

# 一种新的多速率时频码 MB-OFDM 超宽带系统模型

董伟杰 俞能海 尹勇

(多媒体计算与通信教育部-微软重点实验室 中国科学技术大学信息处理中心 合肥 230027)

**摘要** 该文提出了一种新的多用户超宽带系统模型,该模型基于MB-OFDM系统,各个用户的数据通过在时域和频域同时进行的一种编码(Time-Frequency Code, TFC)进行区分。同时给出了针对这种系统的一种自适应TFC分配算法,该算法在保证每个用户的最小传输速率请求的前提下,使传输功率最小化。理论分析和实验表明,该系统及其相应的TFC分配算法可以有效地增加多速率用户接入系统的能力,并且有效地节省发射功率,而这正是一个超宽带系统所需要的。

**关键词** 时频码,多速率,超宽带,MB-OFDM

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)10-1858-04

## A Novel Time-Frequency Coded Multi-rate MB-OFDM UWB System Model

Dong Wei-jie Yu Neng-hai Yin Yong

(MOE-Microsoft Key Lab of Multimedia Computing and Communications, IPC, USTC, Hefei 230027, China)

**Abstract** A novel multi-rate MB-OFDM ultra-wide band (UWB) system is proposed, in which users are distinguished from their unique time-frequency codes (TFC). Also an adaptive TFC allocation algorithm is given to minimize total transmitting power with the constraint of the minimal data rate requirement of each accessed user. Theoretical analysis and experimental results show that the proposed system and allocation algorithm are able to increase system access capacity of multi-rate users and save power effectively, which is just an UWB system needed.

**Key words** Time-frequency code, Multi-rate, Ultra-Wide Band (UWB), MB-OFDM

### 1 引言

无线通信技术的飞速发展使人们对于数据传输速率和服务质量(QoS)提出了更高的要求,特别是对于那些针对短距离通信的应用来说更是如此。超宽带(Ultra-Wide Band, UWB)技术因为可以在功耗很低的情况下,产生带宽很高的信号,已经吸引了越来越多的注意力。特别在美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)把UWB信号的定义从大于1.5GHz更改为500MHz,并且把3.1GHz至10.6GHz这一频段作为UWB信号的测试频段<sup>[1]</sup>之后,UWB技术已经成为了目前无线通信领域中的一个非常热的研究课题。

根据FCC在文献[1]中的定义,任何-10dB带宽大于500MHz或者分数带宽(即信号带宽与中心频率之比)大于20%的信号,只要其传输信号功率谱密度(PSD)符合FCC的规定,就可以被称为UWB信号。目前符合FCC定义的UWB信号共有3种:时间跳变冲激无线电(Time-Hopping Impulse Radio, TH-IR)<sup>[2]</sup>、直接序列扩频UWB(DS-UWB)<sup>[3]</sup>和多带OFDM(Multi-Band OFDM, MB-OFDM)<sup>[4]</sup>。本文所讨论的对象将仅限于最后一种UWB系统。

MB-OFDM是IEEE 802.15.3a工作组无线个域网(Wireless Personal Area Network, WPAN)物理层标准的候选提案之一(merged proposal #1)<sup>[4]</sup>。在文献[4]中,整个UWB测试频段被划分为5个带组(band groups),而每个带组又包括2-3个频宽为528MHz的子带(sub-bands)。在本文中,一个带组信号被称为一个MB-OFDM符号,而一个OFDM符号将用来表示一个子带信号。每个子带信号是一个由128个副载波(sub-carriers)所组成的OFDM符号(symbol),这128个副载波中包括了100个数据副载波(data tone)、12个导频(pilot tone)和10个保护副载波(guard tone),另外还有6个副载波填充为零,保证用于IFFT变换的副载波总个数为2的整数次方。MB-OFDM系统可以提供的数据传输速率为53.3, 55, 80, 106.67, 110, 160, 200, 320和480Mb/s,其中53.3, 106.67, 110和200Mb/s是必须要支持的传输速率。

从目前已经发表的文献来看,国内外针对MB-OFDM系统的研究大部分集中于单用户系统,国内东南大学的毕光国等针对这种系统进行了信道估计方面的研究<sup>[5]</sup>,国外对于MB-OFDM系统的研究一般也局限于系统的设计等<sup>[6]</sup>。但是一个通信系统如果不能有效地支持多用户接入(Multiple Access, MA),即使它可以支持的最大传输速率为480Mb/s,也很难有太大的吸引力。美国明尼苏达大学的Saberinia等就MB-OFDM系统的多用户接入进行了一些工作<sup>[7,8]</sup>,但他所做

2005-02-06收到,2005-07-09改回  
国家自然科学基金重大项目“未来移动通信系统基础理论与技术研究”(60496314)资助课题

的工作对现有MB-OFDM系统结构进行了很大的改动,不利于实际实现。美国马里兰大学的Rangnekar在完全利用MB-OFDM系统的基础上进行了用户信道规划的工作<sup>[9]</sup>,但正如后面所提到的,这会在多用户接入时缺乏足够的灵活性。所以在最大限度利用现有MB-OFDM系统结构的基础上,研究如何灵活有效地实现多用户接入将是一个很有意义的研究课题。

人们通常采用的MA方法是频分复用多用户接入(FDMA)或者时分复用多用户接入(TDMA)。但在TDMA系统中,无论用户需要的速率是多少,在分配到的时隙中都要占用整个可用带宽,而在实际应用当中,不同用户的数据速率却是不尽相同的。这意味着对于低速率(Low Data Rate, LDR)用户来讲,也要按照高速率(HDR)用户的要求进行传输,势必会增加LDR用户的传输功率和成本。而在FDMA系统中,受副载波个数所限,在分配用户带宽时也将缺乏足够的灵活性。

为了满足不同用户的速率要求,把FDMA和TDMA结合起来将是一种比较好的解决方案——系统在时域和频域同时对不同的用户进行编码,不同用户的数据将通过不同的时频码(Time-Frequency Code, TFC)进行区分。在文献[4]中,实际上已经采用了一种TFC方案,但这种方案分配的用户码是以一个子带为单位的。在文献[4]给出的一个例子中,TFC为112233,表示在连续的两个MB-OFDM符号中,用户1的数据占用了第1个符号的1,2子带,用户3的数据占用的是第2个符号的2,3子带,而剩余的两个子带由用户2所占用。可见,这种分配方案并未考虑到不同用户数据速率的差异,所以在用户速率需求不同时对带宽的利用率会比较低。尽管MB-OFDM系统可以通过改变码率以及时间或者频率上的扩展系数来改变一个帧的速率,但在同一个帧中的数据速率却是固定的,文献[9]在这种系统之上进行信道规划,势必也会缺乏足够的灵活性来支持多种速率的用户。

为了解决上述的几个问题,本文提出了一种新的TFC-MB-OFDM系统,该系统并不是以一个子带为TFC分配单位的,而是以一个OFDM符号中的副载波为分配单位,这样既保留了系统的基本结构,又可以使多速率用户在接入系统时具有更大的灵活性。此外,根据UWB系统要求功耗比较低的特点,我们还提出了一种在保证每个用户最低速率要求的前提下,用于降低系统总功耗的TFC分配算法。经在不同的UWB信道模型CM1-CM4<sup>[10]</sup>中验证,所提出的算法是有效的。下面首先介绍一下这种TFC-MB-OFDM系统的模型。为了描述方便,除非特殊说明,下文中的副载波均指数据副载波。

## 2 TFC-MB-OFDM 系统模型

TFC系统最早是由Woodworth在文献[11]中提出来的。具体到MB-OFDM系统,我们可以把几个连续的MB-OFDM符

号分组成为一帧,并且把一个副载波看作一个基本单位,允许不同的副载波传输不同用户的数据。这样用户的数据就可以在一帧中的任何一个副载波上进行传输,而每个用户所占用的OFDM符号和副载波就构成了该用户的TFC。在这种系统中,可分配的TFC个数将由一个MB-OFDM符号中的副载波数量及一帧中的MB-OFDM符号数所决定。如果我们按照文献[4]中所定义的系统那样,把3个连续的子带作为一个MB-OFDM符号,每个子带中又包含了F个副载波,则以T个子带为一帧的TFC-MB-OFDM系统如图1所示。

在图1中, $F'=3F$ 是一个MB-OFDM符号中的副载波的个数,而 $T'=T/3$ 是一帧中的MB-OFDM符号的个数。一帧中的每个副载波都有一个唯一的索引号,每个用户分配到的副载波的索引号就构成了该用户的TFC。

Data Tone Indices	F	F	2F	3F(=F')	...	(T-2)F	(T-1)F	TF(=T'F')
	F-1	F-1	2F-1	3F-1	...	(T-2)F-1	(T-1)F-1	TF-1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
3	3	F+3	2F+3	...	(T-3)F+3	(T-2)F+3	(T-1)F+3	
2	2	F+2	2F+2	...	(T-3)F+2	(T-2)F+2	(T-1)F+2	
1	1	F+1	2F+1	...	(T-3)F+1	(T-2)F+1	(T-1)F+1	
		1	2	3	...	T-2	T-1	T(=3T')
		OFDM Symbol Indices						

图 1 TFC-MB-OFDM 系统模型

Fig. 1 TFC-MB-OFDM system model

假设图1所示系统中,一帧的数据传输速率为R,则一个TFC可分配单元对应的数据传输速率就是一帧中只有一个分配单位传输数据时的系统速率,即

$$R_c = \frac{R}{TF} = \frac{R}{T'F'} \quad (1)$$

在本文中,定义 $R_c$ 为单位速率,这样不同用户的数据速率请求将以 $R_c$ 的整数倍来表示。如果用户的数据速率请求不是恰好为 $R_c$ 的整数倍时,取大于该倍数的最小整数。可见,文献[4]中所定义的TFC分配单元对应于图1中 $F=1, T=6$ 的情况,即单位速率为 $R/6$ 。在这种情况下,即使用户的请求速率小于 $R/6$ (例如 $R/30$ ),也不得不以至少 $R/6$ 的速率接入系统。这无疑导致了系统资源的浪费。在保持T不变的情况下,如果将F增加到100,单位速率将变为 $R/600$ ,而在分配20个可分配单元给用户时,其 $R/30$ 的速率请求恰好可以得到满足。

采用本文所提出的TFC方案会在一定程度上增加多速率用户接入的个数。设一帧中总的TFC可分配单元为C,用户请求的接入速率为 $R_k$ 个单位速率( $R_k$ 为正整数),用户的接入概率为 $\rho$ ,则用户不能成功接入系统的概率(阻塞概率)为

$$\sum_{r=0}^{R_k-1} \binom{C}{r} (1-\rho)^r \rho^{C-r} \quad (2)$$

其中r是一帧中空闲的TFC可分配单元数。由式(2)可见, $R_k$ 与C之间的比值越小,用户的阻塞概率就越小。这说明在用户接入速率比较高并且差别不大的时候,采用所提出的TFC

方案在用户接入方面可能不会带来太多的灵活性；但如果用户请求的速率差别比较大，并且存在一定数量的中、低速率用户时，适当增加可分配的TFC单元，将会在一定程度上增加用户接入的个数。因为MB-OFDM系统中，每个OFDM符号中副载波的个数是固定的，所以往往通过增加一帧中的MB-OFDM符号数来增加TFC可分配单元的个数，但分帧通常会带来一定的系统延时，而且过多的可分配单元个数也会给系统处理带来额外的复杂度，所以在实际系统中还需要根据可能的用户速率请求与用户个数来选择一个合适的帧长。

在给出了一个TFC-MB-OFDM系统模型之后，还需要重点解决的问题就是如何把不同的TFC可分配单元分配给用户。我们可以采用类似交织的手段按照用户的速率请求把用户随机接入系统，每个副载波分配相同的功率。但不同用户接收端的副载波相对于发送端相应副载波的信道衰落状况(CSI)一般是不同的，不考虑CSI的分配方案显然不合理。如果在用户接入之后根据每个副载波的CSI来为每个副载波分配不同的功率，就会节省发射功率。下面要介绍的就是我们所提出的一种在保证用户最低速率请求的情况下，以最小化系统发射功率为目标的TFC分配算法。

### 3 TFC分配算法

目前多用户OFDM系统的副载波分配方案通常是在给定系统发射总功率的情况下使系统容量(或者系统吞吐量)最大<sup>[12]</sup>，或者在保证各个用户传输速率的情况下进行联合功率、副载波和比特分配<sup>[13]</sup>。这些分配方案的一个共同特点是假定每个副载波可以传输的最大比特数是可以改变的。但是在文献[4]中，MB-OFDM系统的调制方式在各种不同速率情况下都固定为QPSK，即每个副载波固定传输2个比特。这主要是因为UWB系统的数据传输速率非常高，为减少传输延时，将把系统的复杂度尽量保持在一个比较低的水平。所以为了最大限度地利用现有系统，避免引入更多的复杂度，我们在向用户分配TFC时也假定所有用户的调制方式都是QPSK。此外，UWB系统要求系统的发射功率尽量低，所以我们也把总的发射功率作为分配时主要考虑的因素之一。

假定每个副载波内的噪声为加性高斯白噪声，因为所有副载波占用的带宽都是相等的，所以我们将用与副载波发送功率成正比的发送信噪比来描述问题。当调制方式为QPSK时，为保证第 $k$ 个用户的第 $m$ 个副载波在不大于某个设定的误比特率 $Pe$ 条件下进行传输所需的最小发送信噪比为<sup>[14]</sup>

$$\gamma_{k,m} = [Q^{-1}(Pe)]^2 / \alpha_{k,m}, \quad k=1,2,\dots,K, m=1,2,\dots,F' \quad (3)$$

其中 $Q^{-1}(\cdot)$ 是 $Q$ 函数

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{+\infty} e^{-t^2/2} dt, \quad x > 0 \quad (4)$$

的反函数， $\alpha_{k,m}$ 是接收端第 $k$ 个用户的第 $m$ 个副载波对应于发送端的信道衰落状况，这里假设所有的副载波CSI对于收发双方都是可知的，并且一帧中不同MB-OFDM符号副载波的CSI是不变的。由于在多用户OFDM系统中，任何一个副

载波在某一时刻只能被一个用户所占用，所以由式(3)可知，在不加任何限制条件时，把某个副载波分配给CSI最好的用户(给定 $m$ 时 $\alpha_{k,m}$ 最大的用户)时，系统总发送信噪比最小。但是采用这种分配方案(以下简称分配方案I)会导致CSI不好的用户很难分配到副载波，因而其传输速率请求无法得到保证。所以还需要对分配方案I进行调整。

假设一个TFC-MB-OFDM系统的传输速率为 $R$ 个单位速率，有 $K$ 个用户同时向系统发出了接入请求，每个用户的最低速率请求分别为 $R_k$ 个单位速率， $k=1,2,\dots,K$ 。为了使问题简化，同时又不使讨论失去一般性，这里假设系统的传输速率可以满足所有用户的接入请求，即

$$\sum_{k=1}^K R_k \leq R \quad (5)$$

因为在无速率限制时，分配方案I是最优的，所以在存在速率限制时，对之所做的调整，要保证每一步的调整所带来的额外发送信噪比最小。

设 $k_m^\dagger = \arg \max_k (\alpha_{k,m})$ ，则把分配给用户 $k_m^\dagger$ 的副载波分配给用户 $k'(\neq k_m^\dagger)$ 时，需要增加的发送信噪比为

$$\begin{aligned} \square \gamma_{k',m} &= \gamma_{k',m} - \gamma_{k_m^\dagger,m} \\ &= [Q^{-1}(Pe)]^2 / \alpha_{k',m} - [Q^{-1}(Pe)]^2 / \alpha_{k_m^\dagger,m} \\ &= [Q^{-1}(Pe)]^2 (\alpha_{k_m^\dagger,m} - \alpha_{k',m}) / (\alpha_{k',m} \alpha_{k_m^\dagger,m}) \\ &\propto (\alpha_{k_m^\dagger,m} - \alpha_{k',m}) / (\alpha_{k',m} \alpha_{k_m^\dagger,m}) \equiv \square \alpha_{k',m} \end{aligned} \quad (6)$$

因此，问题转变为从速率请求得到满足的用户中，寻找一个使 $\square \alpha_{k',m}$ 最小的副载波，将该副载波从用户 $k_m^\dagger$ 分配给速率请求未得到满足的用户 $k'$ 。由于假定在一帧中不同MB-OFDM符号的CSI相同，所以会有多个相同的 $\square \alpha_{k',m}$ ，因此一次可以完成多个副载波在用户间的转移，但要保证转移后原来速率需求被满足的用户的需求仍然可以得到满足。

根据上述分析，整个分配算法可以描述如下：

(1) 根据不同用户的 $\alpha_{k,m}$ ，把所有的副载波分配给CSI最好的用户。设每个用户的最低速率请求为 $R_k$ ， $k=1,2,\dots,K$ ，实际分配到的副载波个数为 $R'_k$ ， $k=1,2,\dots,K$ 。

(2) 根据 $R_k$ 和 $R'_k$ ，将 $R'_k \geq R_k$ 和 $R'_k < R_k$ 的用户分别存放于两个集合 $U_1 = \{k | R'_k \geq R_k\}$ 和 $U_2 = \{k | R'_k < R_k\}$ 中。

(3) 计算将 $U_1$ 中用户的副载波分配到 $U_2$ 中用户的所有 $\square \alpha_{k',m}$ 值，取其最小值进行副载波重分配操作，并修改 $U_1$ ， $U_2$ ，以及相应用户的 $R'_k$ 值。

(4) 重复步骤(3)，直至 $U_2$ 为空集。已经重新分配过的副载波不再参与重分配，并且分配的过程不能导致 $U_1$ 中的用户转换到 $U_2$ 中。

在该分配算法中，因为步骤(4)对重分配过程的限制，所以步骤(3)中对 $\square \alpha_{k',m}$ 的计算只需要进行一次，因而整个分配算法的复杂度不高。

### 4 实验结果与讨论

为了使结果具有针对性和代表性，我们修改了文献[4]中

定义的 200Mb/s MB-OFDM 系统。修改后的 TFC-MB-OFDM 系统取消了信道编解码和交织/解交织模块,并且相应调整了每个比特的采样速率,使帧速率保持 200Mb/s 不变。该系统中每个帧包括 36 个子带,每个子带中的数据副载波的个数为 100,这样系统的单位速率为 1/18 Mb/s。因为在文献[4]定义的 200Mb/s 系统中,用户数据在时域上具有 2 的扩展因子,所以我们把每两个相邻的子带看作一个 OFDM 符号,把它们 CSI 均值作为一个 CSI 来看待,以保证分配结果最优。

我们在 IEEE 802.15.3a 所定义的 4 种 UWB 信道模型(即 CM1 至 CM4)中都进行了实验。实验中,我们设定的用户个数为 5,其最小接入速率请求分别为 100, 50, 20, 15, 10 Mb/s。如果按照文献[4]中所定义的 TFC 方案,在同一个系统中是无法同时满足这些用户的请求的。但按照本文所提出的方案,分别分配给 5 个用户不少于 1800, 900, 360, 270 和 180 个副载波就可以同时满足他们的要求。

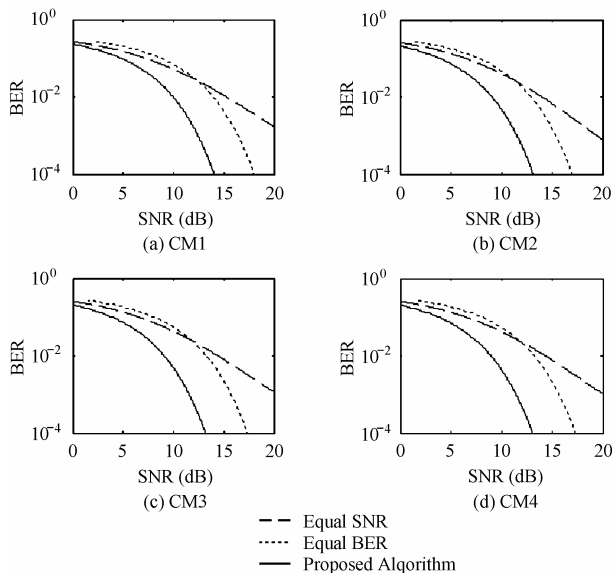


图2 3种分配算法在4种UWB信道下的性能比较

Fig.2 Performance comparison of 3 allocation algorithms in 4 UWB channel models

图2(a)–2(d)分别是系统在CM1–CM4下的每个副载波平均发送信噪比–误比特率(SNR–BER)性能曲线比较,其中实线表示的是采用了本文所提出的TFC分配方案的性能曲线;等SNR1对应的虚线是根据用户速率请求,随机接入系统(富余的副载波随机分配给某个用户),并且根据系统要求的BER,给每个副载波分配的发送SNR都相等(不考虑用户CSI)的性能曲线;还有一条曲线(等SNR2)对应的是根据用户速率请求,随机接入系统,但在分配发送SNR时根据不同副载波CSI和系统BER进行调整的情况。考虑到信道的随机性,这里图2(a)–2(d)给出的都是多组实验结果的平均值,每组实验进行时不同用户的CSI都不同,但在同一组实验使用不同的分配方案时,每个用户的CSI保持不变。实验结果表明,本文所提出的TFC分配方案在4种信道下均可以取得很好的性能。

## 5 结束语

本文提出一种应用了 TFC 的 MB-OFDM 系统模型,并根据这种系统的特点提出了一种复杂度不高的 TFC 分配方案。理论分析与实验结果表明,这种系统可以有效地增强多速率用户接入系统的能力,而且所提出的 TFC 分配方案在满足各个用户最低速率请求的情况下,还可以有效地降低系统总的发射功率。而对于 UWB 系统来说,低功耗和低复杂度正是两个很重要的性能指标。

## 参考文献

- [1] FCC. First report & order. Tech. Rep. 02-48, Apr. 2002.
- [2] Win M Z, Scholtz R A. Impulse radio: how it works. *IEEE Commun. Lett.*, 1998, 2(2): 36–38.
- [3] Fisher R, Laughlin M M, Welborn M. DS-UWB physical layer submission to 802.15 task group 3a. IEEE Tech. Rep. 802.15-04/0137r1, 2004.
- [4] IEEE. Multi-band OFDM physical layer proposal for IEEE802.15 task group 3a. Tech. Rep. 802.15-03/268r3, 2003.
- [5] Xu B, Bi G. Channel estimation using complementary sequence pairs for UWB/OFDM systems. *Electronics Letters*, 2004, 40(19): 1196–1197.
- [6] Batra A, Balakrishnan J, Aiello G R, et al.. Design of a multiband OFDM system for realistic UWB channel environments. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 2004, 52(9): 2123–2138.
- [7] Saberinia E, Tewfik A H, Gupta R. Pilot assisted multi-user UWB communications. *Vehicular Technology Conference*, 2003, 3: 1885–1889.
- [8] Saberinia E, Tewfik A H. Multi-user UWB-OFDM communications. *PACRIM*, 2003, 1: 127–130.
- [9] Rangnekar A, Sivalingam K M. Multiple channel scheduling in UWB based IEEE 802.15.3 networks. *Broadband networks*, First International Conference on, 2004: 406–415.
- [10] Foerster J. Channel modeling sub-committee report final. IEEE Tech. Rep. 802.15-02/490r1-SG3a, 2002.
- [11] Woodworth C B, Karol M J, Haas Z J, et al.. Spectrally efficient universal time slots using time-frequency-code. *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 1994, 3: 1009–1013.
- [12] Jiho J, Kwang B L. Transmit power adaptation for multiuser OFDM systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2003, 21(2): 171–178.
- [13] Wong C Y, Cheng R S, Letaief K B, et al.. Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit and power allocation. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1999, 17(10): 1747–1758.
- [14] Proakis J G. *Digital Communications (Fourth Edition)*. McGraw Hill, 2001.

董伟杰: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为多媒体超宽带系统。  
俞能海: 男, 1964 年生, 教授, 研究方向为宽带网络与多媒体通信。  
尹 勇: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为通信中的信号处理。