

多载波码分多址在低密度二分图上的建模与分析*

文磊, 雷菁, 魏急波, 王建新

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要:多载波码分多址是移动通信重要的多址技术之一,传统方法将扩频序列的构造和多用户检测单独考虑,未能做到发射机和接收机的一体化设计。受到低密度奇偶校验码的启发,基于图论建立多载波码分多址收发机模型,采用二分图定义码片和数据符号间的扩频关系。在此基础上,利用适合低密度二分图的消息传递算法完成多用户迭代检测,推导并分析洪水消息传递和串行消息传递两种检测机制。仿真结果表明,当传统的多载波码分多址系统陷入严重过载而不能正常通信的情况下,基于低密度二分图的多载波码分多址系统依然能够达到理想的传输性能,为下一代移动通信系统的设计提供了有益的参考。

关键词:二分图;多载波码分多址;迭代检测;消息传递机制

中图分类号:TN911.22 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2016)03-148-06

Modeling and analysis of multicarrier code division multiple access upon Tanner graph

WEN Lei, LEI Jing, WEI Jibo, WANG Jianxin

(College of Electronic Science & Engineering, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: MC-CDMA (multicarrier-code division multiple access) is an important multiple access technique for mobile communications. In conventional MC-CDMA, construction of spreading sequences and multiuser detection are considered separately, which means that the transmitter and the receiver are not designed jointly. Inspired by LDPC (low density parity check) codes, the transceiver models of MC-CDMA based on graph theory were designed, and the low density Tanner graph was used to describe the relationship between spreading chips and data symbols. In addition, message passing algorithm, which was suitable for the Tanner graph, was utilized to perform iterative multiuser detection. Flooding and serial schedules for the message passing were deduced and analyzed. Simulation results show that the conventional MC-CDMA cannot perform well under the overloading conditions, while the proposed low density Tanner graph for MC-CDMA achieves satisfactory performance, which provides the useful reference for the design of next generation mobile networks.

Key words: Tanner graph; multicarrier code division multiple access; iterative detection; message passing

随着移动用户数量的急剧增长,要求通信网络能提供更大的系统容量。多载波调制技术由于具有较高的频谱效率和频率分集,并且可以有效地对抗多径所引起的符号间串扰,已经成为高速数据传输的关键技术,正交频分复用便是其典型代表^[1]。多载波码分多址(MultiCarrier-Code Division Multiple Access, MC-CDMA)集中了码分和正交频分复用的优点^[2-3],不同用户可共用子载波传送信号^[4]。随着移动终端用户的爆发式增长,用户数量经常超出系统容量,即陷入过载的状态。此时各用户扩频码之间的正交性无法得到保障,多址干扰变得非常严重^[5]。多用户检测是消除或减少过载系统多址干扰和符号间干扰的有效方法,已有一些列的研究成果,比如采用迭代计

算方法进行多用户检测以及分组扩频算法等^[6-8]。但如何设计更优的扩频码结构、提高多用户检测算法的收敛性能等,是急待解决的课题,已成为制约 MC-CDMA 应用的技术瓶颈。借鉴低密度奇偶校验码(Low Density Parity Check, LDPC)的低密度校验矩阵^[9],建立了基于低密度 Tanner 图^[10]的 MC-CDMA 系统(Tanner-MC-CDMA),并设计两类消息迭代检测算法。

1 Tanner-MC-CDMA 传输链路模型

1.1 发送端链路

Tanner-MC-CDMA 的发送端如图 1 所示。假设 K 个用户同时传送信号,每个用户的数据经过前向纠错编码和符号映射以后,形成图 1 中圆圈

* 收稿日期:2015-03-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61372098);湖南省自然科学基金资助项目(S2012J5042)

作者简介:文磊(1980—),男,湖南长沙人,讲师,博士,E-mail:newton1108@126.com

所代表的数据符号。然后进行扩频处理,基带数据被调制到高速码片序列上,即图1中矩形所代表的扩频码片。经过扩频调制的数据,再送入快速傅里叶反变换模块完成正交频分多路复用技术(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)调制,并加入循环前缀。

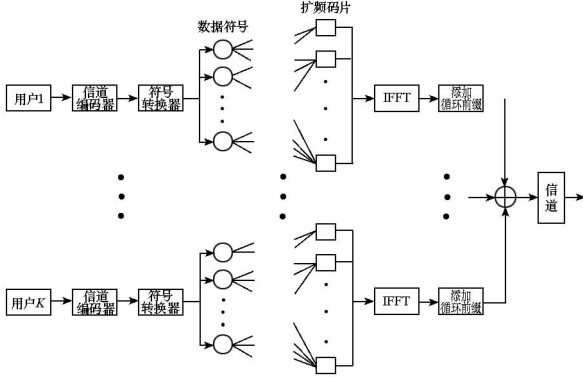


图1 Tanner-MC-CDMA 发送端链路

Fig.1 Transmitter of Tanner-MC-CDMA

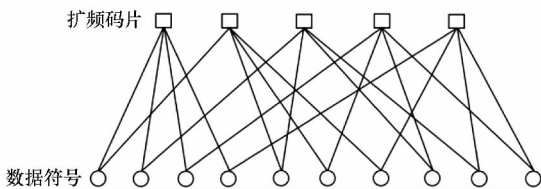
MC-CDMA 的 Tanner 图包含数据符号和扩频码片两类节点,分别对应 MC-CDMA 系统中映射后的数据符号和扩频序列;如果某一数据符号被调制到扩频码片上,那么就用一条边将该数据符号和对应的扩频码片连接起来;如果扩频码片为一个数据符号扩频序列中的非零位,那么就用一条边将该扩频码片和对应的数据符号连接起来;Tanner 图中边的数量和扩频矩阵中非零元素的数量相同,与数据符号相连的边的数量称为列重,与扩频码片相连的边的数量称为行重。

图2给出了 Tanner-MC-CDMA 扩频矩阵和对

$$\begin{bmatrix}
 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1
 \end{bmatrix}$$

(a) 扩频矩阵

(a) Spreading matrix



(b) 扩频 Tanner 图

(b) Spreading Tanner graph

图2 Tanner-MC-CDMA 扩频矩阵和 Tanner 图

Fig.2 Spreading matrix and Tanner graph of Tanner-MC-CDMA

应 Tanner 图的一个简单示例,当中包含了 5 个扩频码片、10 个数据符号以及相应的边。可以看到,其结构与 LDPC 码的 Tanner 图相似,关键之处在于每个数据符号只关联到少量的扩频码片,因而具有低密度特性。

基于低密度 Tanner 图的 MC-CDMA 呈现低密度特性:每一个数据符号只在少数几个码片上进行非零位扩频调制,即 Tanner 图的列重很小;而每一位码片也只与少量的数据符号相连,即 Tanner 图的行重很小。带来的好处是,扩频码片在传输过程中所受到的噪声干扰,只会直接影响到少量的数据符号,多址干扰得到有效抑制,即使系统工作在严重过载区域,也能达到理想的通信性能。

1.2 接收端链路

Tanner-MC-CDMA 的接收端链路如图3所示。接收信号先去除循环前缀并进行正交解调。然后将各路子载波所对应的码片,解扩还原为映射数据符号,同时完成多用户检测过程。再经过符号解映射和前向纠错译码,得到原始的用户信息序列的估计值。

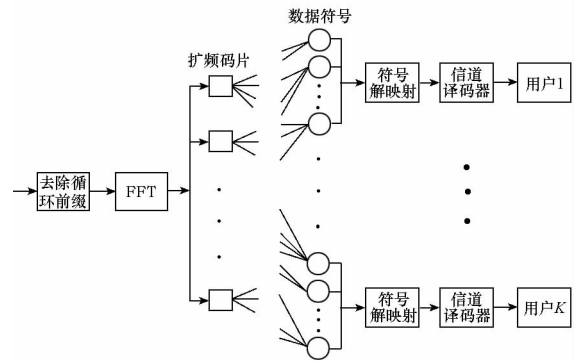


图3 Tanner-MC-CDMA 接收端链路

Fig.3 Receiver of Tanner-MC-CDMA

与传统 MC-CDMA 相比,图3中接收端链路的特点在于:

1) 低密度的扩频关系,大幅降低了多用户检测的计算复杂度,采用准最优的消息传递算法,即使在系统过载和多径衰落严重的条件下,低密度结构仍能实现理想的频率分集,提供可靠的检测性能,有效提升了系统容量和数据传输效率;

2) 环是低密度 Tanner 图的重要设计指标,无环情况下的 Tanner 图能实现最优检测,然而在有限长的 Tanner 图中,不可能完全消除环结构,大量短环的存在会导致数据符号在消息迭代过程中频繁传递正反馈信息,影响符号的判决,这对于多

用户检测而言是不希望出现的。

2 Tanner 图上的多用户检测

2.1 多用户检测算法比较

最大似然序列估计是最优的多用户检测^[11], 提供了性能改善的极限值, 但计算复杂度过高。低复杂度的线性检测器受到人们的重视, 其中解相关器无须估计各用户的信号功率, 可有效抵抗远近效应, 同时也会放大信道噪声^[12]。最小均方误差检测器是另一类线性检测器^[13], 但涉及互相关矩阵求逆, 当用户数量很大时, 需要分解多项式以简化求逆过程。多项式扩展检测器利用相关矩阵的多项式扩展先对匹配滤波器的输出进行运算, 再进行判决^[14], 具有较为简单的结构。非线性的串行干扰消除^[15]在接收信号中对多个用户逐个进行数据判决, 判出一个就重新生成并减去该用户信号造成的多址干扰, 在性能上比传统检测器有较大提高。并行干扰消除多用户检测器^[16]具有多级结构, 其每一级先进行并行估计和去除各个用户造成的多址干扰, 然后进行数据判决。判决反馈检测器^[17]首先对接收信号进行线性处理, 然后进行检测。

需要指出的是, 以上提到的各类多用户检测都是基于用户数量不超过系统容量的条件设计的。当系统过载时, 这些算法都不能有效地消除多址干扰, 使得系统的误码率急剧升高, 性能下降。因此, 如何结合扩频码的设计与多用户检测, 使得即使出现系统过载情况, 也能保证可靠的通信传输质量, 成为制约 MC-CDMA 实际应用的关键。

2.2 洪水消息传递多用户检测

对于传统 MC-CDMA 系统而言, 消息传递算法不具备可实现性, 原因在于扩频矩阵的高密度特性。消息传递检测属于非线性算法, 如果在高密度扩频码中进行消息迭代, 计算复杂度太高。对于 Tanner-MC-CDMA 而言, 消息传递算法恰好可以充分发挥其性能, 下面首先推导 Tanner-MC-CDMA 的洪水消息传递检测算法。

发送端第 k 个用户待扩频信号为 x_k , 接收端第 n 个子载波的接收信号为 y_n :

$$y_n = \sum_{k=1}^K s_{n,k} x_k + v_n \quad (1)$$

其中: $s_{n,k}$ 为 Tanner 图中的某一元素, 表示第 k 个用户的第 n 位码片; v_n 为高斯白噪声。令 $\psi_n =$

$\{k: s_{n,k} \neq 0\}$ 表示与第 n 位码片相连的符号集合, $\varepsilon_k = \{n: s_{n,k} \neq 0\}$ 表示与第 k 个用户相连的码片集合。每个码片向与其相连的用户传递消息 $L_{c_n \rightarrow u_k}$, 每个用户也向与其相连的码片传递消息 $L_{u_k \rightarrow c_n}$, 迭代过程如下:

1) 码片单元的消息传递。每一码片接收到信道消息和用户信息:

$$L_{c_n \rightarrow u_k} = f(u_k | y_n, L_{u_{k'} \rightarrow c_n}, k' \in \psi_n \setminus k) \quad (2)$$

其中, $\psi_n \setminus k$ 表示 ψ_n 中除了用户 k 以外的所有用户。式(2)可推导为:

$$\begin{aligned} f(u_k | y_n, L_{u_{k'} \rightarrow c_n}, k' \in \psi_n \setminus k) \\ = \ln \left[\sum p(y_n | \mathbf{X}) p_n(\mathbf{X} | x_k) \right] \\ = \ln \left[\sum p(y_n | \mathbf{X}) \prod_{(k' \in \psi_n \setminus k)} p_n(x_{k'}) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

其中, \mathbf{X} 为发送信号, 则 $p(y_n | \mathbf{X})$ 和 $p_n(x_{k'})$ 为:

$$p(y_n | \mathbf{X}) = \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \|y_n - s_{[n]} x_{[n]}\|^2\right) \quad (4)$$

$$p_n(v_{k'}) = \exp(L_{u_{k'} \rightarrow c_n}) \quad (5)$$

其中, σ^2 为高斯白噪声的方差, $s_{[n]}$ 为 Tanner 图的第 n 行, $x_{[n]}$ 为 Tanner 图的第 n 列。将式(4)和式(5)应用到式(3), 可以得到:

$$\begin{aligned} L_{c_n \rightarrow u_k} = \\ \kappa_{n,k} \max_{x_k}^* \left(\sum_{k' \in \psi_n \setminus k} L_{u_{k'} \rightarrow c_n} - \frac{1}{2\sigma^2} \|y_n - s_{[n]} x_{[n]}\|^2 \right) \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $\kappa_{n,k}$ 为归一化因子, \max^* 为:

$$\max^*(x, y) = \max(x, y) + \ln(1 + e^{-|x-y|}) \quad (7)$$

2) 用户单元的消息传递。每一个用户单元将接收到的信息累加:

$$L_{u_k \rightarrow c_n} = \sum_{n' \in \varepsilon_k \setminus n} L_{c_{n'} \rightarrow u_k} \quad (8)$$

其中, $\varepsilon_k \setminus n$ 表示 ε_k 中除 n 以外的所有码片。

3) 判决。

$$L_{u_k} = \sum_{n \in \varepsilon_k} L_{c_n \rightarrow u_k} \quad (9)$$

据此可以对符号进行硬判决:

$$\hat{x}_k = \arg \max_{x_k} L_{u_k} \quad (10)$$

2.3 串行消息传递多用户检测

在洪水消息传递机制中, 码片和用户都是同时接收和传送消息, 可以并行操作, 具有实时性高的优点, 但在实际运行过程中会占用大量硬件资源, 尤其需要大容量的存储器保存中间变量。除此之外, 洪水消息传递机制的消息收敛特性并非最优。为了寻求性能与复杂度之间更好的平衡, 下面给出基于扩频码片的串行消息

传递机制:

1) 外循环:对码片顺序更新消息。

$$W = \sum_{k \in \psi_n} L_{u_k \rightarrow c_n} \quad (11)$$

2) 内循环:与码片相连的用户更新消息。

$$L_{temp} = L_{u_k} - L_{u_k \rightarrow c_n} \quad (12)$$

$$L_{c_n \rightarrow u_k} =$$

$$\kappa_{n,k} \max_{x[n]}^* (W - L_{temp} - \frac{1}{2\sigma^2} \|y_n - s_{[n]} x_{[n]}\|^2) \quad (13)$$

$$L_{u_k} = L_{temp} + L_{c_n \rightarrow u_k} \quad (14)$$

3) 判决。

$$\hat{x}_k = \arg \max_{x_k} L_{u_k} \quad (15)$$

串行消息传递机制的优势在于,更新后的消息无须等待本轮迭代完成,就能马上融入消息传递,提高了消息收敛的效率,付出的代价在实时性上不如洪水消息传递机制。

3 计算机仿真

为了对 Tanner-MC-CDMA 进行验证,进行了性能测试。符号映射方式为正交相移键控 (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK),信道编码为(255,239)RS码,256点OFDM,子载波带宽为10 kHz。测试信道为多径衰落信道模型 SUI-3。还测试了传统 MC-CDMA 的性能,其扩频序列采用文献[18]中的 Welch bound equality 算法,多用户检测为最小均方误差 (Minimum Mean Square Error, MMSE) 和串行干扰消除。

3.1 150% 接入负载的性能比较

图4显示了系统接入负载为150%时的性能。低密度 Tanner 图的参数包括:每个数据符号与3位码片有边相连,即 Tanner 图的列重等于3;每位码片分别与5个数据符号相连,即 Tanner 图的行重等于5;Tanner 图中的最短环长等于6。可以得到以下结论:

1) 传统 MC-CDMA 工作在过载区域时,严重的多址干扰和扩频序列的非正交性使得系统无法达到理想的性能,尤其在中高信噪比区间,误码率为 5×10^{-4} 时便停止下降,出现了错误平台;

2) Tanner-MC-CDMA 明显优于传统 MC-CDMA,以5次迭代为例,当误码率为 5×10^{-4} 时,相对于传统 MC-CDMA,采用洪水消息传递机制的 Tanner-MC-CDMA 能带来约 4.5 dB 的增益,采用串行消息传递机制的 Tanner-MC-CDMA 能带来约 6 dB 的增益;

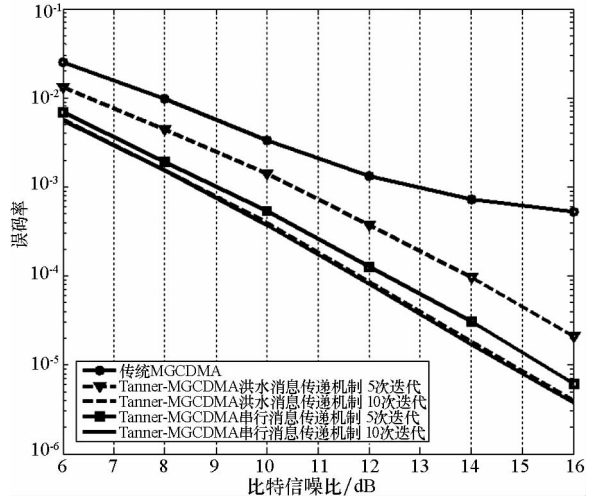


图4 150% 接入负载的性能比较

Fig. 4 Comparison of 150% loading

3) 在10次迭代时,两种消息传递机制下的 Tanner-MC-CDMA 曲线基本重合,都明显优于传统 MC-CDMA。由此可见,当迭代次数足够大时,两种消息传递机制具有相同的消息收敛性能,所达到的误码率也趋于一致,此时洪水消息传递机制因其高效的并行处理速度而更具优势。

3.2 300% 接入负载的性能比较

图5显示了系统接入负载为300%时的误码率情况。其中低密度 Tanner 图的列重等于3,行重等于9,最短环长等于6。可以看到,传统 MC-CDMA 的性能非常差,误码率很高,无法进行正常的通信。与之形成对比的是 Tanner-MC-CDMA,虽然相对于图4中150%的接入负载,图5中 Tanner-MC-CDMA 性能有所下降,但却远优于传

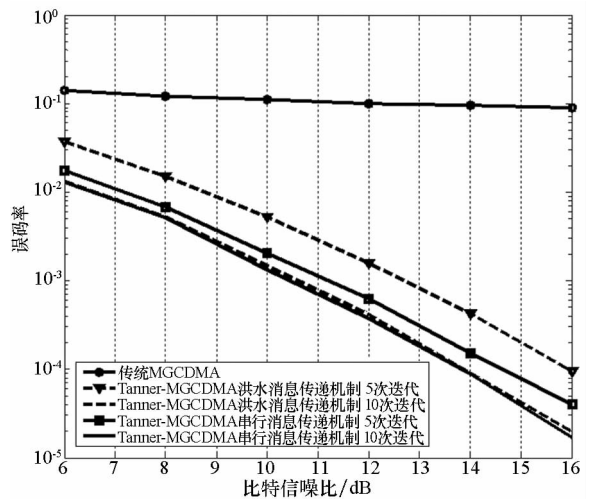


图5 300% 接入负载的性能比较

Fig. 5 Comparison of 300% loading

统 MC-CDMA, 这主要得益于低密度结构和高效的
消息传递算法, 从而有效地消除了多址干扰。
在 5 次迭代时, 串行消息传递机制仍然优于洪水
消息传递机制约 1.5 dB; 而在 10 次迭代时, 两种
消息传递机制的性能相当。需要指出的是, 虽然
取 5 次迭代时, 串行消息传递机制的检测性能优
于洪水消息传递机制, 但串行处理消息的方式会
带来更长的计算时间, 接收机的系统时延会大于
洪水消息传递机制。在实际应用中, 需要根据实
际通信系统的要求, 选择合适的消息传递方式进
行多用户检测。

3.3 短环对检测性能的影响分析

为了测试短环对多用户检测性能的影响, 图
6 分析了 Tanner-MC-CDMA 在 300% 接入负载时,
采用不同环结构的 Tanner 图的性能。多用户迭
代检测采用串行消息传递机制, 最大迭代次数取
5。可以看到, 通过消除长度为 4 的环, 系统性能
有所提升, 这主要得益于减少了消息传递过程
中的正反馈, 使得被严重干扰的数据符号能够
更加充分地利用其余可靠数据符号的消息, 完
成符号检测。一般来说, Tanner 图的最短环长
越长, 多用户检测的性能越好, 但如何消除较
长的环以及相应的搜索算法的设计, 也是系统
开发过程中必须考虑的问题。

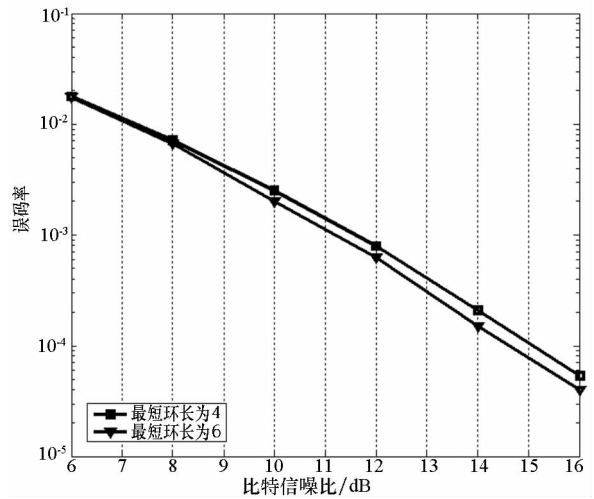


图 6 短环对检测性能的影响

Fig. 6 Effect of short cycle on detection performance

3.4 不同用户间性能比较

图 7 分析了 Tanner-MC-CDMA 在 300% 接入
负载时不同用户的性能, Tanner 图的最短环长为
6, 多用户迭代检测采用串行消息传递机制, 最大
迭代次数取 5。不难发现, 各用户间的性能有差
别, 随着信噪比的增加, 性能差异有所增大。

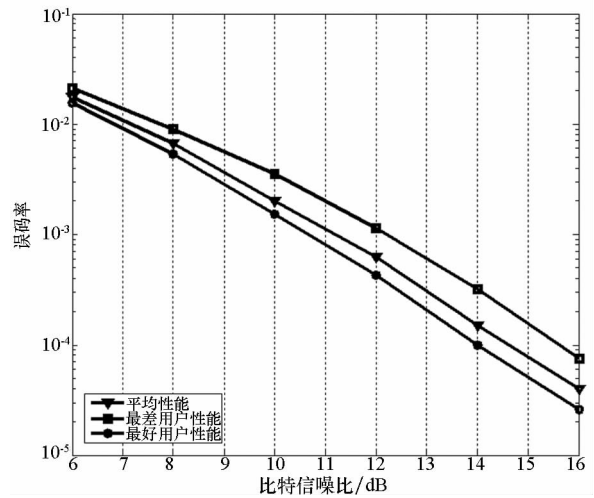


图 7 不同用户间性能比较

Fig. 7 Performance comparison of different users

4 结论

传统 MC-CDMA 难以在系统过载时达到理想
性能, 本文针对性地提出了基于低密度 Tanner 图
的 MC-CDMA 系统。建立了 Tanner-MC-CDMA 的
链路模型, 分别推导了洪水消息传递和串行消息
传递两种迭代检测机制。性能测试表明, 系统过
载时, Tanner-MC-CDMA 的性能远优于传统 MC-
CDMA。消息传递机制方面, 在 5 次迭代时, 串
行消息传递机制比洪水消息传递机制性能更优,
但串行传递消息的实时性不如洪水消息传递; 在
10 次迭代时, 两种消息传递机制的性能相当, 实
际应用中可灵活选择合适的消息传递方式进行多
用户检测。Tanner 图中的短环也是影响多用户
检测性能的关键因素, 最短环长越长, 检测性能
越好。Tanner-MC-CDMA 能够兼容 CDMA 系统,
有效地抑制了多址干扰和多径干扰, 改善了系统
性能, 提高了系统容量。

参考文献 (References)

- [1] Li F, Xu Z B. Variational inference based data detection for OFDM systems with imperfect channel estimation[J]. IEEE Transactions on Vehicle Technology, 2013, 62(3): 1394 - 1399.
- [2] Mukherjee M, Kumar P. Variable rate transmission schemes for CI/MC-CDMA system[J]. IEEE Communication Letters, 2012, 16(7): 1137 - 1139.
- [3] Srikanth S, Murugesu Pandian P A, Fernando X. Orthogonal frequency division multiple access in WiMAX and LTE: a comparison [J]. IEEE Communication Magazine, 2012, 50(9): 153 - 161.
- [4] Juntti M, Vehkaperä M, Leinonen J, et al. MIMO MC-

- CDMA communications for future cellular systems[J]. IEEE Communication Magazine, 2005, 43(2): 118 – 124.
- [5] Giannetti F, Lottici V, Stupia I. Theoretical performance of bandlimited MC-CDMA systems over nonlinear channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(6): 1638 – 1642.
- [6] Simon E P, Gaillot D P, Degardin V. Synchronization sensitivity of block-IFDMA systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(1): 256 – 267.
- [7] Aktas E. Iterative message passing for pilot-assisted multiuser detection in MC-CDMA systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(11): 3353 – 3364.
- [8] Razavi R, Al-Imari M, Hoshyar R. On receiver design for uplink low density signature OFDM (LDS-OFDM) [J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(11): 3499 – 3508.
- [9] Huang C H, Li Y, Dolecek L. Gallager B LDPC decoder with transient and permanent errors[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(1): 15 – 28.
- [10] Tolouei S, Banihashemi A H. Lowering the error floor of LDPC codes using multi-step quantization [J]. IEEE Communication Letters, 2014, 18(1): 86 – 89.
- [11] Gazor S, Derakhian M, Tadiou A A. Computationally efficient maximum likelihood sequence estimation and activity detection for MPSK signals in unknown flat fading channels[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2010, 17(10): 871 – 874.
- [12] Tulino A M, Li L, Linbo S. Spectral efficiency of multicarrier CDMA[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51(2): 479 – 505.
- [13] Zhang K L, Guan Y L, Shi Q H. Complexity reduction for MC-CDMA with MMSEC [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(3): 1989 – 1993.
- [14] Gotz R, Abrao T. Hybrid 1 – opt local search polynomial expanded linear multiuser detectors[J]. IEEE Latin America Transactions, 2013, 11(5): 1169 – 1175.
- [15] Andrews J G, Meng T H Y. Performance of multicarrier CDMA with successive interference cancellation in a multipath fading channel[J]. IEEE Transactions on Communications, 2004, 52(5): 811 – 822.
- [16] Al-fuhaidi B A, Hassan H E A, Salah M M, et al. Parallel interference cancellation with different linear equalization and rake receiver for the downlink MC-CDMA systems[J]. IET Communications, 2012, 6(15): 2351 – 2360.
- [17] de Lamare R C. Adaptive and iterative multi-branch MMSE decision feedback detection algorithms for multi-antenna systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(10): 5294 – 5308.
- [18] Ulukus S, Yates R D. Iterative construction of optimum signature sequence sets in synchronous CDMA systems[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, 47(5): 1989 – 1998.