

稀疏图 DS-CDMA 系统设计*

文磊¹, 雷菁¹, 魏急波¹, 李赛斯²

(1. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073; 2. 湘潭大学 信息工程学院, 湖南湘潭 411105)

摘要: DS-CDMA 是在扩频技术上发展起来的多址接入方式,但在用户接入数量过载时难以保证高质量的通信性能。基于此,提出了一种基于稀疏图的 DS-CDMA 系统。该系统以低密度二分图的形式来描述扩频码片和用户之间的关系,使得参与通信的每个用户只在少量码片上进行非零位扩频调制,最大限度地减少了用户间的相互干扰。借助图模型的相关理论,把适合于稀疏图的置信度传播算法应用于该系统,进行多用户检测,通过码片与用户之间的消息迭代来消除噪声和多址干扰带来的影响。结合计算机仿真,从不同的角度测试了系统的误码率等性能。理论分析与性能验证表明,稀疏图 DS-CDMA 在接入用户数量远远超过系统容量的情况下,依然具有优良的性能。

关键词: DS-CDMA; 稀疏图; 扩频; 多址干扰; 多用户检测

中图分类号: TN911.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2014)04-0089-08

Design of DS-CDMA system on sparse graph

WEN Lei¹, LEI Jing¹, WEI Jibo¹, LI Saisi²

(1. College of Electronic Science & Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Information Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: DS-CDMA developed on spread spectrum is a multiple access technology, but it is difficult for such a system to attain a satisfactory performance under overloading conditions. A sparse DS-CDMA system is presented. It is possible to represent the relationship between the chips and the users using a low density Tanner graph. By doing so, each user is only connected to limited non-zero chips, which can minimize the multiuser interference. According to graph theory, a belief propagation algorithm, which is suitable to the case of low density graph, was adopted by the sparse DS-CDMA to perform multiuser detection. Thus the negative effect of channel noisy and interference can be eliminated. Computer simulation was done. The theory analysis and simulation results showed that the sparse DS-CDMA can achieve excellent performance even under serious overloading conditions.

Key words: DS-CDMA; low density graph; spread spectrum; multiple access interference; multiuser detection

DS-CDMA 是直接序列码分多址 (Direct Sequence-Code Division Multiple Access) 的简称,最早由美国高通公司推广并应用,近年来由于技术和市场等多种因素作用得以迅速发展^[1]。DS-CDMA 基于码分扩频技术和多址技术,为每个用户分配各自特定的伪随机码,各个伪随机码之间具有正交或准正交特性,从而在时间、空间和频率上都可以重叠。通信过程中,用户将需要传送的具有一定信号带宽的信息数据,用一个带宽远大于原信号带宽的高速伪随机码模 2 相加进行调制,使原数据信号的带宽被扩展,从而获得宽带扩频信号,再经载波调制并发送出去。接收端使用与发送端同步的伪随机码,与接收的带宽信号作解扩处理,把宽带信号还原成包含信息数据的窄

带信号,以实现信息的传输^[2]。由于不同用户传输信息所用的信号依靠各自不同的伪随机码区分,从频域或时域来观察,多个用户的信号是互相重叠的,但不同用户伪随机序列之间的非严格正交性,会带来多址干扰,需要进行多用户检测来消除其影响^[3]。此外,DS-CDMA 采用了多种分集方式,除了传统的空间分集外,宽带传输起到了频率分集的作用,同时在基站和移动台采用了 RAKE 接收机技术,相当于时间分集的作用。由于采用了扩频技术,DS-CDMA 具有抗窄带干扰、抗多径衰落和保密性好等优点^[4]。

在 DS-CDMA 的接入控制算法中,系统容量定义为能够同时接入的最大用户数。由于 DS-CDMA 是一个动态网络,小区会随着接入用户数

* 收稿日期:2013-11-18

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

及业务情况的变化发生着相应的变化,产生小区的“呼吸效应”^[5]。当新的用户进入网络时,就意味着多址干扰的增大,其他用户的服务质量便会下降。虽然 DS-CDMA 具有“软容量”特性,即在业务高峰期通过降低通信质量,达到增加系统用户数量的目的,以避免系统阻塞的现象^[6],但实际情况是,当接入用户数量出现过载,即超出系统容量时,会带来一系列的问题:(1)无法实现各用户扩频序列之间的正交性,接收端无法完成正交接扩,多址干扰会变得非常严重;(2)现有的多用户检测技术均只能在用户数量小于或者略微大于系统容量的情况下才能有效工作,当过载现象严重,比如数倍于系统容量时,则无法正常工作;(3)严重的多址干扰和低效的多用户检测技术,使得系统的误码率急剧上升,信号传输的稳定性和可靠性大打折扣,具体表现为用户接入时间变长、通信时延增大甚至出现掉线等现象,安全通信更加无从谈起。近年来,随着无线通信业务的日益普及,用户数量呈几何级增长,多址接入系统经常陷入过载、甚至严重过载的困境,传输链路的可靠性与有效性无法得到保障,这已成为制约无线通信数据业务和用户接入数量增长不可忽视的技术瓶颈。

过载情况下的 CDMA 系统性能改善已有相关的研究,比如采用非线性算法在低密度扩频序列上进行多用户检测,以及分组扩频算法等^[7-9]。但如何有效构造扩频序列、非线性检测算法的特性分析以及更进一步利用迭代反馈信息以提升系统的传输性能等关键技术问题,目前仍然没有给出较好的解决方案。受到图论的启发,本文设计了一种基于稀疏图的 DS-CDMA 系统,其核心思想在于:每个用户的基带数据仅仅在少量的码片上进行非零位扩频调制,而每位扩频码片也仅仅被少量用户进行非零位扩频调制。基于此,多用户与扩频序列之间的关系可以建模成一张稀疏图。由于置信度传播算法非常适合于在低密度的图模型中进行迭代运算,因此通信系统的接收端利用该算法在稀疏图上完成多用户迭代检测。稀疏图 DS-CDMA 系统的核心思想是:发射端利用稀疏图结构尽可能地优化用户间干扰模式,从而大幅降低用户间干扰;接收端利用稀疏图完成准最优的置信度传播算法,消除或减少用户间干扰,而稀疏图结构也有利于置信度传播算法的低复杂度实现。更为重要的是,该方案在接入用户过载的情况下,仍然能够达到优良的误码率性能,为有效解决多址系统接入过载的难题提供了全新的

思路。

1 稀疏图 DS-CDMA 传输系统建模

1.1 发射机模型

基于稀疏图的 DS-CDMA 传输系统发射机模型如图 1 所示。假设有 K 个用户,每个用户的信息数据经过信道编码和基带调制器以后,得到具有一定带宽的信息序列。然后将其与扩频码生成器所生成的高速码片序列进行模 2 和,完成扩频调制,使信号带宽远大于原始信号带宽,频谱得到扩展。最后再经过载波调制,形成射频信号发射出去。

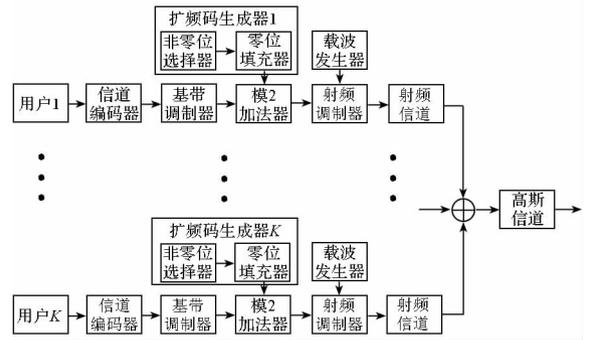


图 1 稀疏图 DS-CDMA 发射机模型

Fig. 1 Transmitter model of sparse DS-CDMA

在分析图 1 之前,我们给出“码片重量”和“符号重量”的定义。

定义 1 每个用户扩频序列中非零码片的数目,称为该用户的码片重量。

定义 2 每位码片在各用户扩频序列中占据非零位的数目,称为该码片的符号重量。

从各模块的功能来看,图 1 所示的稀疏图 DS-CDMA 发射机模型与现有的非稀疏 DS-CDMA 系统相比,并没有差别。值得注意的是,图 1 的关键之处在于各用户扩频序列的产生,即扩频码生成器。现有的非稀疏 DS-CDMA 系统采用的扩频码,包括 Walsh 码、长伪随机码和短伪随机码,都属于高密度序列,即码序列中“1”和“0”的数量大致相当^[10]。换言之,相对于扩频码总的码片数,这些扩频序列中“1”所占的比重较高,其码片重量都很大。由于小区的用户接入负载达到或超过系统容量取决于业务数据量和网络运营商愿意承担的风险,在网络规划初期,现有的非稀疏 DS-CDMA 系统所设计的用户接入负载一般为系统容量的 60%^[11]。然而面对着越来越多的用户终端和越来越高的数据业务,预设的负载往往显得捉襟见肘,实际的接入负载很有可能出现数倍于系统容量的极端情况。由于成本等原因,网络运营

商不可能大规模无限制地增加系统容量,这便是非稀疏 DS-CDMA 系统的固有缺陷。与其形成鲜明对比的是,图 1 中稀疏图 DS-CDMA 系统的扩频码生成器,却具有低密度特性。其扩频码由非零位选择器和零位填充器组成,在进行系统设计时,我们会预先设定一个很小的数作为码片重量,其值将远小于扩频码片的总长度。但具体这些非零位处于扩频码序列中的哪些位置,则由非零位选择器来决定。一旦非零位置确定,扩频序列的其余位置全部做填零处理。通过这样的处理方式,我们能够得到与现有扩频序列完全不同的低密度扩频码,在面对系统过载的情况时会体现出明显的性能优势。稀疏图 DS-CDMA 与非稀疏 DS-CDMA 的性能对比将在后面的计算机测试部分得以验证。

1.2 接收机模型

1.2.1 稀疏图 DS-CDMA 接收机模型

基于稀疏图的 DS-CDMA 传输系统接收机模型如图 2 所示。假设扩频码序列的长度为 N 。经过射频信道传输的载波信号,经过下变频之后,送入解扩器进行解扩并完成多用户检测。还原出来的窄带信号再送入基带解调器和信道译码器,最后到达信宿,完成信息传输的全过程。

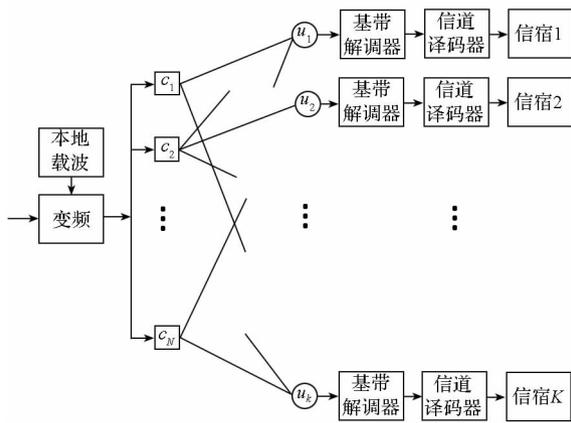


图2 稀疏图 DS-CDMA 接收机模型

Fig.2 Receiver model of sparse DS-CDMA

在分析图 2 之前,我们给出“DS-CDMA 系统二分图”的定义。

定义 3 DS-CDMA 系统中,扩频码片 c_n ($0 < n < N$) 和用户 u_k ($0 < k < K$) 之间的关系可以按照如下方式进行描述:从扩频码片的角度来看,如果 c_n 为用户 u_k 扩频序列中的非零位,则 c_n 连接一根线到用户 u_k ,如果为零位则无须连线;从用户的角度来看,如果 u_k 的扩频序列的非零位包含 c_n ,则 u_k 连接一根线到码片 c_n ,否则无须连线;由此,扩频码片、用户以及两者之间的连线构成了二

分图的三个基本要素(两类节点和不同类节点之间的连线),称为 DS-CDMA 系统的二分图。

在 1.1 介绍发射机模型时已经提到,现有的非稀疏 DS-CDMA 所采用的扩频码都是高密度序列,其码片重量和符号重量都很大,映射到图模型上,会形成一个高密度的二分图。而图 2 所示的稀疏图 DS-CDMA 接收机模型则截然不同。从图 2 可以看到,由于每个用户的扩频序列中只有少数非零位,而每位码片也仅仅与少数几个用户之间存在连线,因此其对应的二分图是稀疏的。正是这种稀疏的特性,带来了以下的优势:

(1)图 2 中每个用户 u_k 的扩频序列存在大量的“0”,即码片重量远小于扩频序列总长度,有利于简化扩频与解扩的复杂度;

(2)非稀疏 DS-CDMA 系统对应的都是高密度二分图,每个用户的数据会受到大量其他用户的干扰,导致用户间干扰非常突出,而图 2 中每个码片 c_n 仅被少数用户进行非零位扩频调制,即符号重量远小于用户总数,使得每个用户只被少量的其他用户干扰,因此稀疏二分图中的多址干扰将远小于高密度二分图中的多址干扰;

(3)由于图 2 中的多址干扰受到限制,使得稀疏图 DS-CDMA 系统能够在过载甚至严重过载的情况下依然正常工作,并达到优良性能;

(4)图 2 的稀疏图结构有利于置信度传播算法的实现,能够以较低的复杂度来消除用户间干扰。

众所周知,稀疏二分图以往都是用于信道编码领域,比如 LDPC 码和喷泉码(包括 LT 码和 Raptor 码)等,都具有稀疏图结构。而本文将稀疏图创造性地应用于 DS-CDMA 系统,这是一种有益的探索和尝试。

1.2.2 Turbo 迭代的稀疏图 DS-CDMA 接收机模型

在稀疏图 DS-CDMA 接收机模型的基础上,我们提出一种更新颖的接收机模型,称之为 Turbo 迭代的稀疏图 DS-CDMA 接收机模型,如图 3 所示。

对比图 2 和图 3 的功能框图,可以发现这两者的结构大体相当,图 3 仍然保留了图 2 中的稀疏二分图。但图 3 中每个用户的信道译码器,都通过一条反馈路径,连接至稀疏二分图中的用户节点。由此,DS-CDMA 系统二分图与信道译码器之间形成了 Turbo 迭代结构。当接收机工作时,一方面会在稀疏图上进行多用户迭代检测;另一方面,信道译码器与稀疏图之间也通过反馈路径

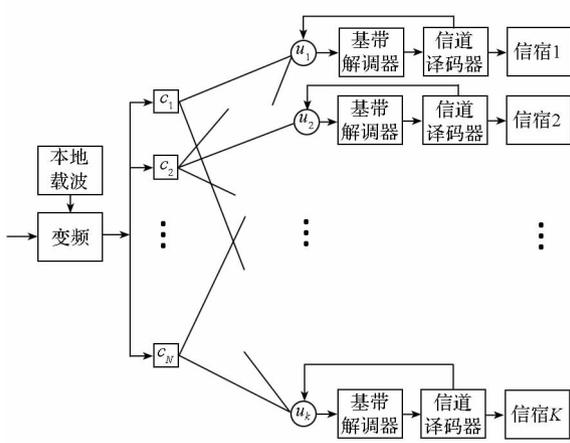


图3 Turbo迭代的稀疏图 DS-CDMA 接收机模型

Fig. 3 Receiver model of Turbo iterative graph DS-CDMA

交换信息,同时进行着 Turbo 迭代。显而易见, Turbo 迭代的稀疏图 DS-CDMA 接收机能够进一步优化检测与译码的性能,所付出的代价则是更高的计算复杂度。

2 稀疏图 DS-CDMA 迭代检测

2.1 扩频矩阵与置信度传播算法

在 DS-CDMA 系统中,干扰一个基站或移动台的多路接入干扰是小区内和小区间干扰的总和。基于 RAKE 接收机原理的 DS-CDMA 接收机将其他用户的信号视为干扰信号,可以通过多用户检测技术来消除其他用户的干扰。多用户检测也称为联合检测和干扰消除,除了能够降低多路接入干扰的影响之外,还可以缓解远近效应以及系统对功率控制的需求。现有的多用户检测算法,如最小均方误差 MMSE (Minimum Mean Square Error) 检测^[12]、概率检测 PDAD (Probabilistic data association detection)^[13]、分组多用户检测 GMD (Group multiuser detection)^[14] 和并行干扰消除 PIC (parallel interference cancellation)^[15] 等方法,都是基于高密度扩频序列进行的相关研究。而本文提出的稀疏图 DS-CDMA 具有特殊的低密度二分图结构,可以充分利用该特点来实现高效的多用户检测。在介绍置信度传播迭代检测算法之前,我们给出“扩频矩阵”的定义。

定义 4 在 DS-CDMA 系统中,扩频矩阵 \mathbf{S} 定义为一个 $N \times K$ 维的矩阵,矩阵的每一行代表扩频序列的一位码片,矩阵的每一列代表一个用户,如果用户 u_k ($0 < k < K$) 的扩频序列中第 c_n ($0 < n < N$) 位码片为非零值,则扩频矩阵 \mathbf{S} 中第 n 行第 k 列的元素 $s_{n,k}$ 等于“1”,否则 $s_{n,k}$ 等于“0”。

结合图 2 的接收机模型和定义 3,可以将扩频矩阵与 DS-CDMA 系统二分图联系起来,扩频矩阵实质上是 DS-CDMA 系统二分图的矩阵表现形式。非稀疏 DS-CDMA 的高密度二分图所对应的扩频矩阵中包含大量的非零元素,而稀疏二分图所对应的扩频矩阵则仅仅包含少数非零元素。在图论的发展过程中,二分图的出现曾引起众多学者对人工智能中的置信传播算法的研究热潮。置信度传播则是现代数字信号处理中的一个重要概念,根据传递信息内容的不同,可以演化为信号处理和人工智能等不同领域的特定算法,如贝叶斯网络的 Peal 置信传播算法、快速傅立叶变化算法、BCJR 前向/后向算法等。该算法将复杂的信号处理过程分解为多个相对简单的迭代步骤,各步骤之间以信息概率为基础,要求软信息尽可能无损失地传递。置信度传播算法有一条很重要的原则,我们给出其定义。

定义 5 置信度传播算法在二分图上传递消息时,某节点 u 沿某条线 e 发送的消息与上次 u 从 e 接收到的消息无关,即沿 e 发送消息的映射函数中的自变量不包含来自该线的消息,而决定于和 u 相连的其他线上接收的信息,这就保证了在任一条线上,只有外来消息传递,也保证了发送消息与接收节点的消息相互独立。

这是置信度传播算法的重要特性之一,也是迭代消息能够成功收敛的基本条件。置信度传播算法在现代纠错编码的迭代译码算法中已经得到了成功应用,包括 Turbo 码、LDPC 码和喷泉码等。有研究表明,LDPC 码所采用的基于消息传递的软判决迭代译码算法是其可获得逼近 Shannon 限性能的主要原因。

2.2 稀疏图上的多用户迭代检测

假设发送端第 k 个用户经过信道编码和基带调制以后的信号为 x_k ($1 \leq k \leq K$),接收端经过下变频以后第 n 位码片的接收信号为 y_n ($1 \leq n \leq N$):

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

其中 $s_{n,k}$ 为扩频矩阵中的某一元素,表示第 k 个用户扩频序列的第 n 位码片; v_n 表示信道噪声。令 $\psi_n = \{k: s_{n,k} \neq 0\}$ 表示与码片 c_n 相连的用户的集合, $\varepsilon_k = \{n: s_{n,k} \neq 0\}$ 表示与用户 u_k 相连的码片的集合。迭代检测过程中,每个码片向与其相连的用户以对数似然比形式发送码片消息 $L_{c_n \rightarrow u_k}$;接着,每个用户向与其相连的码片以对数似然比形式发送用户消息 $L_{u_k \rightarrow c_n}$;最后得到判决消息 L_{u_k} 并据此做出判决。算法的每轮迭代过程,都是一次

消息处理的循环:码片负责处理和传送码片消息,接着是用户负责处理和传送用户消息。基于稀疏图的多用户检测迭代算法具体推导如下:

(1) 初始化

对于图 2 所示的稀疏图 DS-CDMA 接收机而言,信道传输过来的消息直接送入码片,而迭代开始时用户并没有任何先验信息,因此首先初始化用户消息为零:

$$L_{u_k \rightarrow c_n} = 0, \quad \forall k \quad \forall n \quad (2)$$

对于图 3 所示的 Turbo 迭代的稀疏图 DS-CDMA 接收机而言,用户的先验信息是信道译码器通过 Turbo 环路送过来的反馈消息,因此需要初始化用户消息为:

$$L_{u_k \rightarrow c_n} = L_{decoder \rightarrow u_k}, \quad \forall k \quad \forall n \quad (3)$$

其中 $L_{decoder \rightarrow u_k}$ 表示信道译码器的反馈消息。

(2) 码片消息更新

对于码片而言,需要根据接收的信道消息和用户传送过来的消息来计算码片消息:

$$L_{c_n \rightarrow u_k} = f(u_k | y_n, L_{u_{k'} \rightarrow c_n}, k' \in \psi_n \setminus k) \quad (4)$$

其中 $\psi_n \setminus k$ 表示 ψ_n 中除了用户 k 以外的所有用户,满足了定义 5 中的条件。

为了计算最大后验概率,(4)式可以展开为:

$$\begin{aligned} f(u_k | y_n, L_{u_{k'} \rightarrow c_n}, k' \in \psi_n \setminus k) \\ &= \ln \left(\sum p(y_n | \mathbf{X}) p_n(\mathbf{X} | x_k) \right) \\ &= \ln \left(\sum p(y_n | \mathbf{X}) \prod_{(k' \in \psi_n \setminus k)} p_n(x_{k'}) \right) \end{aligned} \quad (5)$$

其中 \mathbf{X} 表示所有用户的发送信号所形成的矢量,而条件概率 $p(y_n | \mathbf{X})$ 和先验概率 $p_n(x_{k'})$ 则分别为:

$$p(y_n | \mathbf{X}) = \exp \left(-\frac{1}{2\sigma^2} \|y_n - s_{[n]} x_{[n]}\|^2 \right) \quad (6)$$

$$p_n(v_{k'}) = \exp(L_{u_{k'} \rightarrow c_n}) \quad (7)$$

其中 σ^2 代表噪声方差, $s_{[n]}$ 代表扩频矩阵第 n 行对应的矢量, $x_{[n]}$ 代表与码片 c_n 相连的用户数据对应的矢量。将(6)、(7)两式代入(5)式,可以得到:

$$\begin{aligned} L_{c_n \rightarrow u_k} &= \kappa_{n,k} \max_{x_{[n]}}^* \left(\sum_{k' \in \psi_n \setminus k} L_{u_{k'} \rightarrow c_n} \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2\sigma^2} \|y_n - s_{[n]} x_{[n]}\|^2 \right) \end{aligned} \quad (8)$$

其中 $\kappa_{n,k}$ 代表归一化系数, \max^* 为:

$$\max^*(a, b) \triangleq \ln(e^a + e^b) \quad (9)$$

(3) 用户消息更新

对于图 2 所示的稀疏图 DS-CDMA 接收机而

言,将接收到的码片消息进行累加以更新用户消息:

$$L_{u_k \rightarrow c_n} = \sum_{n' \in \varepsilon_k \setminus n} L_{c_{n'} \rightarrow u_k} \quad (10)$$

其中 $\varepsilon_{k,m} \setminus n$ 表示 ε_k 中除了码片 n 以外的所有码片,满足了定义 5 中的条件。

对于图 3 所示的 Turbo 迭代的稀疏图 DS-CDMA 接收机而言,用户消息更新除了利用接收到的码片消息以外,还需要考虑信道译码器通过 Turbo 环路送过来的反馈消息:

$$L_{u_k \rightarrow c_n} = \sum_{n' \in \varepsilon_k \setminus n} L_{c_{n'} \rightarrow u_k} + L_{decoder \rightarrow u_k} \quad (11)$$

(4) 判决消息更新

每个用户将接收到的码片消息进行累加,更新判决消息:

$$L_{u_k} = \sum_{n \in \varepsilon_k} L_{c_n \rightarrow u_k} \quad (12)$$

由此对用户的检测数据进行判决:

$$\hat{x}_k = \arg \max_{x_k} L_{u_k} \quad (13)$$

在算法运行过程中,会预先根据信道条件设定最大迭代次数,当迭代次数小于最大迭代次数时,循环进行码片消息更新和用户消息更新这两个步骤,完成置信度的迭代传递。当迭代次数达到最大迭代次数时进行判决消息更新并输出判决估计 \hat{x}_k ,完成多用户检测全过程。

从以上推导可以看出,置信度传播算法把复杂的全局问题通过各个单元之间的消息传递,转换成简单的本地计算,属于准最优的多用户检测算法,在稀疏图上能够达到优异的检测性能。虽然置信度传播算法也可应用于非稀疏 DS-CDMA 系统,但高密度的二分图将导致呈指数级增长的计算复杂度。因此,置信度传播算法只有在稀疏图 DS-CDMA 系统中才具有实用价值。

3 性能测试

3.1 系统间性能对比

为了验证稀疏图 DS-CDMA 系统的性能,进行了计算机模拟仿真。调制方式采用二进制相移键控 BPSK (binary phase shift keying),信道编码采用(2,1,7)卷积码,扩频码的码片长度为 63,系统的用户接入负载为 166% 和 200%,测试信道为瑞利衰落信道。稀疏二分图的相关参数包括:码片重量为 3,符号重量分别为 5(对应 166% 接入负载)和 6(对应 200% 接入负载),置信度传播检测的最大迭代次数为 10。为了对比稀疏图 DS-CDMA 与现有的非稀疏 DS-CDMA 系统,本文还

在同样的仿真条件下测试了非稀疏 DS-CDMA 系统的性能,其扩频码由文献[11]中的优化序列 Welch bound equality 生成,多用户检测采用 MMSE 方法,同时加入了文献[12]中的并行干扰消除算法进行优化。另外,为了验证 Turbo 迭代对稀疏图 DS-CDMA 性能的影响,在同样的仿真条件下测试了 Turbo 迭代的稀疏图 DS-CDMA 系统的性能,其 Turbo 迭代的次数设置为 3 次。所有系统都在接收机已经实现同步的条件下进行测试。

图 4 显示了各系统在不同过载情况下的误码率性能,其中 non-sparse DS-CDMA 表示非稀疏 DS-CDMA, sparse DS-CDMA 表示稀疏图 DS-CDMA, Turbo sparse DS-CDMA 表示采用 Turbo 迭代的稀疏图 DS-CDMA, system loading 表示用户接入负载,横坐标 E_b/N_0 表示比特信噪比。从图中可以看到,各类系统在 200% 接入负载时的性能,都劣于各自在 166% 接入负载时的性能,说明随着用户接入数量和系统负载的增加,误码率降急剧下降。此外,无论是 166% 接入负载还是 200% 接入负载,稀疏图 DS-CDMA 的性能都远优于非稀疏 DS-CDMA。而且随着接入负载的增加,稀疏图 DS-CDMA 所带来的性能改善越来越明显。对于稀疏图 DS-CDMA 而言,采用 Turbo 迭代的接收机能够进一步地提升性能。在误码率为 2×10^{-3} 时,相对于非稀疏 DS-CDMA,本文提出的稀疏图 DS-CDMA 能分别带来 3.9 dB (166% 接入负载) 和 8.2 dB (200% 接入负载) 的增益。同样是在误码率为 2×10^{-3} 时,相对于非稀疏 DS-CDMA,本文提出的采用 Turbo 迭代的稀疏图 DS-CDMA 能分别带来 4.5 dB (166% 接入负载) 和 8.7 dB (200% 接入负载) 的增益。性能的大幅提升主要得益于稀疏二分图的特有结构和高效的置信度传播迭代检测算法。

3.2 码片重量对系统性能的影响分析

稀疏图 DS-CDMA 系统是基于图论提出来的,所以图模型理论中影响二分图性能的各种因素也能用来指导稀疏图 DS-CDMA 系统的建模。稀疏图中线的数目,即图模型的稀疏程度,是控制图形性能的最为重要的影响因子。基于此,我们仿真分析了不同码片重量下,稀疏图 DS-CDMA 系统的检测性能。图 5 显示了稀疏图 DS-CDMA 码片重量与系统性能的关系,测试环境与 3.1 节相同,接收机没有采用 Turbo 迭代,系统接入负载为 166%,其中 chip weight 表示码片重量。从图

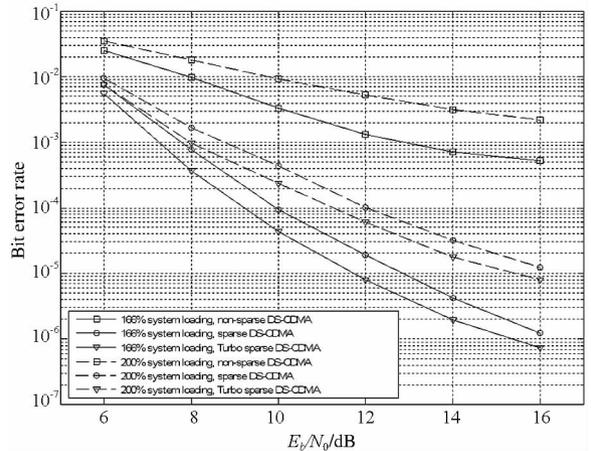


图 4 稀疏 DS-CDMA 与非稀疏 DS-CDMA 误码率性能
Fig. 4 Bit error rate of sparse and non-sparse DS-CDMA

中可以看到,随着码片重量的增加,误码率得以降低。相比其他两种方案,码片重量设置为 2 时系

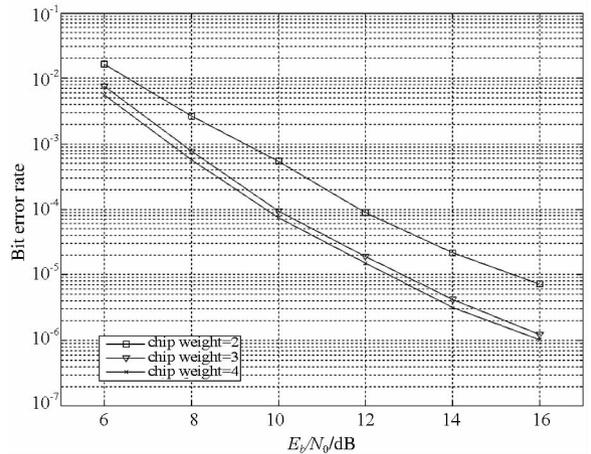


图 5 稀疏图 DS-CDMA 码片重量与系统性能的关系
Fig. 5 Effect of chip weight in sparse DS-CDMA

统性能有较大损失,主要原因在于:虽然码片重量为 2 的稀疏图能够带来更低的多址干扰,但根据定义 5,迭代算法中某节点沿某条线发送的消息仅决定于和该节点相连的其他线上接收的信息,如果一个用户只有两条线,那么除去一条线上送入的码片消息以外,只剩下另外一条线的码片消息可供利用,这将导致用于消息更新的可靠信息太少,不利于消息的传递及收敛。因此码片重量设置为 2 不是最佳方案。此外,从图中还可以发现,当码片重量等于 3 和 4 时,两条曲线间的差别非常小,其原因在于:虽然码片重量为 4 的稀疏图更有利于置信度传播算法吸收新的有用的信息,但更大的码片重量也会带来更强的多址干扰,同时也意味着更高的计算复杂度。因此,多址干扰和置信度传播算法的消息更新,是一对相互制约、相互影响的矛盾。综合误码率性能、图模型稀疏程度以及计算复杂度来考虑,码片重量设置为 3

是较为理想的选择。

3.3 迭代次数对多用户检测的影响分析

疏图 DS-CDMA 系统采用的是置信度传播算法,最大迭代次数是影响消息收敛和误码率性能的重要参数。我们仿真分析了不同的最大迭代次数情况下,稀疏图 DS-CDMA 系统的检测性能。图 6 显示了稀疏图 DS-CDMA 最大迭代次数与系统性能之间的关系,测试环境与 3.1 节相同,接收机没有采用 Turbo 迭代,系统接入负载为 166%,其中 E_b/N_0 设置为 16dB。从图中可以看到,随着最大迭代次数的增加,误码率明显下降。而且最大次数为 10 和 6 时两者间的性能差距,小于最大次数为 6 和 3 时两者间的差距。这说明置信度传播算法的最开始几次迭代过程中,能够利用的有价值的新鲜信息比较多,所以消息收敛速度较快。随着迭代进程的深入,越往后则可借鉴的新信息越少,消息收敛明显变慢。一般来说,最大迭代次数越大,则检测效果越好,但实现复杂度也越高。因此在实际应用中,可以根据信道情况和用户需求灵活设置最大迭代次数,取得性能与复杂度的理想折中。

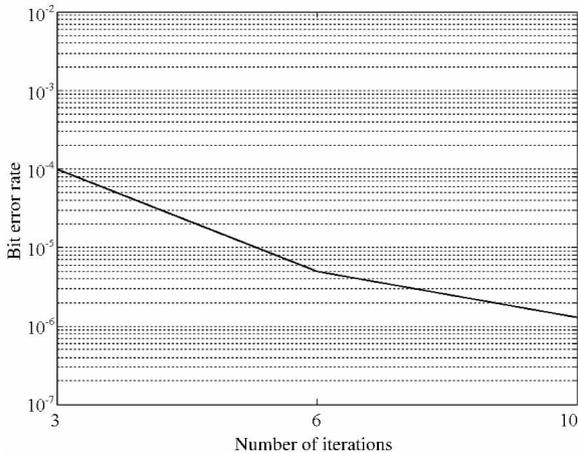


图 6 稀疏图 DS-CDMA 在 $E_b/N_0 = 16\text{dB}$ 时最大迭代次数与系统性能关系

Fig. 6 Effect of maximum iterations at $E_b/N_0 = 16\text{dB}$ in sparse DS-CDMA

3.4 远近效应分析

由于 DS-CDMA 系统中用户所在位置的不同以及用户的移动性等特点,必然带来不可忽视的“远近效应”。各个接收用户与基站间的距离是随机变化的,假如所有用户发射功率都按照最大通信距离设计,那么各路信号到达基站的信号强弱将会不同。DS-CDMA 系统同一小区的所有用户分享相同的频率,对整个系统来说,每个用户都

以最小的功率发射信号显得极其重要。因此,我们对稀疏图 DS-CDMA 的远近效应进行了仿真。图 7 显示了稀疏图 DS-CDMA 的远近效应,测试环境与 3.1 节相同,接收机没有采用 Turbo 迭代,系统接入负载为 166%。在仿真过程中,任意选取一位用户 A,将其发射功率固定,比特信噪比始终为 12dB。余下的用户则具有不同的发射功率,其比特信噪比与 A 之间的差值即为图中的横坐标 $\Delta E_b/N_0$ 。因此图中描述的是该用户的误码率随着与其余用户信噪比差值的变化而改变的情况。从图中可以看到,随着 $\Delta E_b/N_0$ 绝对值的增大,误码率有所上升。就远近效应而言,系统增加一个呼叫,就意味着这个用户对其他的用户造成

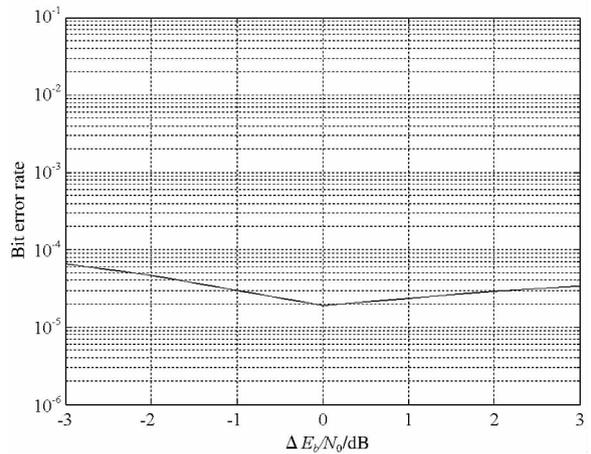


图 7 稀疏图 DS-CDMA 的远近效应

Fig. 7 Near-far effect in sparse DS-CDMA

了干扰,如果单一地提高发射功率,如同图 6 所示,付出的代价是增加了对所有相邻小区的干扰,从而影响了其他用户的通信质量。然而也应该注意到,该图显示的误码率波动范围很小,在 3dB 绝对误差情况下,误码率浮动不超过 5×10^{-5} ,说明稀疏图 DS-CDMA 对远近效应有很好的鲁棒性。这仍然得益于其特有的稀疏图结构和置信度传播检测算法,能够在消息迭代过程中充分利用高可靠性的用户消息,对先验信息较差的用户进行及时补偿,因此强信号与弱信号可以同时共存于基站的接收机,使得系统能够同时承载更多的用户。当然,也可以再另外加入精确的功率控制算法,使系统具有更加优异的性能,但会增加一定的设备开销。

4 结论

本文针对 DS-CDMA 在接入用户过载时系统性能急剧下降的缺陷,提出了基于稀疏图的 DS-CDMA 系统。将低密度二分图引入 DS-CDMA 系

统中,使用户和扩频码片之间的关系以稀疏图形式表现出来,由此提出稀疏图 DS-CDMA 发射机模型、稀疏图 DS-CDMA 接收机模型和 Turbo 迭代的稀疏图 DS-CDMA 接收机模型。在此基础上,采用置信度传播算法以完成多用户检测,消息传递过程在稀疏图上被归纳为码片消息更新和用户消息更新等步骤,以迭代计算的方式来消除用户间干扰。仿真结果显示,在不同过载情况下,稀疏图 DS-CDMA 的误码率远低于现有的非稀疏图 DS-CDMA,并且其性能的优势随着负载的增加而越来越大。对稀疏图 DS-CDMA 而言,Turbo 迭代能进一步地提升系统性能。此外,根据图模型的相关理论,还对稀疏图 DS-CDMA 的码片重量、迭代检测次数和远近效应进行了相关测试。综合理论分析与性能仿真,稀疏图 DS-CDMA 能有效地解决接入用户负载过高的现实困境,为 DS-CDMA 系统的实际应用提供有益支撑,也为多址系统的设计提供了全新的思路。

参考文献 (References)

- [1] Nguyen H, Shwedyk E. A new construction of signature waveforms for synchronous CDMA systems [J]. IEEE Transactions on Broadcast, 2005, 51(4): 520 - 529.
- [2] Kapur Char-Dir Chung A, Wei - Chang Chen, Wei - Lun Lin. Realizable bandlimited DS-CDMA system occupying nyquist bandwidth [J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(7): 964 - 967.
- [3] Dinis R, Silva P. Iterative detection of multicode DS-CDMA signals with strong nonlinear distortion effects [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(8): 4169 - 4181.
- [4] Griner U N, Arnon S. Multiuser diffuse indoor wireless infrared communication using equalized synchronous CDMA [J]. IEEE Transactions on Communications, 2006, 54(9): 1654 - 1662.
- [5] Lamare R C D. Joint iterative power allocation and linear interference suppression algorithms for cooperative DS-CDMA networks [J]. IET Communications, 2012, 6(13): 1930 - 1942.
- [6] Cai Y L, Lamare R C, Fa R. Switched interleaving techniques with limited feedback for interference mitigation in DS-CDMA systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(7): 1946 - 1956.
- [7] Montanari A, Tse D. Analysis of belief propagation for non-linear problems: The example of CDMA (or: How to prove tanaka's formula) [C]//IEEE Information Theory Workshop, March 2006: 160 - 164.
- [8] Hoshyar R, Wathan F P, Tafazolli R. Novel low-density signature for synchronous cdma systems over awgn channel [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(4): 1616 - 1626.
- [9] Riera-Palou F, Femenias G, Ramis J. On the design of uplink and downlink group-orthogonal multicarrier wireless systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2008, 56(10): 1656 - 1655.
- [10] Acolaster K, Bar-Ness Y. Performance analysis of space-time spreading DS-CDMA systems over fast-fading general time-correlated channels [J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(11): 993 - 995.
- [11] Pad P, Mousavi A, Goli A, Marvasti F. Simplified MAP-MUD for active user CDMA [J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(6): 599 - 601.
- [12] Kapur A, Varanasi M. Multiuser detection for overloaded CDMA systems [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(7): 1728 - 1742.
- [13] Luo J. Near-optimal multiuser detection in synchronous cdma using probabilistic data association [J]. IEEE Communications Letters, 2001, 5(9): 361 - 363.
- [14] 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.
- [15] Divsalar D, Simon M, Raphaeli D. Improved parallel interference cancellation for CDMA [J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46(2): 258 - 268.