点使得在该系统上实现 DBTMA 协议成为可能。本文针对 DBTMA 协议存在的问题,

结合 PAMAS (Power Aware Multi-Access protocol with Signalling) 协议<sup>[3]</sup>提出了改进方案, 并将改进后的 DBTMA 协议同 IEEE 802.11a 协议的 OFDM 系统结合提出了一种基于 OFDM 系统和 DBTMA 协议的综合接入方案。该方案的物理系统非常简单, 在保持 DBTMA 协议原有高信道利用率的基础上, 有效解决了 DBTMA 协议实现困难的问题。

### 2 解决隐藏站和暴露站问题的随机信道接入协议

隐藏站问题及暴露站问题是无线局域网内经常出现的问题, 它严重影响了网络的性能。为解决这两种问题, 人们提出了一种竞争接入协议, 即 DBTMA, 做为无线局域网 (WLAN)的随机信道接入协议。

#### 2.1 双忙音多址接入协议

当网络负载很高或无线信道不稳定时, 无线局域网络采用 RTS/CTS 握手法控制节点如何接入信道, 会使网络的性能受到很大影响。为解决这些问题, 在忙音多址信道接入 (BTMA)协议<sup>[4]</sup>的基础上提出了 DBTMA 协议。DBTMA 协议

将信道分为两个子信道：数据信道和控制信道。数据报文在数据信道上传输，控制报文(RTS 和 CTS)在控制信道上传输，另外在控制信道上增加两个频带彼此相隔足够宽的窄带忙音：BTr(接收忙音)和 BTt(发送忙音)，分别用来指示某节点正在数据信道上接收和发送数据。

DBTMA 的工作过程为：发送节点及接收节点在通信前处在空闲状态。当发送节点需要发送数据时，它检测 BTr 是否存在。若不存在，则发送节点将发送 RTS 分组；反之，发送节点将进行退避。发送节点发送 RTS 后，启动定时器并等待 CTS。接收节点收到 RTS 后，检测 BTt 是否存在。若不存在，则接收节点将发送 CTS 分组及 BTr；此外，接收节点启动定时器等待发送节点发送数据；反之，接收节点将仍处在空闲状态。发送节点收到 CTS 后，发送 BTt 并发送数据。当数据收发完毕后，发送节点关闭发送忙音并回到空闲状态，接收节点关闭接收忙音并回到空闲状态。在通信期间，所有收听到 BTr 信号的其它节点必须延迟发送，所有收到 BTt 信号的节点不能接收数据。由于隐藏站可以收到 BTr 信号从而解决了隐藏站问题，而暴露站听不到 BTr 信号，仍可以发送数据，但不能接收数据。相比 RTS/CTS 握手法，DBTMA 的效率有较大的提高。

DBTMA 协议要求节点可以同时数据信道和控制信道上发送和接受数据，这增加了硬件复杂度，提高了设备成本。

### 2.2 双忙音多址接入协议存在的问题

首先，RTS 和 CTS 占用独立的控制信道传送，但是这些信道在传送数据时并未使用，此外在握手期间，数据信道是空闲的，这就降低了无线信道的使用效率。其次，发送节点在发送 RTS 时，无忙音保护，这就使得 RTS 极易受到其他节点的干扰。此外，在无线局域网内部，节点通常采用电池供电。在空闲状态，DBTMA 协议未规定节点采取节能方式，这将减少节点的工作时间。

### 2.3 双忙音多址接入协议的改进

(1) 在控制信道上只传输接收忙音和发送忙音，在数据信道上传输控制报文及数据报文。此外，在接收忙音上设定两种传输波形 BTr(CTS)及 BTr。当发送节点只检测到 BTt 时，它在 RTS 内告知接收节点当前的通信环境为暴露站环境，则接收节点可用 BTr(CTS)代替 CTS 来响应 RTS，从而使发送节点确定接收节点已收到 RTS。BTr 用来指示节点正在数据信道上接收数据。

(2) 发送节点在发送 RTS 时，发送 BTr 直至 RTS 发送完毕。

(3) 结合 PAMAS 协议，在空闲状态，节点应采取节能方式，这将延长节点的工作时间。

## 3 改进后的 DBTMA 与 OFDM 的结合

OFDM 是一种在无线通信系统内得到了广泛应用的技术。其主要思想是：将信道分成许多正交子信道，将低比特率形成的低速率多状态符号，在每个子信道上进行窄带调制和传输，构成了多个低速率符号并行发送的传输系统，这样提高了频谱利用率。由于每个子信道上的信号带宽小于信道的相关带宽，因此，每个子信道上的频率选择性衰落是平坦的，大大消除了符号间的干扰。载波之间的正交性通过如下方式获得，即各个相邻子载波的频率之间相差 1 个符号周期的倒数。

在 IEEE 802.11a 系统内，一个 OFDM 符号之内包括多个经过调制的子载波的合成信号。其发送遵循如下过程：首先，在  $N$  个经过数字调制的符号中间补  $M$  个零，构成  $N+M$  个输入样值序列，去进行 IFFT 运算。然后，IFFT 输出的最后  $T_1$  个样值被插入到 OFDM 符号的最前面，而且 IFFT 输出的最前面  $T_2$  个样值被插入到 OFDM 符号的最后面。最后，OFDM 符号与加窗函数  $W(t)$  时域相乘，经过射频载波调制之后，发送到无线信道中。OFDM 符号的接收过程与其发送过程相反。

改进后的 DBTMA 协议将信道分为数据信道和控制信道，数据信道用来传输数据报文及控制报文(RTS)，控制信道上只传输两个窄带忙音，即 BTr(接收忙音)和 BTt(发送忙音)，接收忙音上传两种波形，一种用来代替 CTS，使接收节点能够用其来响应 RTS。另一种用来指示节点正在数据信道上接收数据。在 OFDM 系统内，可将传送数字调制符号的子载波做为数据信道发送数据报文及控制报文，而两个忙音 BTt 及 BTr 则分别利用 OFDM 符号内的第一个及最后一个补零点来传送。接收忙音上设定的 BTr 及 BTr(CTS)可以分别用补零点的实部及虚部来传输。这样在 IEEE 802.11a 物理系统的基础上将得到一个 DBTMA 同 OFDM 相结合的新系统，可称之为 DBTMA-OFDM 系统，该系统的基本模型图如图 1 所示。

在 OFDM 系统内，利用 OFDM 符号的第一个及最后一个补零点来传送忙音。它在系统的快速傅里叶变(FFT/IFFT)模块内实现，其结构如图 1 及图 2 所示。

系统发送 BTt 的方法是：如果系统需要发送 BTr 时，在第一个补零点上传输 '1'，反之则传输 '0'，即不在这个

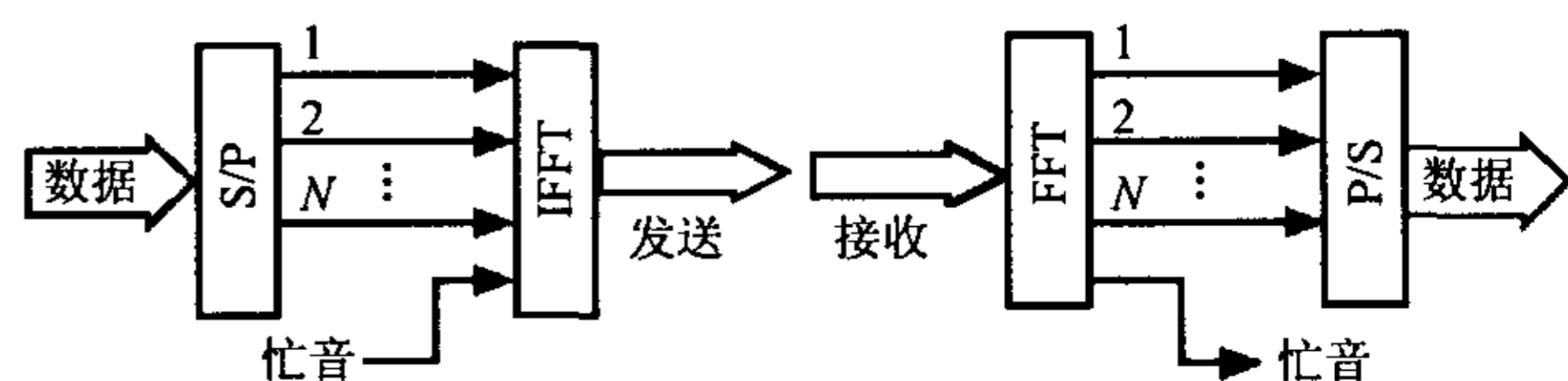


图 1 DBTMA-OFDM 系统的基本模型图

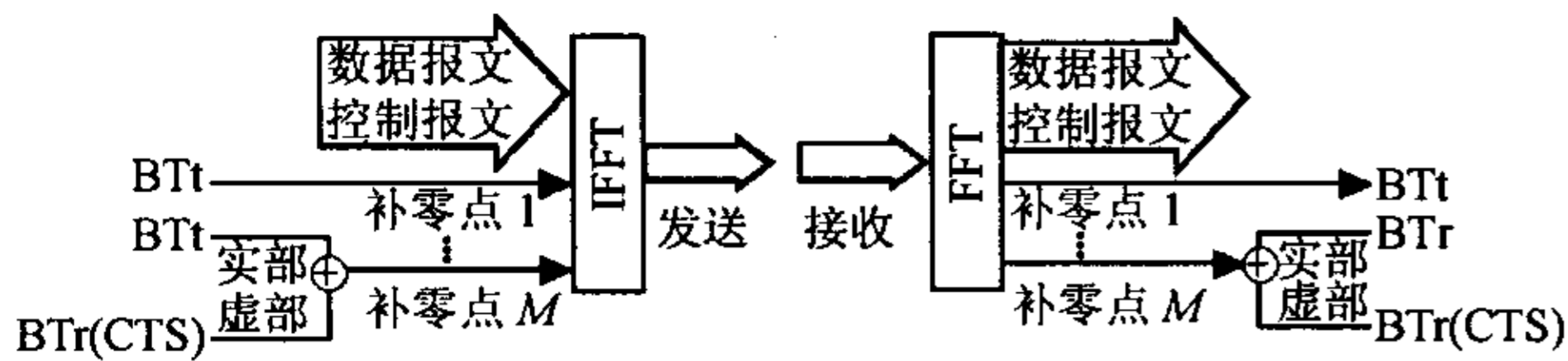


图 2 BTr 及 BTt 传输方案

忙音上传输信号。系统发送 BTr 的方法是：如果系统需要发送 BTt，则在最后一个补零点上传输 ‘1’，反之则传输 ‘0’，即不在这个忙音上传输信号。系统发送 BTr(CTS)的方法是：系统在连续  $m$  ( $m$  应等于 CTS 的长度) 个码元周期内发送 BTr(CTS)。系统检测 BTt 的方法是：当连续  $k$  个码元周期检测到 BTt 为 ‘0’ 时表示无节点发送数据，反之则表示有节点正在发送数据。系统检测 BTr 的方法是：当连续  $k$  个码元周期检测到 BTr 为 ‘0’ 时表示无节点正在接收数据，反之则有节点正在接收数据。系统检测 BTr(CTS)的方法是：在暴露站环境下，当发送节点在等待接收节点响应 RTS 时，在定时器超时前，检测到  $t$  ( $m > t > 0$ ) 个码元周期的 BTr(CTS) 为 ‘1’，则表示接收节点已响应，反之则表示接收节点没有响应。

可以看出，改进后的与 OFDM 结合的 DBTMA 协议只需对 IEEE 802.11a 物理收发系统做简单改造，即利用 IEEE 802.11a 系统内的两个补零点来传输忙音控制信息，就能实现。

## 4 对 DBTMA-OFDM 系统的分析

### 4.1 DBTMA-OFDM 系统物理模块的分析

DBTMA 协议实现的关键是：节点必须能够同时在数据信道和控制信道上发送和接受数据，即物理系统必须能够在无线信道上同时收发数据。在 OFDM 实际系统内，在子载波上同时进行数据的收发是无法实现的，其原因是：在子载波上同时发送和接收数据必然使得一部分子载波上传输的数据无法与其它子载波上传输的数据保持相位一致，因为不同的发送节点无法保证在同一时刻发送数据。子载波上的数据如果存在相位偏差，就导致从不同节点发出的相互叠加的各个子载波之间必然存在相位偏差，这种偏差必然导致子载波之间的正交性遭到破坏，子载波之间的正交性一旦遭到破坏，则会产生 ICI，从而导致系统无法正确传输数据。但是如式(1)所示，控制信道上的忙音由于在整个数据传输期间，其幅值保持恒定，所以即使传输这些忙音的子载波同传输数据的子载波之间存在相位偏差，也只会频谱上产生相位旋转，而不会破坏子载波之间的正交性。因此由于改进后的 DBTMA 协议在控制信道上只传输忙音，所以在 OFDM 系统上同时实现忙音的发送及接收而不影响数据的传输是可能的。

$$\left| \frac{1}{T} \int_0^T \exp(jn\omega \times t - \varphi_0) \cdot \exp(jm\omega \times t) dt \right| = \begin{cases} 1, & m = n \\ 0, & m \neq n \end{cases} \quad (1)$$

然而，在系统内仍然会出现忙音对数据的干扰。在暴露站环境下，接收节点会以 BTr(CTS)来响应 RTS，而 BTr(CTS)在持续一段时间后会关闭，所以在 BTr(CTS)产生及关闭后的一段时间  $T$  ( $T$  小于或等于一个码元周期) 内，这样数据信道上传输的数据可能会被干扰，这时如果某个接收节点正在接收数据，则其接收的数据有可能出现两个码元的错误。但是系统各个子载波之间的干扰与各个在载波的发送功率及它们之间的频率间隔有关，因此如果忙音的发送功率比较小，则它对数据的干扰就比较小，数据出现错误的概率就比较低。

在补零点上传输 BTr 及 BTt 可以将子载波全部用于传输数据，从而增加了系统的传输带宽，而且它只需要对 OFDM 系统的收发机结构进行简单修改即可，但是这将牺牲系统在数据信道上的一些发射功率，不过如果数据信道上的子载波足够多，且忙音的发送功率较小，则不会对数据信道的性能产生太大影响。然而在补零点上传输 BTr 及 BTt 是通过在原有系统的带宽上增加了两个子载波的带宽实现的，这会导致系统的带外辐射增加。但只要忙音的发射功率比较低，系统就不会产生较大的带外辐射。较低的忙音发射功率会增加其它节点误检信道为空闲的概率。因此，忙音的发射功率应选取一个恰当的值，既不会严重影响数据信道的性能，又不会令其它节点误检信道状态的概率上升。

因为忙音及数据在同一个 (FFT/IFFT) 模块内实现收发，所以各个节点每隔一个符号周期检测一次信道是否空闲。因此，可以得到节点误检信道为空闲的概率  $P_b$  为

$$P_b = P_e^k \quad (2)$$

$P_e$  为忙音的误码率。当系统发送功率一定时，因为每个节点每次只需发送一个忙音，则可得到下列关系式：忙音的发送功率为  $E_b$ ， $N$  为数据信道子载波个数， $P$  为数据信道上每个子载波的发送功率， $\Delta P$  为每个子载波提供给忙音的发送功率， $P_0$  为系统的发送功率。令  $\Delta P = \alpha P$  ( $1 > \alpha > 0$ )，

$$P_0 = N \cdot P + N \cdot \alpha \cdot P \quad (3)$$

$$E_b = N \Delta P = N \cdot \alpha \cdot P \quad (4)$$

$$P = P_0 / [N(1 + \alpha)] \quad (5)$$

### 4.2 DBTMA-OFDM 系统媒体接入模块的分析

在对协议分析之前，做如下假设：一个 OFDM 符号的长度为  $T_0$ ，一个 RTS 的长度为  $\gamma$ ，由  $L_c$  个符号组成，一个 CTS 的长度为  $\gamma$ ；由  $L_c$  个符号组成，一个数据报文的长度  $\delta$ ；由  $L_d$  个符号组成。信道的最大传输时延为  $\tau$ 。信道上数据的平均到达速率为  $\lambda$ ，在  $T_0$  时间内到达信道的总共平均码元数为  $G$ 。网络内隐藏站与非隐藏站的比率为  $\eta$ 。报文处理时间忽略不计。综上可得

$$\gamma = L_c \cdot T_0 \quad (6)$$

$$\delta = L_d \cdot T_0 \quad (7)$$

$$G = \lambda \cdot T_0 \quad (8)$$

此外,节点向信道发送数据的过程为泊松过程。在发送控制报文期间,节点不会误检信道为空闲。不考虑数据信道上的误码现象及暴露站现象。将信道上无数据的时间称为空闲期,将信道上无数据的时间称为空闲期,则整个信道交替地出现占用期及空闲期,将一个占用期同个空闲期加起来则构成一个周期,因此信道利用率  $S$  为

$$S = \bar{U} / (\bar{B} + \bar{I}) \quad (9)$$

$\bar{B}$  为占用期,  $\bar{I}$  为空闲期,  $\bar{U}$  为数据在信道上成功传输的时间。

一个数据报文被成功接收的过程是: RTS 成功传输,接着 CTS 成功传输,最后数据报文成功传输,则数据报文被成功接收的概率  $P_s$  是

$$P_s = P[\text{数据被成功接收}] = P[\text{RTS被成功接收}] \cdot P[\text{CTS被成功接收} | \text{RTS被成功接收}] \cdot P[\text{数据被成功接收} | \text{CTS被成功接收}] \quad (10)$$

因为 RTS 在发送期间, BTr 也被发送,所以发送节点通信范围内的节点不会在 RTS 发送时发送报文,这样 RTS 被成功接收的概率就是接收节点在接收 RTS 期间,其通信范围内只有一个报文到达的概率。考虑到隐藏站的影响,能够得到

$$P_{\text{RTS}} = P[\text{RTS被成功接收}] = P[\text{在} \tau \text{内只有一个RTS到达} | \text{在} \tau \text{内有RTS到达}] \cdot P[\text{无隐藏站在接收RTS期间发送数据}] \quad (11)$$

可以得到

$$P_{\text{RTS}} = \frac{(G\tau/T_0)e^{-G\tau/T_0}}{1 - e^{-G\tau/T_0}} \cdot e^{-\eta G(\gamma+\tau)/T_0} \quad (12)$$

RTS 被成功接收后, CTS 被成功接收的条件是:在最大传输时延  $\tau$  内,没有隐藏站的报文到达,因为隐藏站在网络内同非隐藏站的比率为  $\eta$ ,则隐藏站报文的到达速率为  $\eta \cdot \lambda$ ,则可以得到 RTS 被成功接收后, CTS 被成功接收的概率:

$$P_{\text{CTS}} = P[\text{CTS被成功接收} | \text{RTS被成功接收}] = P[\text{在} \tau \text{内没有RTS到达}] \quad (13)$$

可以得到

$$P_{\text{CTS}} = e^{-\eta G\tau/T_0} \quad (14)$$

CTS 被成功接收后,数据被成功接收时,其它节点应不出现误检信道为空闲的情况。则 CTS 被成功接收后,数据被成功接收的概率为

$$P_{\text{DATA}} = P[\text{数据被成功接收} | \text{CTS被成功接收}] = P[\text{其它有数据需要发送的节点没有连续} k \text{个码元检测到忙音为} '0'] \quad (15)$$

$$P_{\text{DATA}} = 1 - P_b = 1 - P_e^k \quad (16)$$

则能够得到

$$P_s = P_{\text{RTS}} \cdot P_{\text{CTS}} \cdot P_{\text{DATA}} \quad (17)$$

一个数据成功传输的时间包括: RTS 的传输时间, CTS 的传输时间,数据的传输时间及上述三次传输后的信道时延,则数据被成功接收的时间  $T_s$ :

$$T_s = 2\gamma + 3\tau + \delta \quad (18)$$

数据未被成功接收的时间由 RTS 冲突时间, CTS 冲突时间及数据冲突时间组成。冲突时间由冲突报文的叠加长度及信道时延组成。因为数据到达的过程为泊松过程,则冲突报文的叠加冲突近似为平均分布,则可以分别得到 RTS 冲突时间  $T_f^{\text{RTS}}$ , CTS 冲突时间  $T_f^{\text{CTS}}$  及数据冲突时间  $T_f^{\text{DATA}}$ :

$$T_f^{\text{RTS}} = \gamma + 0.5\gamma + \tau = 1.5\gamma + \tau \quad (19)$$

$$T_f^{\text{CTS}} = \gamma + 0.5\gamma + \tau = 1.5\gamma + \tau \quad (20)$$

$$T_f^{\text{DATA}} = \delta + \int_{\delta-\gamma}^{\delta} \frac{1}{\delta} \cdot (\gamma - \delta + x) dx + \tau = \delta + \frac{\gamma^2}{2\delta} + \tau \quad (21)$$

信道的占用期由数据成功传输的时间及数据未成功传输的时间组成。则信道占用期为

$$\bar{B} = P_s T_s + (1 - P_{\text{RTS}}) T_f^{\text{RTS}} + P_{\text{RTS}} (1 - P_{\text{CTS}}) T_f^{\text{CTS}} + P_{\text{RTS}} P_{\text{CTS}} (1 - P_{\text{DATA}}) T_f^{\text{DATA}} \quad (22)$$

数据在信道上成功传输的时间为

$$\bar{U} = P_s \delta \quad (23)$$

因为节点每隔一个符号周期才能检测信道是否空闲,所以信道的空闲期是由  $J$  个长度为  $T_0$  的时隙组成,则  $J$  的平均值为<sup>[5]</sup>

$$\bar{J} = \sum_{j=0}^{\infty} j \cdot p_0^j (1 - p_0) = p_0 / (1 - p_0) \quad (24)$$

$$p_0 = P[\text{在} T_0 \text{内无RTS到达}] = e^{-G} \quad (25)$$

此外,节点在接入信道前,需要连续  $k$  个码元检测到没有忙音。所以,信道的空闲期为

$$\bar{I} = T_0 \cdot \bar{J} + k \cdot T_0 \quad (26)$$

由上,能够得到信道的利用率:

$$S = P_s \cdot \delta / [P_s T_s + (1 - P_{\text{RTS}}) T_f^{\text{RTS}} + P_{\text{RTS}} (1 - P_{\text{CTS}}) T_f^{\text{CTS}} + P_{\text{RTS}} P_{\text{CTS}} (1 - P_{\text{DATA}}) T_f^{\text{DATA}} + T_0 \cdot \bar{J} + k \cdot T_0] \quad (27)$$

#### 4.3 数值分析

在无线局域网环境内,无线信道通常为瑞利衰落信道。信噪比需要在有很大变化的情况下,才使系统误码率发生显著的变化。通常情况下,信噪比只有发生 5dB 的变化,才能使误码率发生一个数量级的变化。因此由式 (5) 可知,当系统的子载波的数量较大时,忙音使用的发送功率不会对数

据信道各个子载波的功率产生较大影响,这样系统数据信道的误码率也不会发生较大变化。此外,由于忙音的误码率可以比数据信道的误码率高,那么忙音的信噪比就可以比数据信道的信噪比低得多。这样,系统的带外辐射将大大降低。

在 IEEE 802.11a 无线局域网环境内,信道的传输时延大约为  $1\mu\text{s}$ , OFDM 符号的周期通常为  $4\mu\text{s}$ , 报文的长度为  $1\sim 4095\text{Byte}$ 。因此,需要考虑忙音的误码率,传输报文的长度,空闲信道的检测时间及隐藏站与非隐藏站的比率对信道的吞吐量的影响。在此处,各个图的横坐标表示网络负载,其定义由式(8)决定,各个图的纵坐标表示信道的利用率,其定义由式(9)决定。

图3表示了数据报文长度为75个码元周期,225个码元周期及405个码元周期时,在一个码元时间内到达信道的总共平均码元数与信道利用率之间的关系。如图3所示,当控制报文的长度一定时,可以发现数据报文的长度较长时,信道的利用率较高。这是因为,系统在传输数据报文时,报文出现冲突的概率较小,则数据报文传输的时间越长,信道的利用率就越高。

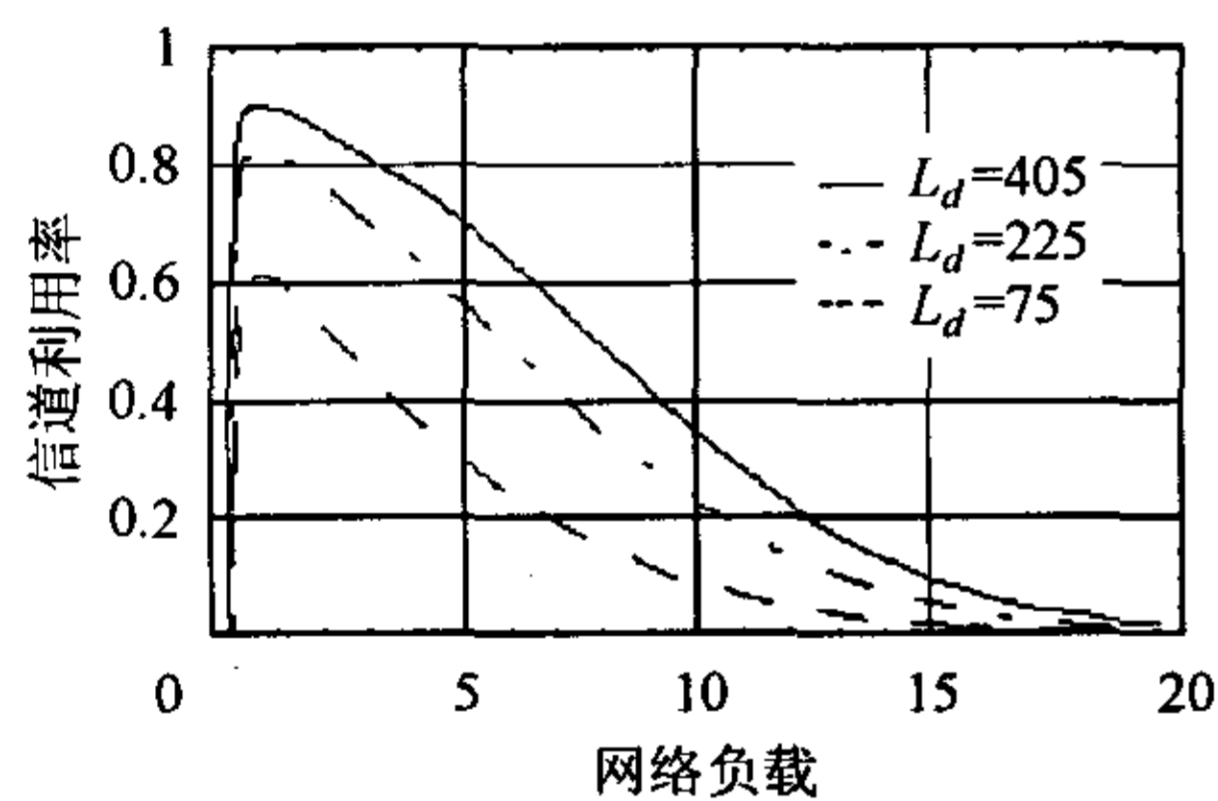


图3  $P_e=0.01, \eta=0.6, k=L_c=3$  信道利用率

图4表示了信道误码率为0, 0.09及0.3时,在一个码元时间内到达信道的总共平均码元数与信道利用率之间的关系。如图4所示,当传输报文的长度一定时,可以发现忙音的误码率较低时,信道的利用率较高。但是忙音的误码率只要达到  $10^{-2}$  数量级,其性能就非常接近无误码的情况。这是因为,系统在检测信道是否空闲时,需要连续检测到  $k$  个码元周期的忙音为‘0’,才会接入信道,而当控制报文的传输时间比信道检测时间短时,则不会因为其它节点对信道空闲的误检而破坏控制报文的传输。所以忙音的误码只在数据报文传输时对信道的利用率有影响。

图5表示了隐藏站数量与非隐藏站数量的比例为0.1, 0.6及3时,在一个码元时间内到达信道的总共平均码元数同信道利用率之间的关系。如图5所示,隐藏站与非隐藏站的比率较高时,信道的利用率较低。当隐藏站的数量是非隐藏站的整数倍时,信道利用率急剧下降。这是因为,隐藏站数量的增加使CTS的冲突概率显著增加。

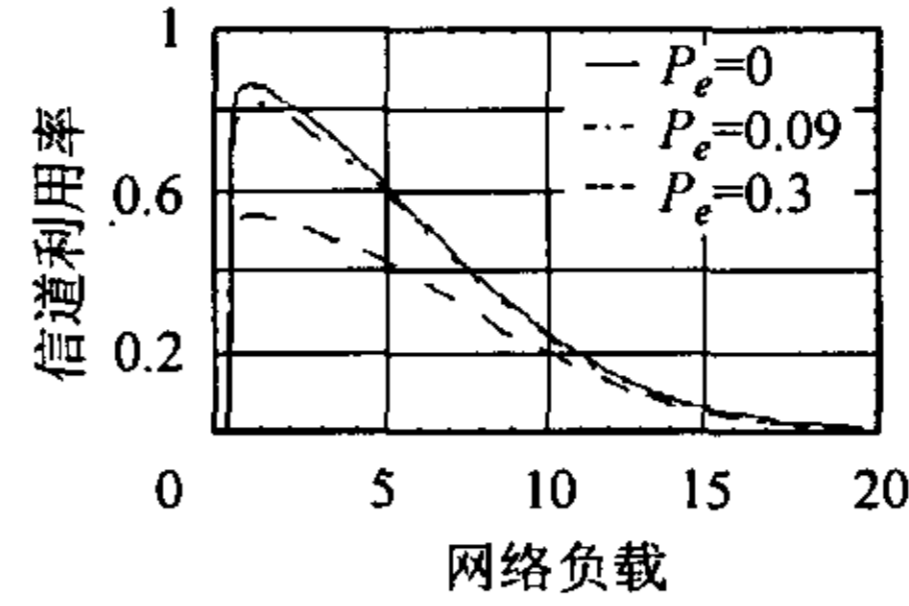


图4  $L_d=225, \eta=0.6, k=2$  信道利用率

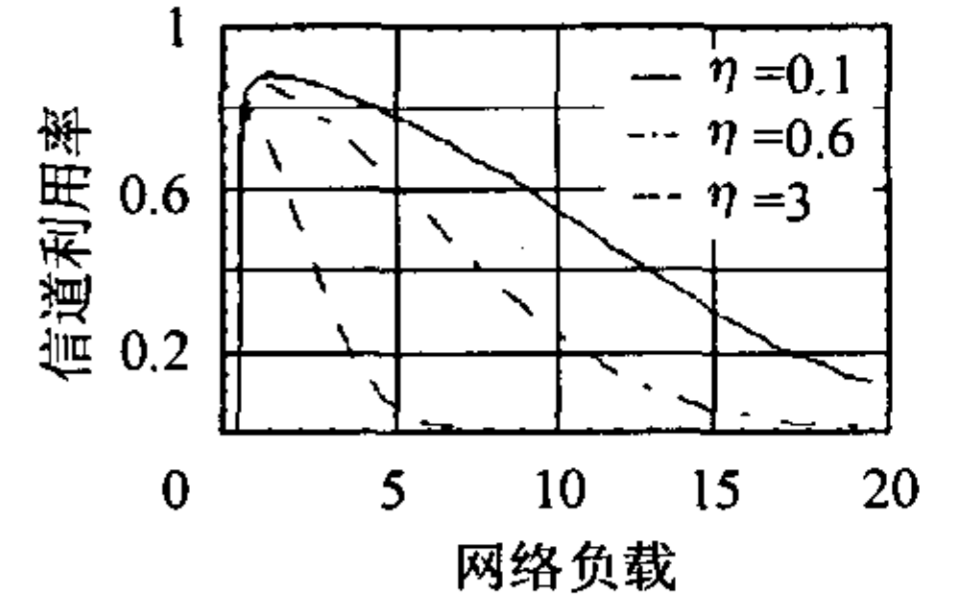


图5  $P_e=0.01, L_d=225, k=2$  信道利用率

## 5 结束语

DBTMA-OFDM 系统利用忙音在整个通信期间幅值保持恒定的特点,通过对 DBTMA 进行改进,利用在补零点上传输忙音信号的方法,实现了控制信息在控制信道上的同时收发。分析表明,本文提出的方法在对现有的 IEEE 802.11a 协议的 OFDM 物理传输系统进行简单修改的基础上,使得 DBTMA 协议在实际的物理系统上得到实现,且获得了很好的网络性能。

## 参考文献

- [1] Deng J, Haas Z J. Dual busy tone multiple access (DBTMA): A new medium access control for packet radio networks. IEEE ICUPC'98 International Conference on Universal Personal Communications. Florence, Italy 5 - 9 Oct. 1998, Vol.2: 973 - 977.
- [2] Nee R V, Prasad R. OFDM Wireless Multimedia Communications [R]. Boston: Artech House Publishers, 2000.
- [3] Suresh Singh, Raghavendra C. PAMAS—power aware multi-access protocol with signalling for ad hoc networks. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1998, 28(3): 5 - 26.
- [4] Tobagi F A, Kleinrock L. Packet switching in radio channels: Part II-The Hidden terminal problem in carrier sense multiple-access and busy-tone solution. IEEE Trans. on Communications, 1975, COM-23(12): 1417 - 1433.
- [5] 谢希仁. 计算机网络(2版). 大连: 大连理工大学出版社, 1996, 第五章第四节.

俞一帆: 男, 1979年生, 博士生, 主要研究方向为第四代移动通信系统关键技术的研究、无线IP技术及无线数据通信。

尹长川: 男, 1968年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为多载波编码调制理论及高速信息网络。

罗涛: 男, 1971年生, 博士, 讲师, 主要研究方向为编码调制理论及高速信息网络。

乐光新: 男, 1937年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为通信理论、数字通信、信息处理及高速信息网络。