



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103249124 B

(45) 授权公告日 2015. 09. 16

(21) 申请号 201310121885. 6

(22) 申请日 2013. 04. 09

(73) 专利权人 东南大学

地址 210096 江苏省南京市玄武区四牌楼 2 号

(72) 发明人 高西奇 孙强 金石 张源 孙晨

(74) 专利代理机构 南京苏高专利商标事务所 (普通合伙) 32204

代理人 柏尚春

(51) Int. Cl.

H04W 52/02(2009. 01)

H04W 72/12(2009. 01)

审查员 靳莉

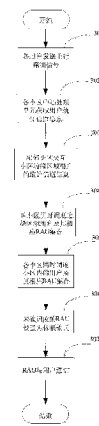
权利要求书2页 说明书11页 附图4页

(54) 发明名称

密集分布式无线通信方法及其系统

(57) 摘要

本发明公开了一种密集分布式的无线通信方法及其系统。无线通信的每个小区密集布设分布式远端接入单元 RAU, 同一小区内用户使用不同的时频资源发送探测信号, 每个小区的中心处理单元根据接收到的探测信号获得本小区用户的统计信道信息以及相邻小区边缘用户的统计信道信息; 每个小区确定小区边缘区域用户和 RAU 集合, 并与相邻小区边缘区域用户的统计信道信息进行交互; 利用获得的统计信道信息, 相邻小区首先调度边缘区域用户及其 RAU, 然后再调度各自小区内的用户及其 RAU, 并将未被调度的 RAU 设置为休眠模式, 最后各用户在选定的 RAU 集合上实施同一时频资源上的无线通信。本发明具有系统信号处理复杂度低、吞吐量高和所需能耗低的优点。



1. 一种密集分布式无线通信方法,其特征在于,包括如下步骤:

(1) 无线通信的每个小区密集布设多个分布式远端接入单元 RAU;每个小区内各个用户根据预先分配的不同时频资源发送上行探测信号,相邻小区发送探测信号时采用多色时频资源复用技术;

(2) 每个小区内的第一类 RAU 接收探测信号,回传给中心处理单元;第二类 RAU 直接计算出统计信道信息并发送到中心处理单元;

(3) 中心处理单元根据获得的各用户统计信道信息确定小区边缘区域用户统计信道信息,并与相邻小区交互所述边缘区域用户统计信道信息;

(4) 根据相邻小区边缘区域用户统计信道信息,相邻小区中心处理单元同时调度边缘区域用户集合及其相应的 RAU 集合;

(5) 在调度完边缘区域用户集合及其相应的 RAU 集合之后,各小区中心处理单元再利用各小区内用户的统计信道信息,调度各小区内用户集合及其相应的 RAU 集合;

(6) 将未被调度的 RAU 设置为休眠模式,等待下一个调度周期;

(7) 被调度的用户与其相应的 RAU 集合在分配的同一时频资源上进行通信。

2. 根据权利要求 1 所述的一种密集分布式无线通信方法,其特征在于:所述的分布式远端接入单元 RAU 包括第一类 RAU 和第二类 RAU,每个小区密集布设同一类 RAU 或者同时布设这两类 RAU;第一类 RAU 由收发射频模块单元、模数和数模转换单元及数字光模块或其他高速链路端口模块组成,第一类 RAU 与中心处理单元之间交互收发的数字基带信号,数字基带信号处理由中心处理单元完成;第二类 RAU 具有数字基带信号处理能力,由收发射频模块单元、模数和数模转换单元、数字基带处理模块及数字光模块或其他高速链路端口模块组成,第二类 RAU 与中心处理单元之间交互统计信道信息、收发信息比特序列及其他控制信息。

3. 根据权利要求 1 所述的一种密集分布式无线通信方法,其特征在于:所述的中心处理单元包括基带处理单元、用户处理单元、交换处理单元以及用户调度单元;其中,

基带处理单元完成单个或多个 RAU 的发送后处理或接收预处理;

用户处理单元完成一个或多个用户频域发送信号的生成和接收信号的处理;

交换处理单元完成基带信号处理单元与用户处理单元的信号交互;

用户调度单元完成空分多用户调度。

4. 根据权利要求 1 所述的一种密集分布式无线通信方法,其特征在于:所述的多色时频资源复用技术的实现方法是相邻小区发送的探测信号使用不同的时频资源,而地理位置相隔一个或多个小区的不同小区复用相同的时频资源;同一小区的不同用户使用不同的时频资源间歇地发送探测信号。

5. 根据权利要求 1 所述的一种密集分布式无线通信方法,其特征在于:中心处理单元采用集中式调度小区边缘区域和小区中心区域的用户集合及其相应的 RAU 集合,并对其进行云处理。

6. 根据权利要求 1 所述的一种密集分布式无线通信方法,其特征在于:中心处理单元调度方法是,利用探测获得的用户统计信道信息,依据系统和速率最大准则或能效最大准则,对各小区中待调度的用户集合独立进行调度,确定使用同一时频资源通信的多个用户以及各用户使用的 RAU 集合,被调度的用户所属的 RAU 集合互不重叠,用户在 RAU 域中实施

空分多址传输。

7. 一种密集分布式无线通信系统,其特征在於,包括 RAU 模块、用户终端模块以及中心处理模块,RAU 模块到中心处理模块之间的数据传输,以及各小区中心处理模块之间的数据传输通过光纤或者其他高速链路实现;其中,

用户终端模块,使用不同的时频资源发送上行探测信号;

RAU 模块,密集布设在无线通信的每个小区;用于接收探测信号,直接回传中心处理模块或处理后传给中心处理模块;

中心处理模块,包括基带处理单元、用户处理单元、交换处理单元以及用户调度单元;基带处理单元完成单个或多个 RAU 的发送后处理或接收预处理;用户处理单元完成一个或多个用户频域发送信号的生成和接收信号的处理;交换处理单元完成基带信号处理单元与用户处理单元的信号交互;用户调度单元完成空分多用户调度。

8. 根据权利要求 7 所述的一种密集分布式无线通信系统,其特征在於,所述 RAU 模块包括第一类 RAU 和第二类 RAU,每个小区密集布设同一类 RAU 或者同时布设这两类 RAU;其中第一类 RAU 将接收到的探测信号回传给中心处理单元,根据接收到的探测信号,中心处理单元估计各用户与相邻 RAU 的信道参数,获得各用户调度所需的统计信道信息;第二类 RAU 根据接收到的探测信号计算出所需的统计信道信息,并发送到中心处理单元。

密集分布式无线通信方法及其系统

技术领域

[0001] 本发明涉及无线通信技术领域,特别是涉及一种使用密集分布式节点布设的多用户空分多址无线通信方法。

背景技术

[0002] 在频谱资源日益紧缺以及无线数据业务量爆炸式增长的情况下,4G 之后的无线通信系统需要进行新的变革。传统的 MIMO 技术在不增加功率和带宽资源下可以有效地提升频谱效率,目前该技术已成为 4G 移动通信标准的关键技术。为进一步提高频谱效率并改善小区边缘性能,采用多用户 MIMO 和协作多点传输技术,但是所能够达到的频谱效率和小区边缘频谱效率仍然较低,而且所需的发射功率较高。

发明内容

[0003] 技术问题:为了能够实现更高频谱效率和绿色无线通信的双重目标,需要从根本上改变无线通信的网络架构和无线传输方法。为此,本发明给出一种密集分布式无线通信方法。

[0004] 技术方案:一种密集分布式无线通信方法,包括如下步骤,

[0005] (1) 无线通信的每个小区密集布设多个分布式远端接入单元 RAU;每个小区内各个用户根据预先分配的不同时频资源发送上行探测信号,相邻小区发送探测信号时采用多色时频资源复用技术;

[0006] (2) 每个小区内的第一类 RAU 接收探测信号,回传给中心处理单元;第二类 RAU 直接计算出统计信道信息并发送到中心处理单元;

[0007] (3) 中心处理单元根据获得的各用户统计信道信息确定小区边缘区域用户统计信道信息,并与相邻小区交互所述边缘区域用户统计信道信息;

[0008] (4) 根据相邻小区边缘区域用户统计信道信息,相邻小区中心处理单元同时调度边缘区域用户集合以及其相应的 RAU 集合;

[0009] (5) 在调度完边缘区域用户集合及其相应的 RAU 集合之后,各小区中心处理单元再利用各小区内用户的统计信道信息,调度各小区内用户集合及其相应的 RAU 集合;

[0010] (6) 将未被调度的 RAU 设置为休眠模式,等待下一个调度周期;

[0011] (7) 被调度的用户与其相应的 RAU 集合在分配的同一时频资源上进行通信。

[0012] 其中,所述的分布式远端接入单元 RAU 包括第一类 RAU 和第二类 RAU,每个小区可密集布设同一类 RAU 或者同时布设这两类 RAU;第一类 RAU 由收发射频模块单元、模数和数模转换单元及数字光模块或其他高速链路端口模块组成,第一类 RAU 与中心处理单元之间交互收发的数字基带信号,数字基带信号处理由中心处理单元完成;第二类 RAU 具有数字基带信号处理能力,由收发射频模块单元、模数和数模转换单元、数字基带处理模块及数字光模块或其他高速链路端口模块组成,第二类 RAU 与中心处理单元之间交互统计信道信息、收发信息比特序列及其他控制信息;

[0013] 所述的中心处理单元包括基带处理单元、用户处理单元、交换处理单元以及用户调度单元；基带处理单元完成单个或多个 RAU 的发送后处理或接收预处理；用户处理单元完成一个或多个用户频域发送信号的生成和接收信号的处理；交换处理单元完成基带信号处理单元与用户处理单元的信号交互；用户调度单元完成空分多用户调度；

[0014] 所述的多色时频资源复用技术的实现方法是相邻小区发送的探测信号使用不同的时频资源，而地理位置相隔一个或多个小区的不同小区复用相同的时频资源；同一小区的不同用户使用不同的时频资源间歇地发送探测信号；

[0015] 中心处理单元采用集中式调度小区边缘区域和小区中心区域的用户集合及其相应的 RAU 集合，并可对其进行云处理。中心处理单元调度方法是，利用探测获得的用户统计信道信息，依据系统和速率最大准则或能效最大准则，对各小区中待调度的用户集合独立进行调度，确定使用同一时频资源通信的多个用户以及各用户使用的 RAU 集合，被调度的用户所属的 RAU 集合互不重叠，用户在 RAU 域中实施空分多址传输。

[0016] 一种密集分布式无线通信系统，包括 RAU 模块、用户终端模块以及中心处理模块，RAU 模块到中心处理模块之间的数据传输，以及各小区中心处理模块之间的数据传输通过光纤或者其他高速链路实现；其中，

[0017] 用户终端模块，使用不同的时频资源发送上行探测信号；

[0018] RAU 模块，密集布设在无线通信的每个小区；用于接收探测信号，直接回传中心处理模块或处理后传给中心处理模块；

[0019] 中心处理模块，包括基带处理单元、用户处理单元、交换处理单元以及用户调度单元；基带处理单元完成单个或多个 RAU 的发送后处理或接收预处理；用户处理单元完成一个或多个用户频域发送信号的生成和接收信号的处理；交换处理单元完成基带信号处理单元与用户处理单元的信号交互；用户调度单元完成空分多用户调度。

[0020] 所述 RAU 模块包括第一类 RAU 和第二类 RAU，每个小区可密集布设同一类 RAU 或者同时布设这两类 RAU；其中第一类 RAU 将接收到的探测信号回传给中心处理单元，根据接收到的探测信号，中心处理单元估计各用户与相邻 RAU 的信道参数，获得各用户调度所需的统计信道信息；第二类 RAU 根据接收到的探测信号计算出所需的统计信道信息，并发送到中心处理单元。

[0021] 本发明采用上述技术方案，具有以下有益效果：1、通过密集布设 RAU 可以进一步缩短用户和 RAU 的接入距离，有效地对抗大尺度衰落，提高功率效率、频谱效率、传输可靠性和定位的准确度，降低信号处理的复杂度；2、相邻小区发送探测信号时采用多色时频资源复用技术，解决了探测信号之间的干扰问题；3、相邻小区调度边缘区域用户集合及其 RAU 集合，仅需共享边缘区域用户的统计信道信息，显著减少了小区间共享的开销，有效提高小区边缘用户的吞吐量；4、未被调度的 RAU 可以使用休眠模式，进一步降低系统的整体能耗；5、该方法可适用于时分双工(TDD)和频分双工(FDD)系统，并且其基带传输方案可向下兼容于 LTE 和 LTE-A 标准。

附图说明

[0022] 图 1 为本发明实施例的一种密集分布式无线通信系统网络架构的示意图；

[0023] 图 2 (a)、(b) 为本发明实施例的一种相邻小区各用户统计信道信息获取示意图；

图 2(a) 多小区上行探测三色时频资源复用示意图；图 2(b) 相邻的三小区各用户探测信号所占时频资源情况；

[0024] 图 3 为本发明实施例的一种密集分布式无线通信方法的流程图。

具体实施方式

[0025] 下面结合具体实施例，进一步阐明本发明，应理解这些实施例仅用于说明本发明而并不用于限制本发明的范围，在阅读了本发明之后，本领域技术人员对本发明的各种等价形式的修改均落于本申请所附权利要求所限定的范围。

[0026] 1. 无线通信系统网络架构

[0027] 本实施例的密集分布式无线通信系统网络架构如图 1 所示，图示场景由相邻的三个小区组成，每个小区有 L 个 RAU，RAU 集合为 $\{1, 2, \dots, L\}$ ，通过光纤(或其他高速链路)连接到中心处理单元，每个 RAU 有 N 根天线，每个小区有 K 个用户，用户集合为 $\{1, 2, \dots, K\}$ ，每个用户终端有 M 根天线，相邻小区的中心处理单元通过光纤(或其他高速链路)相连。整个系统由模块 101、模块 102、模块 103 和模块 104 组成，其中模块 101 是第一类 RAU 和第二类 RAU，主要作用是负责收发数据，其中第一类 RAU 由射频模块、模数和数模转换器、数字光模块(或其他高速链路端口模块)组成，第二类 RAU 由收发射频模块单元、模数和数模转换单元、数字基带处理模块及数字光模块(或其他高速链路端口模块)组成；模块 102 是中心处理单元，主要作用是负责基带信号处理、用户处理单元、交换处理单元以及用户调度算法等；模块 103 是用户终端，是用户收发数据的设备；模块 104 是光纤链路(或其他高速链路)，主要作用是 RAU 到中心处理单元之间的数据传输，以及各小区中心处理单元之间的数据传输；为了方便描述，定义每个小区所有 RAU 集合与中心处理单元通过光纤(或其他高速链路)连接构成一个小区基站。

[0028] 2. 系统模型

[0029] 在上行链路，小区 c 的基站在 RAU 集合 $\mathcal{B}_{i,c}$ 上接收到第 i 用户的信号为

[0030]

$$\mathbf{y}_{i,c}^u = \underbrace{\sqrt{P^u} [\mathbf{H}_{i,c}^u]_{\mathcal{B}_{i,c}} \mathbf{x}_{i,c}^u}_{\text{desired signal}} + \underbrace{\sum_{j=1, j \neq i}^{\mathcal{S}_c} \sqrt{P^u} [\mathbf{H}_{j,c}^u]_{\mathcal{B}_{i,c}} \mathbf{x}_{j,c}^u}_{\text{intra-cell interference}} + \underbrace{\sum_{c' \neq c} \sum_l \sqrt{P^u} [\mathbf{H}_{l,c'}^u]_{\mathcal{B}_{i,c}} \mathbf{x}_{l,c'}^u}_{\text{inter-cell interference}} + \mathbf{n}_i$$

[0031]

$$= \sqrt{P^u} [\mathbf{H}_{i,c}^u]_{\mathcal{B}_{i,c}} \mathbf{x}_{i,c}^u + \mathbf{n}_i'$$

[0032] 其中 P^u 为用户的发射功率， $\mathbf{x}_{i,c}^u$ 为小区 c 中第 i 个用户发射的信号矢量， \mathbf{n}_i 为加性白高斯噪声(AWGN)， \mathbf{n}_i' 为小区 c 和相邻小区其他用户在 RAU 集合 $\mathcal{B}_{i,c}$ 上的干扰信号与 \mathbf{n}_i 之和，由于大尺度衰落的影响，只有小区边缘用户的 RAU 集合才会受到相邻小区边缘用户的干扰，小区内用户的 RAU 集合只受到本小区用户干扰， $[\mathbf{H}_{i,c}^u]_{\mathcal{B}_{i,c}}$ 表示小区 c 中第 i 个用户与 RAU 集合 $\mathcal{B}_{i,c}$ 之间的上行信道， \mathcal{S}_c 表示小区 c 中使用相同时频资源的用户集合。

[0033] 在下行链路，小区 c 中第 i 用户的信号接收到的信号为

[0034]

$$\mathbf{y}_{i,c}^d = \underbrace{\sqrt{P^d} [\mathbf{H}_{i,c}^d]^{\mathcal{B}_{i,c}} \mathbf{x}_{i,c}^d}_{\text{desired signal}} + \underbrace{\sum_{j=1, j \neq i}^{\mathcal{S}_c} \sqrt{P^d} [\mathbf{H}_{i,c}^d]^{\mathcal{B}_{j,c}} \mathbf{x}_{j,c}^d}_{\text{intra-cell interference}} + \underbrace{\sum_{c' \neq c} \sum_{l=1}^{\mathcal{S}_{c'}} \sqrt{P^d} [\mathbf{H}_{i,c}^d]^{\mathcal{B}_{i,c'}} \mathbf{x}_{l,c'}^d}_{\text{inter-cell interference}} + \mathbf{n}_i$$

[0035]

$$= \sqrt{P^d} [\mathbf{H}_{i,c}^d]^{\mathcal{B}_{i,c}} \mathbf{x}_{i,c}^d + \mathbf{n}_i'$$

[0036] 其中 P^d 为基站的发射功率, $\mathbf{x}_{i,c}^d$ 为小区 c 中 RAU 集合 $\mathcal{B}_{i,c}$ 发射给第 i 个用户信号矢量, \mathbf{n}_i 为加性白高斯噪声 (AWGN), \mathbf{n}_i' 为小区 c 和相邻小区其他用户 RAU 集合对用户 i 的干扰信号与 \mathbf{n}_i 之和。由于大尺度衰落的影响, 只有小区边缘用户才会受到相邻小区边缘用户 RAU 集合的干扰, 小区内用户只受到本小区用户 RAU 集合的干扰, $[\mathbf{H}_{i,c}^d]^{\mathcal{B}_{i,c}}$ 表示小区 c 中 RAU 集合 $\mathcal{B}_{i,c}$ 与第 i 个用户之间的下行信道。

[0037] 3. 统计信道信息获取

[0038] 本发明实施例提供一种相邻小区统计信道信息获取方法, 如图 2 所示, 图 2 (a) 表示多小区上行探测三色时频资源复用即相邻的三个小区上行探测信号使用不同的时频资源区域, 因此小区 c 探测信号复用标识 f_c 取值 $1 \sim 3$, 每个小区都有 K 个用户, 每个用户配置 M 根天线, 各用户使用的 N_s 组子载波。如所有标识为 1 的小区可使用子载波资源集合 $\mathcal{C}_1 = \{1, 2, \dots, MKN_s\}$, 所有标识为 2 的小区可使用子载波资源集合 $\mathcal{C}_2 = \{MKN_s + 1, MKN_s + 2, \dots, 2MKN_s\}$, 所有标识为 3 的小区可使用子载波资源集合 $\mathcal{C}_3 = \{2MKN_s + 1, 2MKN_s + 2, \dots, 3MKN_s\}$;

[0039] 统计信道信息获取由上行链路的信道探测过程完成。在上行链路, 各小区各用户间歇地发送探测信号, 各小区所有用户的探测信号可以在一个时隙的一个 OFDM 符号上发送, 各小区不同用户探测信号使用不同的子载波资源, 各小区各用户中不同的天线在不同的子载波上发送探测信号, 每个用户多个天线所占的子载波资源为相邻子载波组成的多组子载波资源, 各个天线使用这些子载波组中不同编号的子载波。各小区的第一类 RAU 将接收到的探测信号回传给各小区基站, 估计各用户的信道参数, 由此计算出各用户的统计信道信息。各小区的第二类 RAU 根据接收到的探测信号计算出所需的统计信道信息, 并发送到中心处理单元。小区的边缘用户除了本小区可以进行统计信道信息获取, 同时相邻小区也可以进行统计信道信息获取。

[0040] 图 2 (b) 为相邻小区上行探测信号资源三色复用下各小区各用户探测信号所占时频资源情况, 图中水平方向表示时间, 垂直方向表示 OFDM 子载波, 不同的斜线阴影表示各小区不同用户进行统计信道信息获取时占用的时频资源。记 OFDM 子载波集合为 $\mathcal{C} = \{1, 2, \dots, 3MKN_s\}$, 其中 M 表示每个用户配置的收发天线数, K 表示小区中用户数, N_s 表示各用户使用的子载波组数, 小区 c 中用户 i 的第 m 个天线上发送的探测信号所占的子载波集合为:

[0041]
$$U_{i,c}^m = \bigcup_{1 \leq k \leq N_s} \{(i-1)M + m + (k-1)MK + (f_c - 1)N_s MK\},$$
 f_c 表示小区 c 探测信号复用标识号, 因此, 小区 c 中第 i 个用户的 M 根天线上发送的探测信号所占的子载波集合为

$$U_{i,c} = \{U_{i,c}^1, U_{i,c}^2, \dots, U_{i,c}^M\}。$$

[0042] 小区 c 中各用户统计信道信息通过如下信道探测过程得到：

[0043] 步骤 1：计算各用户上行链路信道参数：小区 c 中第 i 个用户的第 m 个天线在第 t 个时隙第 l(i, k, m) 个子载波上的信道参数由下式计算：

$$[0044] \quad \hat{\mathbf{g}}_{i,c,t,l(i,k,m)}^{r,c} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{x}_{i,c,t,l(i,k,m)}^{r,c}} \mathbf{y}_{i,c,t,l(i,k,m)}^{r,c}$$

[0045] 其中， $\mathbf{y}_{i,c,t,l(i,k,m)}^{r,c}$ 为小区 c 中第 r 个 RAU 接收信号矢量，第 l(i, k, m) 个子载波上发送的探测信号为 $\mathbf{x}_{i,c,t,l(i,k,m)}^{r,c}$ ，其中 $l(i, k, m) = (i-1)M + (k-1)MK + (f_c-1)N_sMK + m$ 表示为小区 c 中第 i 个用户的第 m 个天线使用第 k 组中第 m 个子载波；

[0046] 将第 i 个用户 M 个天线的信道参数构成如下信道矩阵：

$$[0047] \quad \hat{\mathbf{G}}_{i,c,t,k}^{r,c} = \left[\hat{\mathbf{g}}_{i,c,t,l(i,k,1)}^{r,c}, \hat{\mathbf{g}}_{i,c,t,l(i,k,2)}^{r,c}, \dots, \hat{\mathbf{g}}_{i,c,t,l(i,k,M)}^{r,c} \right]$$

[0048] 步骤 2：计算各用户的上行链路统计信道信息：

[0049]

$$\mathbf{R}_{i,c,r,c}^u \approx \frac{1}{N_s \tau} \sum_{t=1}^{\tau} \sum_{k=1}^{N_s} \hat{\mathbf{G}}_{i,c,t,k}^{k,c} \left(\hat{\mathbf{G}}_{i,c,t,k}^{k,c} \right)^H$$

[0050] 利用信道的互易性计算各用户的下行链路的统计信道信息：

[0051]

$$\mathbf{R}_{i,c,r,c}^d \approx \frac{1}{N_s \tau} \sum_{t=1}^{\tau} \sum_{k=1}^{N_s} \left(\hat{\mathbf{G}}_{i,c,t,k}^{k,c} \right)^H \hat{\mathbf{G}}_{i,c,t,k}^{k,c}$$

[0052] 其中，上标 H 表示共轭转置， τ 为发送探测信号的次数。

[0053] 步骤 3：计算用户 i 在 RAU 集合 $\mathcal{B}_{i,c}$ 的上行链路统计信道信息：

[0054]

$$\left[\tilde{\mathbf{R}}_{i,c}^u \right]^{\mathcal{B}_{i,c}} = \text{diag}(\dots, \mathbf{R}_{i,c,r,c}^u, \dots), \quad r \in \mathcal{B}_{i,c}$$

[0055] 用户 i 在 RAU 集合 $\mathcal{B}_{i,c}$ 的下行链路统计信道信息：

[0056]

$$\left[\tilde{\mathbf{R}}_{i,c}^d \right]^{\mathcal{B}_{i,c}} = \sum_{r \in \mathcal{B}_{i,c}} \mathbf{R}_{i,c,r,c}^d$$

[0057] 另外小区 c 除了可以获得本小区用户的统计信道信息，还可以获得相邻小区边缘用户的统计信道信息，例如，假设小区 1、小区 2 和小区 3 中的第 2 个用户都位于三小区的边缘，如图 2 (b) 所示，小区 1 可以在子载波集合 $U_{2,2}$ 和 $U_{2,3}$ 上分别收到小区 2 和小区 3 中第 2 用户的探测信号，小区 2 可以在子载波集合 $U_{2,1}$ 和 $U_{2,3}$ 上分别收到小区 1 和小区 3 中第 2 用户的探测信号，小区 3 可以在子载波集合 $U_{2,1}$ 和 $U_{2,2}$ 上分别收到小区 1 和小区 2 中第 2 用户的探测信号，各小区按照上述 3 步骤同样可以获得相邻小区边缘用户的统计信道信息。

[0058] 4. 系统的调度准则

[0059] 利用 3 中获得的各用户统计信道信息，依据调度准则，如小区和速率最大准则或小区能效最大准则等，对小区中的用户进行调度，确定可使用同一时频资源通信的多个用

户以及各用户使用的 RAU 集合,调度后,通信各用户的 RAU 集合互不重叠,用户与各 RAU 集合进行空分多址传输。

[0060] 以小区 c 中存在 K 个用户和 L 个 RAU 为例, $\mathcal{S}_c \subseteq \{1, 2, \dots, K\}$ 表示小区 c 中被选择进行空分多址通信的用户集合, $|\mathcal{S}_c|$ 为小区 c 中调度的用户数, $\mathcal{B}_{i,c}$ 表示小区 c 中第 i 个用户使用的 RAU 集合, 即 $\mathcal{B}_{i,c} = \{r_1, r_2, \dots, r_{|\mathcal{B}_{i,c}|}\}$, $\mathcal{R}_c \subseteq \bigcup_{i \in \{1, 2, \dots, K\}} \mathcal{B}_{i,c}$ 表示 \mathcal{S}_c 集合的用户使用各自相应 RAU 集合。下面介绍一下系统可以采用的调度准则:

[0061] a) 小区和速率最大准则

[0062] 对于上行链路, 设用户发射功率为 P^u , 接收信号中噪声的方差为 σ^2 , 根据小区和速率最大准则, 去调度用户和相应 RAU 集合的组合。选择上行链路用户集合和相应 RAU 集合的公式为:

[0063]

$$\{\mathcal{S}_c^u, \mathcal{R}_c^u\} = \arg \max_{\substack{\mathcal{S}_c \subseteq \{1, 2, \dots, K\} \\ \mathcal{R}_c \subseteq \bigcup_{i \in \{1, 2, \dots, K\}} \mathcal{B}_{i,c}}} \mathbf{R}(\mathcal{S}_c, \mathcal{R}_c)$$

[0064]

$$s.t. \quad \forall i, j, \mathcal{B}_{i,c} \cap \mathcal{B}_{j,c} = \emptyset$$

[0065]

$$\forall i, |\mathcal{B}_{i,c}| \leq N_{th}$$

[0066] 其中, $\forall i, j, \mathcal{B}_{i,c} \cap \mathcal{B}_{j,c} = \emptyset$ 表示为每个 RAU 集合只能服务于一个用户, N_{th} 表示每个 RAU 集合最多使用 RAU 的数目, 例如一般设 N_{th} 为 $1 \sim 3$; $\mathbf{R}(\mathcal{S}_c, \mathcal{R}_c)$ 表示用户集合 \mathcal{S}_c 中的用户与对应的 RAU 集合 \mathcal{R}_c 进行上行链路通信时的系统和速率, 其近似表达式为:

[0067]

$$\mathbf{R}(\mathcal{S}_c, \mathcal{R}_c) \approx \sum_{i \in \mathcal{S}_c} \log \frac{\det \left(P^u \sum_c \sum_{j \in \mathcal{S}_c} [\tilde{\mathbf{R}}_{j,c}^u]^{|\mathcal{B}_{i,c}|} + \sigma^2 \mathbf{I}_{N_{|\mathcal{B}_{i,c}|}} \right)}{\det \left(P^u \sum_{j \in \mathcal{S}_c, j \neq i} [\tilde{\mathbf{R}}_{j,c}^u]^{|\mathcal{B}_{i,c}|} + \sum_{c' \neq c} \sum_{j \in \mathcal{S}_{c'}} [\tilde{\mathbf{R}}_{j,c'}^u]^{|\mathcal{B}_{i,c}|} + \sigma^2 \mathbf{I}_{N_{|\mathcal{B}_{i,c}|}} \right)}$$

[0068] 其中, $[\tilde{\mathbf{R}}_{j,c}^u]^{|\mathcal{B}_{i,c}|} = \text{diag} \left(\mathbf{R}_{j,c,r_1,c}^u, \mathbf{R}_{j,c,r_2,c}^u, \dots, \mathbf{R}_{j,c,r_{|\mathcal{B}_{i,c}|},c}^u \right)$ 表示小区 c 的基站在 RAU 集合 $\mathcal{B}_{i,c}$ 上获得用户 j 的上行链路统计信道信息, $\text{diag}(\cdot)$ 表示对角阵, $\mathbf{I}_{N_{|\mathcal{B}_{i,c}|}}$ 为 $N_{|\mathcal{B}_{i,c}|} \times N_{|\mathcal{B}_{i,c}|}$ 的单位阵;

[0069] 同理选择下行链路用户集合和相应 RAU 集合的公式为:

[0070]

$$\{\mathcal{S}_c^d, \mathcal{R}_c^d\} = \arg \max_{\substack{\mathcal{S}_c \subseteq \{1, 2, \dots, K\} \\ \mathcal{R}_c \subseteq \bigcup_{i \in \{1, 2, \dots, K\}} \mathcal{B}_{i,c}}} \mathbf{R}(\mathcal{S}_c, \mathcal{R}_c)$$

[0071]

$$s.t. \quad \forall i, j, \mathcal{B}_{i,c} \cap \mathcal{B}_{j,c} = \emptyset$$

[0072]

$$\forall i, |\mathcal{B}_{i,c}| \leq N_{th}$$

[0073] 其系统和速率的近似表达式为

[0074]

$$R(\mathcal{S}_c, \mathcal{R}_c) \approx \sum_{i \in \mathcal{S}_c} \log \frac{\det \left(P^d \sum_c \sum_{j \in \mathcal{S}_c} [\tilde{\mathbf{R}}_{i,c}^d]^{B_{j,c}} + \sigma^2 \mathbf{I}_M \right)}{\det \left(P^d \sum_{j \in \mathcal{S}_c, j \neq i} [\tilde{\mathbf{R}}_{i,c}^d]^{B_{j,c}} + P^d \sum_{c' \neq c} \sum_{j \in \mathcal{S}_{c'}} [\tilde{\mathbf{R}}_{i,c'}^d]^{B_{j,c'}} + \sigma^2 \mathbf{I}_M \right)}$$

[0075] 其中 $[\tilde{\mathbf{R}}_{i,c}^d]^{B_{j,c}} = \sum_{r \in \mathcal{B}_{j,c}} \mathbf{R}_{i,c,r}^d$ 表示小区 c 的基站在 RAU 集合 $\mathcal{B}_{j,c}$ 上获得用户 i 的下行链路统计信道信息, \mathbf{I}_M 为 $M \times M$ 的单位阵。

[0076] b) 小区能效最大准则

[0077] 对于上行链路, 根据小区能效最大准则去选择用户集合和相应 RAU 集合的公式为:

[0078]

$$\{\mathcal{S}_c^u, \mathcal{R}_c^u\} = \arg \max_{\substack{\mathcal{S}_c \subseteq \{1, 2, \dots, K\} \\ \mathcal{R}_c \subseteq \bigcup_{i \in \{1, 2, \dots, K\}} \mathcal{B}_{i,c}}} \sum_{i \in \mathcal{S}_c} \frac{R_i(\mathcal{S}_c, \mathcal{R}_c)}{P_i}$$

[0079]

$$s.t. \quad \forall i, j, \mathcal{B}_{i,c} \cap \mathcal{B}_{j,c} = \emptyset$$

[0080]

$$\forall i, |\mathcal{B}_{i,c}| \leq N_{th}$$

[0081] 其用户 i 的上行链路速率近似表达式为:

[0082]

$$R_i(\mathcal{S}_c, \mathcal{R}_c) \approx \log \frac{\det \left(P^u \sum_c \sum_{j \in \mathcal{S}_c} [\tilde{\mathbf{R}}_{j,c}^u]^{B_{i,c}} + \sigma^2 \mathbf{I}_{N|\mathcal{B}_{i,c}|} \right)}{\det \left(P^u \sum_{j \in \mathcal{S}_c, j \neq i} [\tilde{\mathbf{R}}_{j,c}^u]^{B_{i,c}} + \sum_{c' \neq c} \sum_{j \in \mathcal{S}_{c'}} [\tilde{\mathbf{R}}_{j,c'}^u]^{B_{i,c'}} + \sigma^2 \mathbf{I}_{N|\mathcal{B}_{i,c}|} \right)}$$

[0083] 其中 $P_i = P^u / \zeta + P_{ms} + |\mathcal{B}_{i,c}| P_{rau}$, $|\mathcal{B}_{i,c}|$ 为 RAU 集合中 RAU 的数目, P_{ms} 为用户终端电路和信号处理的功率, P_{rau} 为 RAU 和中心处理单元电路和信号处理的功率, ζ 为放大器效率系数。

[0084] 同理选择下行链路用户集合和相应 RAU 集合的公式为:

[0085]

$$\{\mathcal{S}_c^d, \mathcal{R}_c^d\} = \arg \max_{\substack{\mathcal{S}_c \subseteq \{1, 2, \dots, K\} \\ \mathcal{R}_c \subseteq \bigcup_{i \in \{1, 2, \dots, K\}} \mathcal{B}_{i,c}}} \sum_{i \in \mathcal{S}_c} \frac{R_i(\mathcal{S}_c, \mathcal{R}_c)}{P_i}$$

[0086]

$$s.t. \quad \forall i, j, \mathcal{B}_{i,c} \cap \mathcal{B}_{j,c} = \emptyset$$

[0087]

$$\forall i, |\mathcal{B}_{i,c}| \leq N_{th}$$

[0088] 其用户 i 的下行链路速率近似表达式为：

[0089]

$$R_i(\mathcal{S}_c, \mathcal{R}_c) \approx \log \frac{\det \left(P^d \sum_c \sum_{j \in \mathcal{S}_c} [\tilde{\mathbf{R}}_{i,c}^d]^{B_{j,c}} + \sigma^2 \mathbf{I}_M \right)}{\det \left(P^d \sum_{j \in \mathcal{S}_c, j \neq i} [\tilde{\mathbf{R}}_{i,c}^d]^{B_{j,c}} + P^d \sum_{c' \neq c} \sum_{j \in \mathcal{S}_{c'}} [\tilde{\mathbf{R}}_{i,c'}^d]^{B_{j,c'}} + \sigma^2 \mathbf{I}_M \right)}$$

[0090] 其中 $P_i = |\mathcal{B}_{i,c}| \left(P^d / \zeta + P_{rau} \right) + P_{ms}$, $|\mathcal{B}_{i,c}|$ 为 RAU 集合中 RAU 的数目。

[0091] 为了得到上下行链路一致的调度用户及其相应 RAU 集合,可以采用上行链路与下行链路的性能加权求和最大来调度。

[0092] 5. 小区边缘用户信道信息交互与调度实施过程

[0093] 按照 4 中的调度准则,需要共享相邻小区所有用户的统计信道信息,并实施全局集中式调度才能获得最优解,但在实际系统中不可能获得所有小区所有用户的统计信道信息,每个小区基站只能获得本小区用户的统计信道信息,以及相邻小区边缘用户交互的统计信道信息,因此各小区必须实施分区域集中式调度算法,具体的实施步骤如下:

[0094] 步骤 1:根据各小区用户发送的上行探测信号,利用(3)中实施步骤获得各用户的统计信道信息,并判断用户和 RAU 是否在小区的边缘区域:

[0095] 小区 c 中第 r 个 RAU 收到本小区用户 i 的探测信号,可获得统计信道信息 $\mathbf{R}_{i,c,r,c}^u$ 和 $\mathbf{R}_{i,c,r,c}^d$,同时小区 c 中第 r 个 RAU 在其它时频资源上收到相邻小区 c' 中用户 j 的探测信号,可获得统计信道信息 $\mathbf{R}_{j,c',r,c}^u$ 和 $\mathbf{R}_{j,c',r,c}^d$,根据如下几种情况,判断用户和 RAU 是否处于小区边缘区域:[0096] 1) $\text{Tr}(\mathbf{R}_{i,c,r,c}^u) \geq \rho_{th}$ 且 $\rho_I < \text{Tr}(\mathbf{R}_{j,c',r,c}^u) \leq \rho_{th}$,该条件说明小区 c 第 r 个 RAU 可能与本小区用户 i 通信,而对相邻小区 c' 中用户 j 造成干扰,因此 $\{\mathbf{R}_{i,c,r,c}^u, \mathbf{R}_{i,c,r,c}^d, \mathbf{R}_{j,c',r,c}^u, \mathbf{R}_{j,c',r,c}^d\}$ 需要交互:[0097] 2) $\text{Tr}(\mathbf{R}_{i,c,r,c}^u) \geq \rho_{th}$ 且 $\text{Tr}(\mathbf{R}_{j,c',r,c}^u) \geq \rho_{th}$,说明小区 c 第 r 个 RAU 可能与本小区用户 i 通信,也可能与相邻小区 c' 中用户 j 通信,因此 $\{\mathbf{R}_{i,c,r,c}^u, \mathbf{R}_{i,c,r,c}^d, \mathbf{R}_{j,c',r,c}^u, \mathbf{R}_{j,c',r,c}^d\}$ 需要交互:[0098] 3) $\rho_I \leq \text{Tr}(\mathbf{R}_{i,c,r,c}^u) \leq \rho_{th}$ 且 $\text{Tr}(\mathbf{R}_{j,c',r,c}^u) \geq \rho_{th}$,说明小区 c 第 r 个 RAU 可能与相邻小

区 c' 中用户 j 通信, 而对本小区用户 i 造成干扰, 因此 $\{\mathbf{R}_{i,c,r,c}^u, \mathbf{R}_{i,c,r,c}^d, \mathbf{R}_{j,c',r,c}^u, \mathbf{R}_{j,c',r,c}^d\}$ 需要交互;

[0099] 4) $\rho_I \leq \text{Tr}(\mathbf{R}_{i,c,r,c}^u) \leq \rho_{th}$ 且 $\rho_I \leq \text{Tr}(\mathbf{R}_{j,c',r,c}^u) \leq \rho_{th}$, 说明小区 c 中第 r 个 RAU 对本小区用户 i 与相邻小区 c' 中用户 j 造成干扰, 该 RAU 不可能被调度, 所以无需交互。

[0100] 其中 ρ_{th} 为相邻 RAU 大尺度衰落门限, ρ_I 为干扰 RAU 大尺度衰落门限, 满足上述前 3 种情况的所有用户和 RAU 都位于小区的边缘区域。

[0101] 步骤 2: 各小区按照步骤 1 可找出各自小区边缘用户集合以及边缘用户的 RAU 集合, 并与相邻小区交互边缘用户的统计信道信息;

[0102] 小区 c 按照步骤 1 可得到边缘用户集合 \mathcal{U}_e^c 和边缘用户的 RAU 集合 $\bigcup_{i \in \mathcal{U}_e^c} \mathcal{B}_{i,c}$, 相邻小区 c' 可得到边缘用户集合 $\mathcal{U}_e^{c'}$ 和边缘用户的 RAU 集合 $\bigcup_{i \in \mathcal{U}_e^{c'}} \mathcal{B}_{i,c'}$;

[0103] 小区 c 需要将本小区所有边缘用户的统计信道信息 $\bigcup_{j \in \mathcal{U}_e^c, i \in \mathcal{U}_e^c} \{[\tilde{\mathbf{R}}_{j,c}^u]^{\mathcal{B}_{i,c}}\}$, $\bigcup_{j \in \mathcal{U}_e^c, i \in \mathcal{U}_e^c} \{[\tilde{\mathbf{R}}_{j,c}^d]^{\mathcal{B}_{i,c}}\}$ 以及小区 c 将小区 c' 边缘用户集合 $\mathcal{U}_e^{c'}$ 的统计信道信息 $\bigcup_{j \in \mathcal{U}_e^{c'}, i \in \mathcal{U}_e^c} \{[\tilde{\mathbf{R}}_{j,c'}^u]^{\mathcal{B}_{i,c}}\}$ 、 $\bigcup_{j \in \mathcal{U}_e^{c'}, i \in \mathcal{U}_e^c} \{[\tilde{\mathbf{R}}_{j,c'}^d]^{\mathcal{B}_{i,c}}\}$ 传送给小区 c' 的基站;

[0104] 同理, 小区 c' 需要将本小区所有边缘用户的统计信道信息 $\bigcup_{j \in \mathcal{U}_e^{c'}, i \in \mathcal{U}_e^{c'}} \{[\tilde{\mathbf{R}}_{j,c'}^u]^{\mathcal{B}_{i,c'}}\}$, $\bigcup_{j \in \mathcal{U}_e^{c'}, i \in \mathcal{U}_e^{c'}} \{[\tilde{\mathbf{R}}_{j,c'}^d]^{\mathcal{B}_{i,c'}}\}$ 以及小区 c' 将小区 c 边缘用户集合 \mathcal{U}_e^c 的统计信道信息 $\bigcup_{j \in \mathcal{U}_e^c, i \in \mathcal{U}_e^{c'}} \{[\tilde{\mathbf{R}}_{j,c}^u]^{\mathcal{B}_{i,c'}}\}$ 、 $\bigcup_{j \in \mathcal{U}_e^c, i \in \mathcal{U}_e^{c'}} \{[\tilde{\mathbf{R}}_{j,c}^d]^{\mathcal{B}_{i,c'}}\}$ 传送给小区 c 的基站;

[0105] 为了方便描述, 将相邻小区的边缘区域的用户集合表示 $\mathcal{U}_e = \mathcal{U}_e^c \cup \mathcal{U}_e^{c'}$, 相应的 RAU 集合表示 $\mathcal{B}_e = \bigcup_{i \in \mathcal{U}_e} \mathcal{B}_{i,e}$, 其中 $\mathcal{B}_{i,e}$ 表示边缘区域用户 i 的 RAU 集合, 边缘区域共享的统计信道信息为 $\bigcup_{i,j \in \mathcal{U}_e} \{[\tilde{\mathbf{R}}_{j,e}^u]^{\mathcal{B}_{i,e}}\}$ 和 $\bigcup_{i,j \in \mathcal{U}_e} \{[\tilde{\mathbf{R}}_{j,e}^d]^{\mathcal{B}_{i,e}}\}$ 。

[0106] 步骤 3: 根据步骤 2 共享的统计信道信息, 小区 c 和小区 c' 同时利用 (4) 的调度准则实施边缘区域用户的调度, 避让相邻小区的干扰;

[0107] a) 根据系统边缘和速率最大准则, 选择上行链路边缘用户集合和相应 RAU 集合的公式为:

[0108]

$$\{\mathcal{S}_e^u, \mathcal{R}_e^u\} = \arg \max_{\substack{\mathcal{S}_e \subseteq \mathcal{U}_e \\ \mathcal{R}_e \subseteq \mathcal{B}_e}} \mathbf{R}(\mathcal{S}_e, \mathcal{R}_e)$$

[0109]

$$s.t. \quad \forall i, j, \mathcal{B}_{i,e} \cap \mathcal{B}_{j,e} = \emptyset$$

[0110]

$$\forall i, |\mathcal{B}_{i,e}| \leq N_{th}$$

[0111] 同理,选择下行链路边缘用户集合和相应 RAU 集合的公式为:

[0112]

$$\{\mathcal{S}_e^d, \mathcal{R}_e^d\} = \arg \max_{\substack{\mathcal{S}_e \subseteq \mathcal{U}_e \\ \mathcal{R}_e \subseteq \mathcal{B}_e}} R(\mathcal{S}_e, \mathcal{R}_e)$$

[0113]

$$s.t. \quad \forall i, j, \mathcal{B}_{i,e} \cap \mathcal{B}_{j,e} = \emptyset$$

[0114]

$$\forall i, |\mathcal{B}_{i,e}| \leq N_{th}$$

[0115] b) 根据系统边缘能效最大准则选择上行链路边缘用户集合和相应 RAU 集合的公式为:

[0116]

$$\{\mathcal{S}_e^u, \mathcal{R}_e^u\} = \arg \max_{\substack{\mathcal{S}_e \subseteq \mathcal{U}_e \\ \mathcal{R}_e \subseteq \mathcal{B}_e}} \sum_{i \in \mathcal{S}_e} \frac{R_i(\mathcal{S}_e, \mathcal{R}_e)}{P_i}$$

[0117]

$$s.t. \quad \forall i, j, \mathcal{B}_{i,e} \cap \mathcal{B}_{j,e} = \emptyset$$

[0118]

$$\forall i, |\mathcal{B}_{i,e}| \leq N_{th}$$

[0119] 其中 $P_{Total} = P_u / \zeta + P_{ms} + |\mathcal{B}_{i,e}| P_{rau}$, $|\mathcal{B}_{i,e}|$ 为边缘用户 RAU 集合中 RAU 的数目, P_{ms} 为用户终端电路和信号处理的功率, P_{rau} 为 RAU 和中心处理单元电路和信号处理的功率, ζ 为放大器效率系数。

[0120] 同理,选择下行链路边缘用户集合和相应 RAU 集合的公式为:

[0121]

$$\{\mathcal{S}_e^d, \mathcal{R}_e^d\} = \arg \max_{\substack{\mathcal{S}_e \subseteq \mathcal{U}_e \\ \mathcal{R}_e \subseteq \mathcal{B}_e}} \sum_{i \in \mathcal{S}_e} \frac{R_i(\mathcal{S}_e, \mathcal{R}_e)}{P_i}$$

[0122]

$$s.t. \quad \forall i, j, \mathcal{B}_{i,e} \cap \mathcal{B}_{j,e} = \emptyset$$

[0123]

$$\forall i, |\mathcal{B}_{i,e}| \leq N_{th}$$

[0124] 其中 $P_i = |\mathcal{B}_{i,e}| (P^d / \zeta + P_{rau}) + P_{ms}$, $|\mathcal{B}_{i,e}|$ 为边缘用户 RAU 集合中 RAU 的数目。

[0125] 为得到上下行链路一致的调度边缘用户及其相应 RAU 集合,可以采用上行链路与下行链路的性能加权求和最大来调度。

[0126] 步骤 4 :小区 c 和小区 c' 同时再利用(4)的调度准则实施各自小区用户调度 ;

[0127] 按照上述同样的方法可以实现相邻多小区之间统计信道信息的交互,并且每个小区执行相同的调度算法。

[0128] 6. 密集分布式无线通信的实现方法 :

[0129] 本发明实施例提供了一种密集分布式无线通信方法如图 3 所示,该方法包括以下步骤 :

[0130] 步骤 301 :唤醒休眠的 RAU,各小区各用户根据预先分配的不同时频资源,发送上行探测信号。

[0131] 步骤 302 :各小区第一类 RAU 在不同时频资源上接收探测信号,并且将接收的探测信号回传给中心处理单元,中心处理单元通过基带信号处理,获得每个用户的统计信道信息 ;第二类 RAU 根据接收到的探测信号计算出所需的统计信道信息,并发送到中心处理单元。

[0132] 步骤 303 :根据获得各用户的统计信道信息来判断用户和 RAU 是否位于小区的边缘区域,从而获取边缘区域用户的统计信道信息,并与相邻小区共享该边缘区域用户的统计信道信息。

[0133] 步骤 304 :根据相邻小区共享的边缘区域用户统计信道信息,相邻小区同时利用 4 的调度准则实施边缘区域用户及其 RAU 集合的调度,避让相邻小区的干扰。

[0134] 步骤 305 :在完成了边缘区域用户及其相应 RAU 集合的调度,同时再利用 4 的调度准则实施各自小区内部用户及其相应 RAU 集合的调度。

[0135] 步骤 306 :在此次调度周期内,可以将未被调度的 RAU 设置为休眠模式,等待下一个调度周期,唤醒休眠的 RAU,进行统计信道信息的获取。

[0136] 步骤 307 :调度的用户与其相应 RAU 集合在分配的时频资源上同时进行无线通信。

[0137] 在本申请所提供的实施例中,应该理解到,所揭露的方法,在没有超过本申请的精神和范围内,可以通过其他的方式实现。当前的实施例只是一种示范性的例子,不应该作为限制,所给出的具体内容不应该限制本申请的目的。例如,多个单元或组件可以结合或者可以集成到另一个系统,或一些特征可以忽略,或不执行。

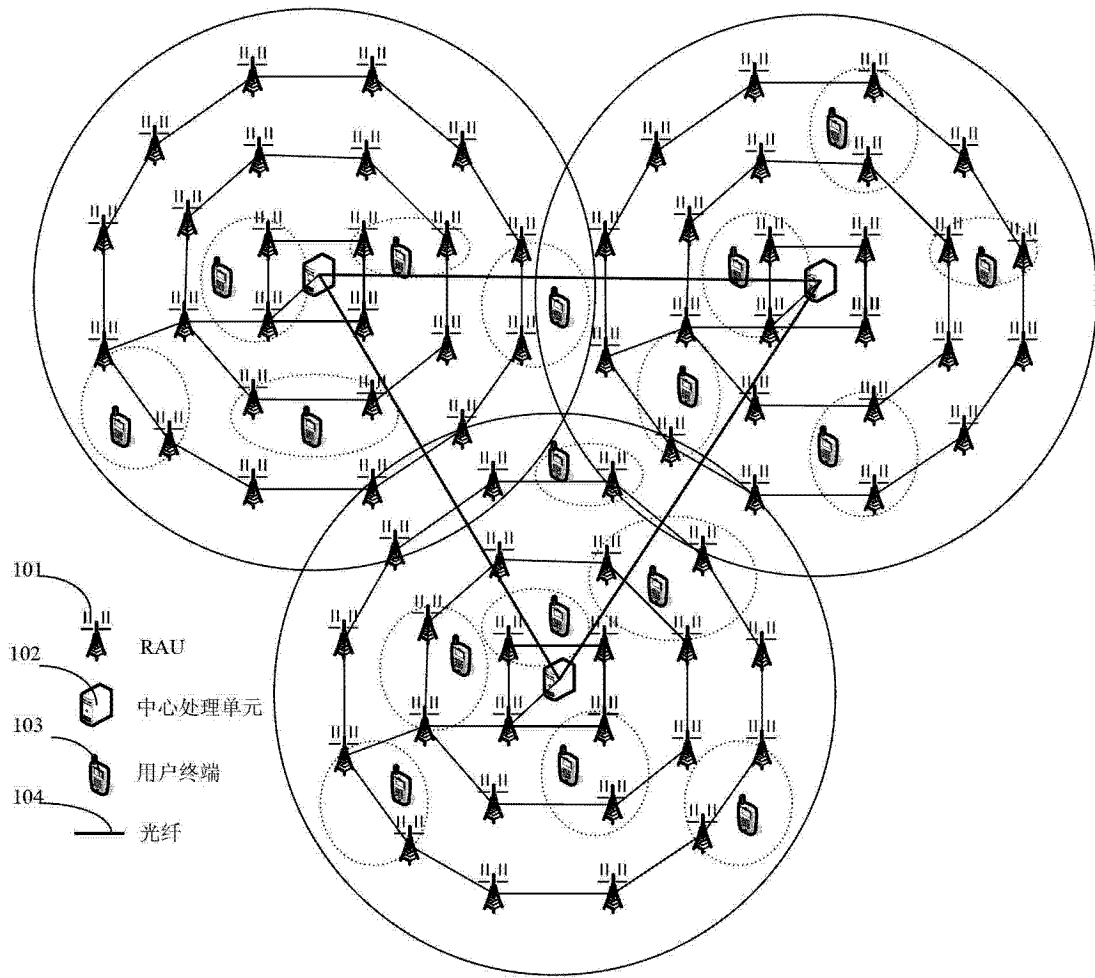


图 1

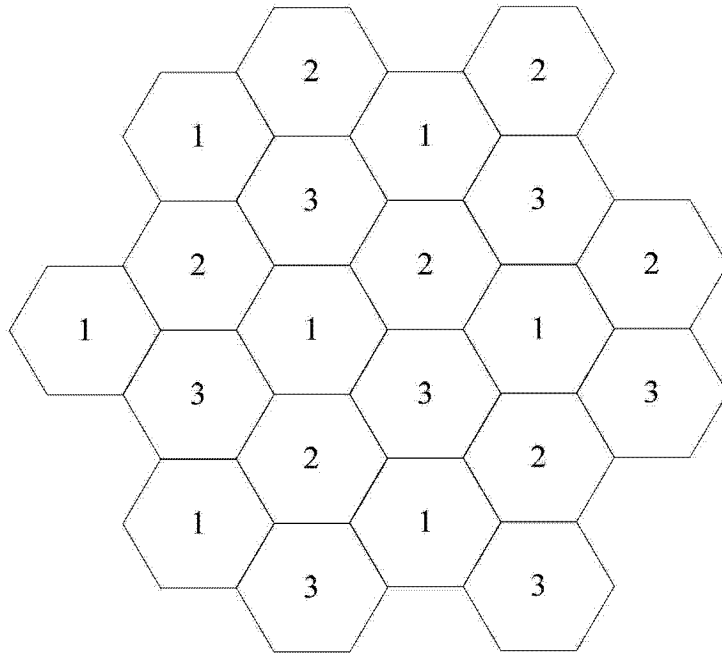


图 2(a)

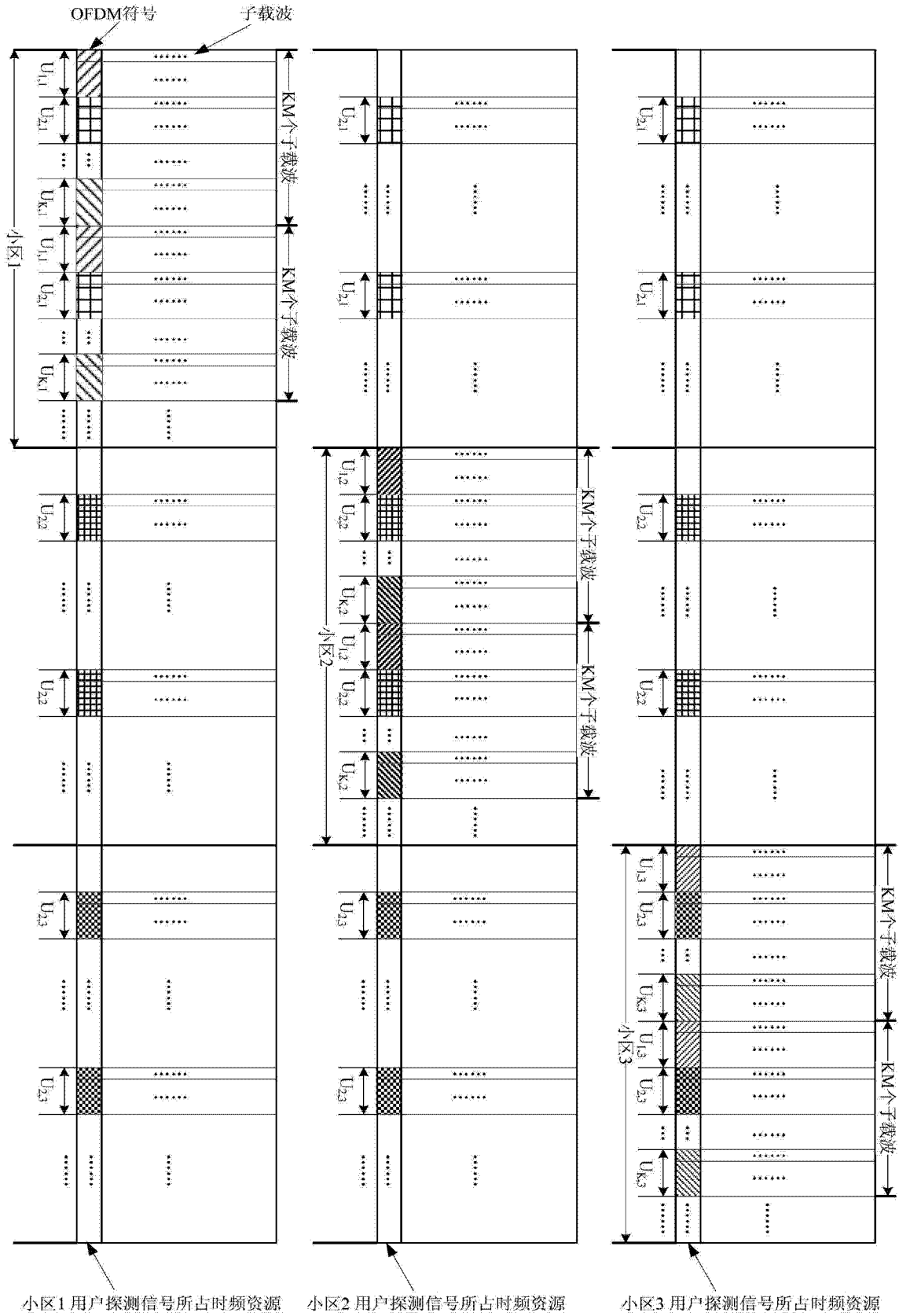


图 2(b)

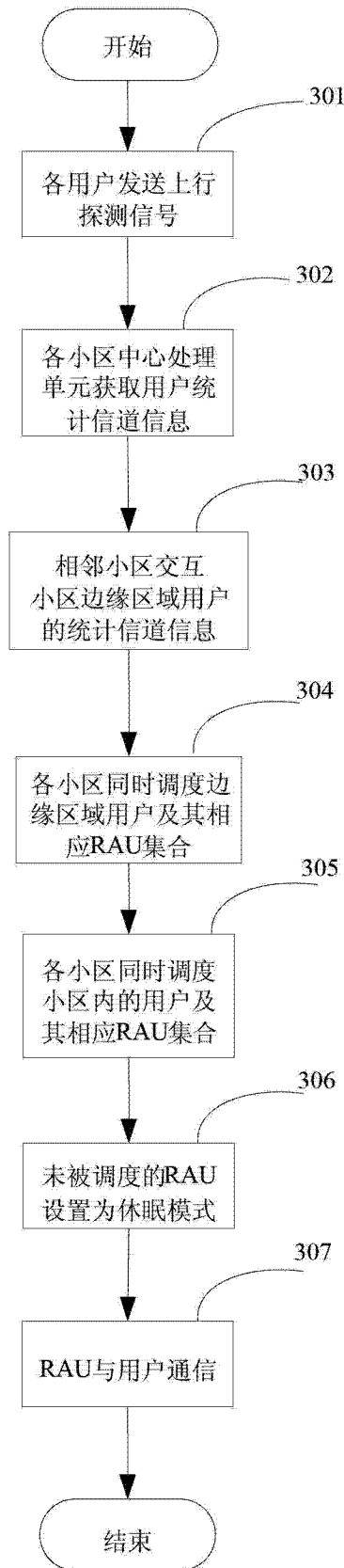


图 3