

一种用于交织多址系统中的低复杂度的交织方法*

彭涛,肖悦,李少谦

(电子科技大学 通信抗干扰技术国家级重点实验室,四川 成都 611731)

摘要: 针对传统交织多址(IDMA)系统中的交织器问题,提出了一种低复杂度的二维交织方法。该方法基于二维扩频的思想,分别在时域和频域对数据进行交织处理。同时,该方法对所有用户按照时域扩频码进行分组,用户组间采用不同的时域交织器,用户组内采用不同的频域交织器。仿真结果表明,该方法不但可以降低交织器的数量和长度,还可以降低IFFT/FFT操作和频域检测的复杂度。

关键词: 交织多址;二维扩频;二维交织

中图分类号: TP911

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2013)21-0041-04

A low-complexity interleaving scheme in IDMA systems

Peng Tao, Xiao Yue, Li Shaoqian

(National Key Lab of Communication, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: For alleviating the problem of interleavers in conventional interleave division multiple access (IDMA) systems, this paper proposed a two dimensional interleaving scheme with low-complexity. Based on the idea of two dimensional spreading, the data is interleaved in both time and frequency domain. Meanwhile, all users are grouped by the time domain spreading factor. Different time domain interleavers are adopted in each group, and different frequency domain interleavers are adopted within the same group. According to the simulation results, this scheme can reduce not only the number and length of interleavers, but also the complexity of IFFT/FFT and frequency detection.

Key words: interleave division multiple access (IDMA); two dimensional spreading; two dimensional interleaving

交织多址技术(IDMA)作为码分多址(CDMA)的一种改进形式,在2002年被首次提出^[1]。IDMA的基本思想是改变传统的CDMA通过不同的正交扩频码来区分用户的方法,通过对不同的用户采用不同的交织器以达到区分用户的目的。作为一种非正交的多址方式,IDMA不但继承了CDMA的所有优点,同时还具有它独特的优点,如低码率的信道编码、码片级交织以及低复杂度的迭代多用户检测等^[1]。此外,将IDMA与正交频分复用技术(OFDM)结合的OFDM-IDMA,不但可以获得IDMA抑制多址干扰(MAI)和OFDM消除符号间干扰(ISI)的优势,而且在吞吐量和可靠性方面优于OFDMA和OFDM-CDMA^[2-4]。

虽然IDMA利用不同的交织器来区分用户,并采用低复杂度的迭代检测,但接收端在进行检测时必须知道

发送端每个用户的交织器,并且每一次迭代检测过程中都需要进行交织与解交织运算,这样就需要对数据缓冲区进行频繁的读写操作。所以当用户数较多时,随着交织器数量和长度的增加,计算速度将逐渐降低,接收端所占用的内部存储资源将逐渐增加,收发端的处理时延也将逐渐增大,这将导致系统性能的下降^[5]。

另一方面,为了达到高速的数据传输,将OFDM与时频域二维扩频结合的正交频分和码分(OFCDM)技术被提出来了^[6]。OFCDM不但具有OFDM的所有优势,而且具有二维扩频带来的优点。首先,由于不同的子载波经历不同的衰落,可以通过频域扩频获得频率分集增益;另外,可以通过时域扩频获得灵活的数据传输速率^[7-9]。基于二维扩频的思想,本文提出了一种用于IDMA系统中的低复杂度的二维交织方法。该交织方法采用时域和频域二维交织,首先在频域对每个用户进行传统IDMA的编码与交织,然后在时域进行CDMA的扩频和交织。

* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(61101101);国家“863”计划资助项目(2011AA01A105);中央高校科研基本业务费资助项目(A03006023901037)。

网络与通信

Network and Communication

同时,该方法对所有用户按照时域扩频码进行分组,将时域扩频码相同的用户分为一组,并对每一组内的不同用户分配不同的交织器。这样,用户组间采用不同的正交扩频码区分,而用户组内采用不同的随机交织器区分。与传统的 IDMA 相比,本文提出的交织方法不但可以降低交织器的数量,还可以自由调整时频域交织器的长度,获得灵活的数据传输率。

1 IDMA 系统模型

IDMA 系统的发射机和接收机模型如图 1 所示,其中用户数为 K 。在发射端,用户数据序列首先进行低码率的信道编码,可以采用简单的重复码进行编码;然后将经过编码后的数据送入各自特定的交织器进行码片级的交织,其中每个用户的交织器是互不相同的;最后,在进行调制之后得到各用户的发送信号。IDMA 的接收端由一个 ESE 基本信号检测器和 K 个译码器组成。接收信号首先进入 ESE 检测器,进行干扰的估计与消除,抑制用户间的干扰;然后进行解交织,再进行与发送端对应的信道译码,输出的软信息在交织之后反馈给 ESE 检测器。以此进行循环迭代,直到达到最大迭代次数,译码器输出判决信息^[1]。

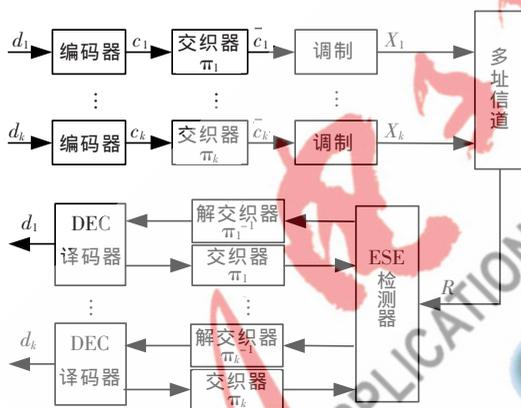


图1 IDMA 系统模型

从 IDMA 的接收机模型可知,接收端在进行信号检测时,每一次迭代检测都需要进行与发射端对应的解交织和交织操作。为此,接收端必须知道发送端每个用户的交织器,并且存储这些交织器序列,以便在迭代检测过程中实现解交织和交织。这样,随着系统用户数和交织长度的增加,接收端不得不采用大量的存储器来存储所有用户的交织信息,并且频繁地进行交织与解交织运算。这将极大地降低系统的计算速度,增加收发端的处理时延,从而导致系统性能的下降。

2 OFCDM 系统的二维扩频方法

OFCDM 系统发射机模型如图 2 上部分所示。考虑第 k 个用户,其数据信息比特流首先进行信道编码和调制,然后经过串并转换变成 M/N_F 个子数据流(其中 M 是总的子载波数目, N_F 为频域扩频码长度),即每 N_F 个子载波传输同一个数据符号。在串并转换之后,系统对

数据符号进行二维扩频。每个数据符号首先在频域通过长度为 N_F 的频域扩频码 C_F 进行扩频,然后将频域扩频后的信号在时域复制并与时域扩频码 C_T 相乘,得到二维扩频之后的信号。这样,通过二维扩频之后,每个数据符号可以扩展成 $N=N_F \times N_T$ 个符号。然后经过多路复用器将所有用户的信号叠加在一起,并采用频域交织器将频域上各子载波上的数据符号分散开来,使携带相同数据的子载波遭受不同的信道衰落,从而获得最大的频域分集增益。最后,在进行 IFFT 调制和插入循环前缀之后,得到最终的 OFCDM 发送信号。

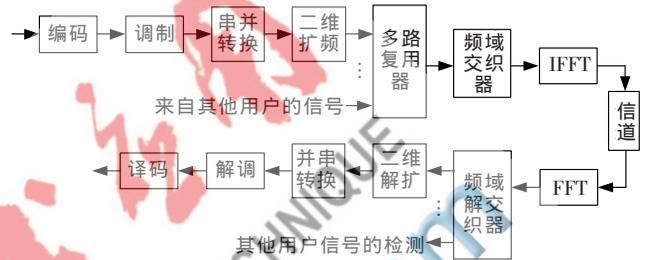


图2 OFCDM 系统发射机与接收机模型

OFCDM 系统的二维扩频部分包含频域扩频和时域扩频两部分,扩频码采用正交可变扩频因子 OVSF (Orthogonal Variable Spreading Factor)。关于时频二维扩频可如图 3 的例子所示,其中,时域扩频码序列为 $\{+1-1+1-1\}$,频域扩频码序列为 $\{+1-1\}$,即 $N=N_F \times N_T=4 \times 2$ 。

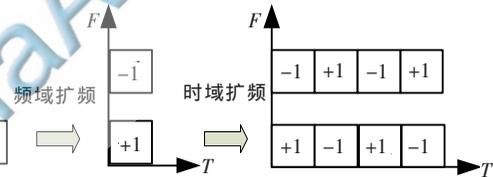


图3 二维扩频示意图

OFCDM 系统接收机模型如图 2 下部分所示。与发射机的处理相对应,接收信号首先移除循环前缀和 FFT 解调,在进行频域解交织之后,再进行二维解扩频。首先进行时域解扩频,可以采用简单的等增益合并方法;然后再进行频域解扩频,可采用参考文献[7]提出的混合检测方法;最后进行解调与译码,恢复出发射机的数据信息。

3 IDMA 系统中的低复杂度的交织方法

3.1 二维交织方法

基于上述 OFCDM 系统中的二维扩频的思想,下面提出了一种用于 IDMA 系统中的时频域二维交织方法。采用二维交织的 IDMA 的发射机与采用二维扩频的 OFCDM 发射机的区别如图 4 所示。该交织方法采用时域和频域二维交织,首先在频域对每个用户进行传统 IDMA 的编码与交织,所有用户的编码器完全相同;然后在时域对每个用户进行 CDMA 的正交扩频码扩频和交织;同时,按照时域扩频码对所有的用户进行分组,采用

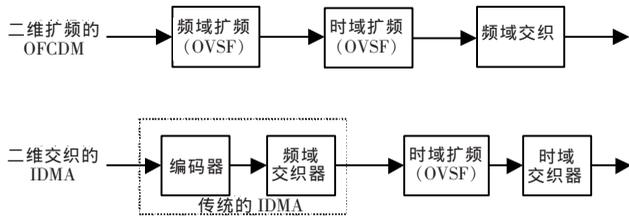


图4 二维交织的IDMA与二维扩频的OFCDM的区别

相同时域扩频码的用户分为一组。

所有用户的频域交织器和时域交织器采用下面的方法进行分配,用户组间采用不同的时域交织器,用户组内采用不同的频域交织器。比如系统总的用户数为 K ,时域正交扩频码个数为 J ,则所有 K 个用户可分为 J 组,记为 $\{\Omega_1, \dots, \Omega_j, \dots, \Omega_J\}$,每组的用户数为 K/J 。那么,时域交织器数目为 J ,频域交织器数目为 K/J 。这样,用户组间采用不同的正交扩频码和时域交织器以区分,而用户组内采用不同的频域交织器以区分。

对于第 k 个用户,若它属于第 j 组,即它的时域扩频码为 C_{Tj} ,那么第 k 个用户的数据经过二维扩频之后可表示为:

$$a_k = \pi_k^T (\pi_k^F (d_k C_{REP}) C_{Tj}) \quad (1)$$

其中, d_k 为第 k 个用户的数据符号, C_{REP} 为采用序列 $\{+1, -1, \dots, +1, -1\}$ 的重复码编码器, π_k^T 和 π_k^F 分别为第 k 个用户的频域和时域交织器。

3.2 接收机的信号检测

与发射端的二维交织对应,接收端的信号检测也分为两个步骤,如图5所示。首先,在时域进行时域解交织和时域信号检测,可以采用简单的等增益合并方法分别乘以每组用户的时域正交扩频码,得到时域扩频码相同的所有用户的信号叠加,消除用户组间的干扰;其次,在频域分别对每组内的用户进行传统IDMA的迭代检测,消除用户组内的干扰,恢复出发射信号。

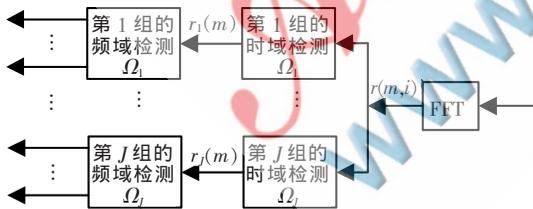


图5 采用二维交织的IDMA接收机框图

接收端在FFT解调之后,第 m 个载波第 i 个时刻的接收信号可表示为:

$$r(m, i) = \sum_{k=0}^{K-1} h_k(m) a_k(m, i) + N(m, i) \quad (2)$$

其中, $h_k(m)$ 表示第 k 个用户第 m 个子载波上的信道系数, $N(m, i)$ 表示高斯白噪声。

然后对每组信号进行时域检测,包括时域解交织和等增益合并。对于第 j 个用户组,其时域正交扩频码为

C_{Tj} ,则经过时域解交织和解扩频之后的信号为:

$$\begin{aligned} r_{\Omega_j}(m) &= \frac{1}{N_T} \sum_{k=0}^{N_T-1} r(m, i) C_{Tj}(i) \\ &= \sum_{k=0}^{\Omega_j} h_k(m) \pi_k(d_k C_{REP}(m)) + N_{Tj}(m) \end{aligned} \quad (3)$$

通过式(3)可知,接收信号 r_{Ω_j} 中包含采用相同时域扩频码的用户组 Ω_j 的信号之和,而用户组 Ω_j 中不同的用户采用不同的交织器,那么对于用户组 Ω_j 内的信号的检测,可以采用传统的IDMA多用户检测方法。

对于用户组 Ω_j 中的第 k 个用户,接收信号可表示为:

$$\begin{aligned} r_k(m) &= h_k(m) \pi_k(d_k C_{REP}(m)) + \\ &\quad \sum_{k'=1, k' \neq k}^{\Omega_j} h_{k'}(m) \pi_{k'}(d_{k'} C_{REP}(m)) + N_{Tj}(m) \\ &= h_k(m) \pi_k(d_k C_{REP}(m)) + \zeta_k(m) \end{aligned} \quad (4)$$

这样,ESE检测器输出的外信息为:

$$ese\{\pi_k(d_k C_{REP}(m))\} = 2h_k(m) \frac{r_k(m) - E\{\zeta_k(m)\}}{\text{Var}\{\zeta_k(m)\}} \quad (5)$$

然后再进行解交织和DEC译码,译码器输出的外信息再进行交织反馈给ESE检测器,以此进行迭代,直到达到最大迭代次数,由DEC译码器输出判决信息,恢复出发送信息。

4 仿真结果

本文所采用的仿真参数如下:用户数 $K=8$,调制方式为BPSK,用户的数据符号长度为 N_{inf} ,频域编码器采用长度为 N_F 的重复码,时域扩频采用长度为 N_T 的OVSF正交扩频码,子载波数为 $M=N_{inf} \times N_F$,分组数为 N_F 。

本文提出的二维交织方法的IDMA系统与传统的二维IDMA系统的性能比较如图6所示。图中,每个用户的数据符号长度 $N_{inf}=256$ 。为保证比较的公平性,一维IDMA的重复码编码长度为 $S=N_F \times N_T$,子载波数为 $M'=N_{inf} \times N_F \times N_T$,而二维IDMA采用两种不同的编码扩频长度,分别为 $N_F=16 \& N_T=2$ 和 $N_F=8 \& N_T=4$ 。

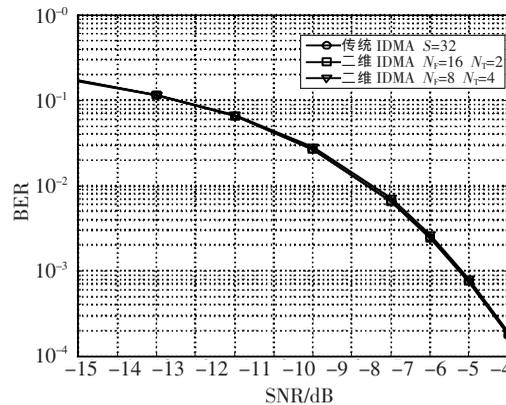


图6 二维IDMA与传统IDMA在AWGN信道下的性能比较

通过图6的BER性能曲线可知,在不同的编码扩频长度下,二维IDMA都可以达到传统一维IDMA完全一致的性能。在一维IDMA中,收发端所需要的交织器数

网络与通信 Network and Communication

量为 K 个, 交织器长度为 $N_{\text{inf}} \times N_{\text{F}} \times N_{\text{T}}$; 而在本文提出的二维 IDMA 中, 由于对所有 K 个用户进行分组, 用户组间可以混用交织器, 那么总共需要的交织器数量最低为 K/N_{T} , 交织器长度为 $N_{\text{inf}} \times N_{\text{F}}$ 。由此可见, 本文提出的二维 IDMA 可以极大地减少收发端的交织器数量与长度, 从而可以提高系统处理速度, 降低接收端占用的内部存储资源, 并减少收发端的处理时延。

此外, 在一维 IDMA 中, IFFT/FFT 变换的长度为 $N_{\text{inf}} \times N_{\text{F}} \times N_{\text{T}}$, 则其复杂度为 $(N_{\text{inf}} \times N_{\text{F}} \times N_{\text{T}}) \log(N_{\text{inf}} \times N_{\text{F}} \times N_{\text{T}})$ 。而二维 IDMA 中 IFFT/FFT 变换的长度为 $N_{\text{inf}} \times N_{\text{F}}$, 其复杂度为 $N_{\text{T}} \times (N_{\text{inf}} \times N_{\text{F}}) \log(N_{\text{inf}} \times N_{\text{F}})$ 。即在 IFFT/FFT 操作部分, 二维 IDMA 比传统 IDMA 的复杂度降低了 $\log(N_{\text{T}}) / \log(N_{\text{inf}} \times N_{\text{F}} \times N_{\text{T}})$ 。另外, 二维 IDMA 在接收端进行频域检测时, 由于采用分组检测, 组内的用户数为采用相同正交扩频码的用户, 那么对于每个用户, 其频域检测复杂度将远低于一维 IDMA 系统, 且迭代检测的收敛速度将得到明显的提高。

本文提出了一种用于 IDMA 系统中的低复杂度的二维交织方法。通过仿真结果可知, 在保持与传统一维 IDMA 性能一致的前提下, 本文提出的二维交织方法不但可以降低交织器的数量和长度, 还可以降低 IFFT/FFT 操作和频域检测的复杂度。

参考文献

- [1] LI P, LIU L H, WU K Y, et al. Interleave division multiple-access[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(4): 938-947.
- [2] LI P, GUO Q H, TONG J. The OFDM-IDMA approach to wireless communication systems[J]. IEEE Wireless Communications, 2007, 14(3): 18-24.
- [3] KUSUME K, BAUCH G, UTSCHICK W. IDMA vs. CDMA: analysis and comparison of two multiple access schemes[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(1): 78-87.
- [4] HAMMARBERG P, RUSEK F, EDFORS O. Channel estimation algorithms for OFDM-IDMA: complexity and performance[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(5): 1722-1732.
- [5] WU H, LI P, ALBERTO P. User-specific chip-level interleaver design for IDMA systems[J]. Electronics Letters, 2006, 42(4): 233-234.
- [6] ZHOU Y Q, NG T S, WANG J Z, et al. OFCDM: a promising broadband wireless access technique [J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(3): 38-49.
- [7] ZHOU Y Q, WANG J Z, SAWAHASHI M. Downlink transmission of broadband OFCDM systems-part I: hybrid detection[J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53(4): 718-729.
- [8] LI P, HAMOUDA W. Performance of multiple-input and multiple-output orthogonal frequency and code division multiplexing systems in fading channels[J]. IET Communications, 2011, 5(1): 1-11.
- [9] LU H Y. Iterative multiuser detectors for spatial-frequency-time-domain spread multi-carrier DS-SS-CDMA systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(4): 1640-1650.

(收稿日期: 2013-05-17)

作者简介:

彭涛, 男, 1985 年生, 博士研究生, 主要研究方向: 无线通信中的信号检测和多址技术。

肖悦, 男, 1979 年生, 博士, 副教授, 主要研究方向: 无线通信中的信号处理和系统设计。

李少谦, 男, 1957 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 扩频通信, 移动通信。