



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106230493 B

(45)授权公告日 2019.08.06

(21)申请号 201610879164.5

(22)申请日 2016.09.30

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 106230493 A

(43)申请公布日 2016.12.14

(73)专利权人 清华大学深圳研究生院  
地址 518055 广东省深圳市南山区西丽大  
学城清华校区

(72)发明人 董宇涵 唐圆圆 钱思远

(74)专利代理机构 深圳新创友知识产权代理有  
限公司 44223

代理人 江耀纯

(51)Int.Cl.

H04B 7/06(2006.01)

H04B 7/0452(2017.01)

(56)对比文件

US 2014044043 A1,2014.02.13,  
CN 103763782 A,2014.04.30,  
Mouncef Benmimoune etc..《Joint  
transmit antenna selection and user  
scheduling for Massive MIMO systems》.《  
2015 IEEE Wireless Communications and  
Networking Conference (WCNC)》.2015,  
Guozhen Xu etc..《Joint user  
scheduling and antenna selection in  
distributed massive MIMO systems with  
limited backhaul capacity》.《China  
Communications》.2014,第11卷(第5期),

审查员 杨薇

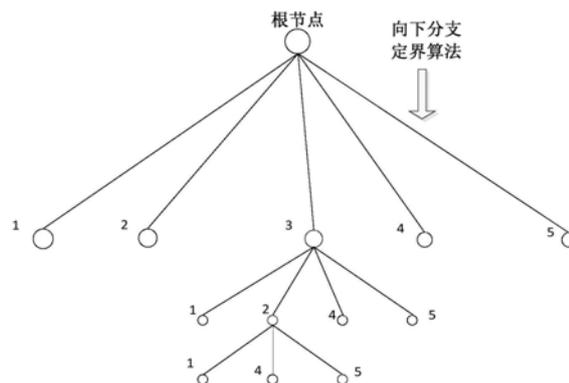
权利要求书3页 说明书10页 附图5页

(54)发明名称

一种多用户MIMO上行链路天线选择和用户  
调度方法

(57)摘要

本发明涉及一种多用户MIMO上行链路天线  
选择和用户调度方法,基于用户半正交性选择的  
向下分支定界(Downwards Branch and Bound,  
DBAB)、局部迭代寻优算法搜索信道矩阵最大  
MSV,实现联合天线选择和用户调度;该算法以信  
道容量为评价指标,局部最优的速率性能更好,  
逼近穷举算法(Brute-Force Search,BFS);同  
时,该算法的计算复杂度远低于穷举法,具有较  
大应用价值,在多用户MIMO系统中是一种有前  
景的天线选择和用户调度方法。



1. 一种多用户MIMO上行链路天线选择和用户调度方法,其特征在于:包括如下步骤:

S1、基于半正交性用户选择的向下分支定界算法:找到使信道矩阵的最小奇异值最大的天线集合A与用户集合U的局部最优解;

S2、基于天线与用户集合元素交换的局部迭代寻优算法更新最优解,包括:

S2a、根据步骤S1向下分支定界算法获得的局部最优的天线与用户集合A、U,将其设置为初始点P(A1,U1);

S2b、固定天线集合A1,基于确定的天线集合A1利用SUS算法寻找用户集合U2;集合(A1,U2)构成点q,如果在q点计算获得系统的和速率大于在p点的和速率,则更新最优解(A,U)=(A1,U2);

S2c、固定用户集合U2,利用DBAB算法寻找到最优的天线集合A2,构成点R;如果在R点的系统和速率大于在q点的系统和速率,则更新最优解为(A,U)=(A2,U2);

S3、重复步骤S2直到天线集合A和用户集合U都不再发生变化。

2. 如权利要求1所述的多用户MIMO上行链路天线选择和用户调度方法,其特征在于:步骤S1中,采用先向下分支、再选择半正交用户集合、最后边界确定进行天线选择。

3. 如权利要求2所述的多用户MIMO上行链路天线选择和用户调度方法,其特征在于所述步骤S1具体如下:先利用SUS算法选择各天线分支最合适的用户集合U,再求解各天线分支的 $J(A-i,U) = \lambda_{\min}(H_{(A-i,U)})$ ,确定最优的搜索方向A-i,通过(M-N)次迭代,能得到当前的信道矩阵下的局部最优集合A、U。

4. 如权利要求1所述的多用户MIMO上行链路天线选择和用户调度方法,其特征在于所述步骤S1更具体如下:

S1a、基站获取信道矩阵H,获得系统的AFE模块数量N、天线数量M和用户数量k;初始化待选天线集合A和搜索循环的轮数t:

$$A = \{1, \dots, M\}$$

$$t = 1$$

S1b、对于任意天线元素 $i \in A$ ,从天线集合A中移出该天线i后生成集合A-i,并基于该天线集合获取当前的信道矩阵H-i;

S1c、调用半正交用户选择(SUS)算法,传递对应信道矩阵H-i和单次能被服务的用户数N,生成对应的用户集合U-i;

S1d、根据A-i、U-i计算对应的信道矩阵的最小奇异值 $\lambda_{\min}(\mathbf{H}_{(A-i,U-i)})$ ,找出让最小奇异值最大的天线集合与用户集合A-i、U-i,其指示满足:

$$m = \arg \max_{i \in A} (\lambda_{\min}(\mathbf{H}_{(A-i,U-i)}))$$

$$A \leftarrow \{i \in A, i \neq m\}$$

$$U = U_m$$

S1e、如果 $|A| > N$ , $t \leftarrow t+1$ ,重复S1b~S1d;如果 $|A| = N$ ,停止迭代过程,输出局部最优的天线集合与用户集合A、U。

5. 如权利要求1所述的多用户MIMO上行链路天线选择和用户调度方法,其特征是所述步骤S3为:S2d、重复步骤S2b、S2c,直到系统和速率不再增加,此时的解集合就是最终输出

的天线集合和用户集合。

6. 如权利要求2所述的多用户MIMO上行链路天线选择和用户调度方法,其特征是步骤S1中的向下分支步骤中所用的向下分支定界算法包括天线子集分支、半正交用户选择、搜索方向确定三个步骤。

7. 如权利要求6所述的多用户MIMO上行链路天线选择和用户调度方法,其特征是:所述天线子集分支包括如下步骤:

a) 基站获取信道矩阵H,获得系统的AFE模块数量N、天线数量M和用户数量k;初始化待选天线集合A和搜索循环的轮数t:

$$A = \{1, \dots, M\}$$

$$t = 1$$

b) 对于任意天线元素 $i \in A$ ,从天线集合A中移出该天线i后生成集合 $A_{-i}$ ,并基于该天线集合获取当前的信道矩阵 $H_{-i}$ ;

c) 调用半正交用户选择(SUS)算法,传递对应信道矩阵 $H_{-i}$ 和单次能被服务的用户数N,生成对应的用户集合 $U_{-i}$ ;

d) 根据 $A_{-i}$ 、 $U_{-i}$ 计算对应的信道矩阵的最小奇异值 $\lambda_{\min}(\mathbf{H}_{(A_{-i}, U_{-i})})$ ,找出让最小奇异值最大的天线集合与用户集合 $A_{-i}$ 、 $U_{-i}$ ,其指示满足:

$$m = \arg \max_{i \in A} (\lambda_{\min}(\mathbf{H}_{(A_{-i}, U_{-i})}))$$

$$A \leftarrow \{i \in A, i \neq m\}$$

$$U = U_{-m}$$

如果 $|A| > N$ ,  $t \leftarrow t + 1$ ,重复b) ~ d); 如果 $|A| = N$ ,停止迭代过程,输出局部最优的天线集合与用户集合A、U。

8. 如权利要求6所述的多用户MIMO上行链路天线选择和用户调度方法,其特征是所述半正交用户选择包括:

参数初始化:根据CSI信息,小区中总用户数为K,初始化待选的用户集合 $T_1$ 和第i个被选用户:

$$T_1 = \{1, \dots, K\}$$

$$i = 1$$

被选择服务的用户集合U为空集:

$$U = \emptyset$$

对于每个用户 $k \in T_i$ ,基于信道向量 $h_k$ 计算其与扩展空间 $\{g^{(1)}, \dots, g^{(i-1)}\}$ 的正交分量 $g_k$ :

$$g_k = h_k - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{h_k g_{(j)}^*}{\|g_{(j)}\|^2} g_{(j)}$$

当 $i = 1$ 时, $g_k = h_k$ ,其中,正交向量基 $g_{(j)}$ 为已选择用户 $j = 1, \dots, (i-1)$ 的有效正交分量;

寻找第i个最佳被服务用户 $\pi(i)$ ,该符号 $\pi(i)$ 指第i轮从待选用户集 $T_i$ 中选择的条件最好的被服务用户的编号:

$$\pi(i) = \arg \max_{k \in T_i} \|g_k\|$$

$U \leftarrow U \cup \pi(i)$

$g^{(i)} = g_{\pi(i)}$

如果  $|U| < N$ ,  $i \leftarrow i+1$ , 更新待选天线集合  $T_{i+1}$  为:

$T_{i+1} = \{k \in T_i, k \neq \pi(i)\}$

返回空间大小为  $N$  的被选择用户集合  $U$ 。

9. 一种多用户MIMO上行链路天线选择和用户调度方法,其特征是包括:

a) 根据向下分支定界算法获得局部最优的天线与用户集合  $A, U$ , 将其设置为初始点  $(A, U)$ ;

b) 保存当前的最优天线与用户集合  $(A_t, U_t) = (A, U)$ ;

c) 在第  $i$  轮中固定天线集合  $A$ , 利用SUS算法求解最优的用户集合  $U_i$ ,  $i=1, 2, \dots$  为迭代轮数; 若此时的平面上的点  $(A, U_i)$  使系统速率  $R(A, U_i) > R(A, U)$  满足, 则更新用户集合  $U=U_i$ 、系统的和速率  $R(A, U) = R(A, U_i)$ ; 否则, 不更新  $U$  和  $R(A, U)$ ;

d) 固定经过步骤c) 更新的用户集合  $U$ , 利用向下分支定界算法能求解当前局部最优的天线集合  $A_i$ , 若此时的平面上的点  $(A_i, U)$  使系统速率  $R(A_i, U) > R(A, U)$ , 则更新天线集合  $A=A_i$ 、系统的和速率  $R(A, U) = R(A_i, U)$ ; 否则, 不更新目标解  $A$  和  $R(A, U)$ ;

e) 比较最优解  $(A_t, U_t)$  与迭代后更新的最优解  $(A, U)$  是否相同; 如果不同, 再次执行 c) ~ e); 如果相同, 停止迭代过程, 输出最后的天线集合  $A$  和用户集合  $U$ 。

## 一种多用户MIMO上行链路天线选择和用户调度方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及第四代和第五代移动通信领域。为解决上述问题,本发明提出了一种多用户MIMO上行链路天线选择和用户调度方法(Joint Antenna Selection and User Scheduling, JASUS),该算法的局部最优的速率性能更好,逼近穷举算法(Brute-Force Search, BFS);同时,该算法的计算复杂度远低于穷举法,具有较大应用价值。故本发明在多用户MIMO系统中是一种有前景的天线选择和用户调度方法。

### 背景技术

[0002] 在现代及未来移动通信系统中,基站通过部署天线阵列来同时服务多个用户,从而构成多用户多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)系统。

[0003] 在过去十年中,无线通信中的MIMO技术以其较高的系统容量和频谱效率而受到世界范围内的研究者广泛关注[见文献1:G.Xu, A.Liu, W.Jiang, H.Xiang, and W.Luo, "Joint user scheduling and antenna selection in distributed massive MIMO systems with limited backhaul capacity," China Communications, vol.11, no. 5, pp.17-30, 2014]。在已经商用的LTE系统中,基于MIMO技术的通信系统已经为移动用户的上网体验带来了巨大提升。

[0004] 在点对点MIMO通信中,信号发送器和接收器都包含多根天线,可实现通信的空间分集和复用。理论上,在不增加额外带宽和发送功率的情况下,MIMO系统所取得的容量随着系统收发天线数量的最小值呈线性增长[见文献2:F.Rusek, D.Persson, L.Buon Kiong, E.G.Larsson, T.L.Marzetta, O.Edfors, and F.Tufvesson, "Scaling up MIMO: opportunities and challenges with very large arrays," IEEE Signal Processing Mag., vol.30, pp.40-60, 2013]。在移动蜂窝通信中,多用户MIMO(Multi-User MIMO, MU-MIMO)通信系统已经被广泛使用。当移动基站获得自身与不同用户的信道状态信息(Channel State Information, CSI)时,基站可以采用合适的预编码(广义的波束赋形)技术同时给多个用户提供信息业务,成倍提高通信速率[见文献3-5:H.Q.Ngo, E.G.Larsson, and T.L.Marzetta, "Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems," IEEE Trans. Commun., vol.61, no.4, pp.1436-1449, Apr.2012; L.Dai, Z.Wang, and Z.Yang, "Spectrally efficient time-frequency training OFDM for mobile large-scale MIMO systems," IEEE J.Sel.Areas Commun., vol.31, no.2, pp.251-263, Feb.2013; Z.Lu, J.Ning, Y.Zhang, T.Xie, and W.Shen, "Richardson method based linear precoding with low complexity for massive MIMO systems," in Proc.of IEEE 81st VTC Spring, 2015, pp.1-4]。目前,在4G标准之一的LTE-Advanced协议规范中最多只包含8根天线的小尺度MIMO(small-scale MIMO)[文献5:Z.Lu, J.Ning, Y.Zhang, T.Xie, and W.Shen, "Richardson method based linear precoding with low complexity for massive MIMO systems," in Proc.of IEEE 81st VTC Spring, 2015, pp.1-4],而Massive MIMO(也称为large-scale MIMO)技术要求基站端包含64甚至上百根天线,被认为

是未来5G通信中最有希望和前景的技术[见文献6-7:E.Larsson, O.Edfors,F.Tufvesson, and T.Marzetta,“Massive MIMO for next generation wireless systems,”IEEE Commun.Mag.,vol.52,no.2,pp.186-195,Feb.2014;Y. Wang and Y.Dong,“A genetic antenna selection algorithm for massive MIMO systems with channel estimation Error,”in Proc.of Advances in Wireless and Optical Commun. (RTUWO),2015,pp.1-4]。在多用户MIMO尤其是Massive MIMO系统中,当基站天线数量足够多时,不同用户到基站的信道近似相互正交[见文献6: Y.Wang and Y.Dong,“A genetic antenna selection algorithm for massive MIMO systems with channel estimation Error,”in Proc.of Advances in Wireless and Optical Commun. (RTUWO),2015,pp.1-4],小尺度信道衰落和非相关噪声也能被消除 [见文献8:M.Benmimoune,E.Driouch,W.Ajib,and D.Massicotte,“Joint transmit antenna selection and user scheduling for massive MIMO systems,”in Proc.of IEEE WCNC,2015,pp.381-386];如果采用合适的预编码技术,可以完全消除不同用户之间信息的干扰。然而,为充分利用基站的天线,设计中需要部署与天线数量相等的AFE模块,这在实际设计中是不适用的。由于基站模拟前端(Analog Front-End, AFE)模块数量受限,上行链路可同时选择的的天线数量和被服务的用户都受到约束。

[0005] 为充分利用大天线阵列的分集、复用增益,节省射频前端资源,天线选择是非常合适的一种选择[见文献8:M.Benmimoune,E.Driouch,W.Ajib,and D. Massicotte,“Joint transmit antenna selection and user scheduling for massive MIMO systems,”in Proc.of IEEE WCNC,2015,pp.381-386]。在AFE资源有限的情况下,天线选择能够选择“最好”的一组天线进行通信,例如选择信道状况最好或者输出信噪比最高的一组天线。研究人员在天线选择方面已经有许多研究成果。在上行链路中,[见文献9:Y.Gao,W.Jiang,and T.Kaiser,“Bidirectional branch and bound based antenna selection in massive MIMO systems,”in Proc.of IEEE 26th PIMRC, 2015,pp.563-568]提出了基于寻找矩阵最大的最小奇异值(Minimum Singular Value,MSV)的双向分支定界(Bidirectional Branch and Bound,BBAB)算法实现天线选择;由于矩阵奇异值存在单调性,该天线选择能够搜索全局最优解,且比穷举法的复杂度低很多。在信道存在误差的情况下,[文献7]利用基因遗传算法可实现基于注水原理的天线选择;在低信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR) 时,该算法比传统算法能实现更好的信道容量。[文献10:S.E.El-Khamy,K.H.Moussa,A.A.El-Sherif,“On the performance of massive multiuser MIMO with different transmit beamforming techniques and antenna selection,”in Proc.of 2015 1st URSI Atlantic Radio Science Conference(URSI AT-RASC),2015,pp.1-10]提出了基于用户信道向量二范数最大的天线选择算法,该算法能够实现波束赋形情况下的(Bit Error Rate,BER)性能提升。

[0006] 另一方面,由于AFE模块的约束,基站发送和接收信号时最多能同时服务的用户数量不能超过AFE资源模块数量,且用户的正交性也会影响多用户MIMO 系统性能。故用户调度在系统性能实现上也非常重要。基于用户分布式评估,[文献11:X.Xie and X.Zhang,“Scalable user selection for MU-MIMO networks,”in Proc.of IEEE INFOCOM,2014, pp.808-816]提出了基于竞争信道反馈的用户调度算法,该算法能够有效节省CSI获取时间。利用迫零波束赋形(Zero-Forcing Beamforming,ZFBF)预编码,[文献1]基于回环容量

约束提出了三种寻找局部最优解的天线选择和用户调度算法;在已有局部天线集合与用户集合的基础上,通过交换天线和用户元素来跳出局部最优解,接近全局最优解。为降低复杂度,[文献8]在下行链路中提出了基于用户子空间正交性的天线选择和用户调度,该算法能够实现近似穷举法的最优性能[见文献8]。

[0007] 此外,[文献12:Y.Cao and V.Kariwala,“Bidirectional branch and bound for controlled variable selection:Part I.Principles and minimum singular value criterion,” Computers&Chemical Engineering,vol.32,no.10,pp.2306-2319,2008]和[文献 13:T.Yoo and A.Goldsmith,“On the optimality of multiantenna broad-cast scheduling using zero-forcing beamforming,” IEEE J.Select.Areas Commun., vol.24, no.3,pp.528-541,Mar.2006.]中也提出了天线选择和用户调度算法。

[0008] 但是,各种算法既要实现优越的系统速率、速率的标准差等性能,又要降低计算的复杂度,目前是难以实现的。

### 发明内容

[0009] 为解决上述问题,本发明提出了一种多用户MIMO上行链路天线选择和用户调度方法(命名为Joint Antenna Selection and User Scheduling,JASUS),具有较好的局部最优速率性能,但算法的复杂度较低。

[0010] 2、为此,本发明的一种多用户MIMO上行链路天线选择和用户调度方法包括如下步骤:S1、基于半正交性用户选择的向下分支定界算法:找到使信道矩阵的最小奇异值最大的天线集合A与用户集合U的局部最优解;S2、基于天线与用户集合元素交换的局部迭代寻优算法:在已经获得A和U的情况下,分别固定集合A、U,交换选中的用户元素和天线元素;如果发现交换元素后的集合A、U 能够使信道速率更大,则跳出当前局部最优解到另一个性能更优的局部最优解; S3、重复步骤S2直到天线集合A和用户集合U都不再发生变化。

[0011] 本发明提出的上述方法基于用户半正交性选择的向下分支定界(Downwards Branch and Bound,DBAB)、局部迭代寻优算法搜索信道矩阵最大MSV,实现联合天线选择和用户调度;该算法以信道容量为评价指标,局部最优的速率性能更好,逼近穷举算法(Brute-Force Search,BFS);同时,该算法的计算复杂度远低于穷举法,具有较大应用价值。故本发明在多用户MIMO系统中是一种有前景的天线选择和用户调度方法。

### 附图说明

[0012] 图1是本发明实施例向下分支定界算法示意图。

[0013] 图2是本发明实施例局部迭代寻优算法示意图。

[0014] 图3是本发明实施例基于半正交用户选择的向下分支定界算法(DBAB)流程图。

[0015] 图4是本发明实施例局部迭代寻优算法流程图。

[0016] 图5是本发明实施例不同算法的上行和速率随信噪比的变化示意图。

[0017] 图6是本发明实施例不同算法上行的和速率标准差随信噪比的变化示意图。

[0018] 图7是本发明实施例不同算法的和速率随模拟前端数量变化示意图。

[0019] 图8是本发明实施例不同算法的平均迭代次数随模拟前端的变化示意图。

## 具体实施方式

[0020] 如前所述,在多用户MIMO尤其是Massive MIMO通信系统中,基站的天线成本很低,可以大规模部署构成天线阵列;但模拟前端资源相对昂贵,为每根天线都部署一个AFE会大量增加成本,且会造成资源浪费。在考虑AFE模块有限的实际应用场景,本发明实施例提出了一种基于用户半正交性的向下分支定界、局部迭代寻优相结合的搜索最大MSV的天线选择和用户调度方法,在提高性能的情况下并未明显增加复杂度。下面从算法说明、方法步骤和性能分析几个方面进行举例说明。

[0021] 一、算法说明

[0022] 1.1系统模型和速率问题

[0023] 1.1.1系统模型

[0024] 假设在多用户MIMO蜂窝小区中,基站部署M根天线和N个AFE模块,且 $M \gg N$ 。同时,假设该小区中存在k个单天线用户等待服务, $k > N$ 。因为基站 AFE模块的数量限制,基站每次最多只能从M根天线中选择信道质量最好的N根天线进行信号收发,且最多只能同时服务N个用户。若考虑多用户MIMO的上行信道,则基站天线接收的信号满足如下公式:

$$[0025] \quad y = \sqrt{\rho} \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{z} \quad (1)$$

[0026] 其中,y是接收的天线信号向量,且 $y \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ ;  $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{M \times k}$  是用户到基站的准静态的独立同分布瑞利信道矩阵; $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{k \times 1}$  是k个用户上传给基站的发射信号向量, $\mathbf{z} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  是M个天线接收信号上叠加的加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise,AWGN),且每个分量均都服从均值为0、方差为1的复高斯随机分布,即 $z_i \sim \text{CN}(0,1)$ 。

[0027] 在基站接收端,采用线性接收机如迫零检测等就能实现最佳接收。其中, $\mathbf{W} \in \mathbb{C}^{M \times k}$  是多用户MIMO系统的接收矩阵,且 $\mathbf{W} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H / \|\mathbf{H}^H\|_2$ ,其中 $\|\cdot\|_2$ 为二范数, $(\cdot)^H$ 是矩阵的共轭转置。

[0028] 则接收机检测到的用户发送信号如下:

$$[0029] \quad \tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{W} \mathbf{y} = \frac{1}{\tau} \left( x \sqrt{\rho} + (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{z} \right) \quad (2)$$

[0030] 其中, $\tau = \|\mathbf{H}^H\|_2$ 。则用户k的SNR满足[9]:

$$[0031] \quad \begin{aligned} \text{SNR}_k &= \frac{\rho}{k} \frac{1}{\left[ (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \left( (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \right)^H \right]_{k,k}} \\ &= \frac{\rho}{k} \frac{1}{\left[ (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \right]_{k,k}} \\ &\geq \frac{\rho \lambda_{\min}^2(\mathbf{H})}{k} \end{aligned} \quad (3)$$

[0032] 其中, $\lambda_{\min}(\mathbf{H})$ 代表矩阵H的最小奇异值。

[0033] 1.1.2问题描述

[0034] 若单个用户的上行发射功率P一定,基站部署的AFE模块的数量N一定,则基站每次最多只能利用N根天线,其构成天线集合A,且系统最多同时能够为N个用户提供通信服务,

构成用户集合 $U$ ;则最后实际使用的信道矩阵为:

$$[0035] \quad H_{A,U} = H(A,U) \quad (4)$$

[0036] 因为通信过程是随机过程,故系统最大的各态历经和速率为:

$$[0037] \quad C(A,U) = \max_{A,U} E \left\{ \sum_{k \in U} \log \left( 1 + \frac{\rho}{N} \frac{1}{\left[ (\mathbf{H}_{A,U}^H \mathbf{H}_{A,U})^{-1} \right]_{k,k}} \right) \right\} \quad (5)$$

[0038] 式中, $E\{\}$ 为数学期望,且天线集合与用户集合需满足约束条件:

$$[0039] \quad |A| \leq N$$

$$[0040] \quad |U| \leq N \quad (6)$$

[0041] 式中, $|\cdot|$ 为集合基数。由公式(4)、(5)、(6)可知,当通信系统速率最大时,用户集合 $U$ 与天线集合 $A$ 的元素个数均为 $N$ 。根据公式(3)和(5)可知,要使系统的速率最大,则需满足如下条件:

$$[0042] \quad \lambda_{\min}(H_{A,U}) \geq \lambda_{\min}(H')$$

$$[0043] \quad H \in \{H_s | H_s \in C^{N \times N}, H_s = H_{(N,N)}\} \quad (7)$$

[0044] 即最后基于天线集合 $A$ 和用户集合 $U$ 选择的信道矩阵 $H_{A,U}$ 在 $H$ 所有 $N \times N$ 维子矩阵 $H_{(N,N)}$ 中有最大的MSV[9]。

[0045] 对于该类NP-hard问题,穷举法能够寻找到全局最优解,但计算复杂度极高。为满足实际应用,本发明提出基于最大MSV的天线选择和用户调度方法(Largest MSV based-JASUS, LMSV-JASUS)寻找局部最优解。该算法与已有的联合天线选择和用户调度方法(JASUS)算法复杂度相当,通过借助(Throughput and Complexity Balanced JASUS, TCB-JASUS)算法交换元素能够跳过当前局部最优的思路,使性能有进一步提升,故是一种接近全局最优解的算法。

[0046] 1.2搜索最大MSV的JASUS算法

[0047] 基于1.1节的问题分析,本节将详细介绍基于用户半正交性的向下分支定界、局部迭代寻优相结合的LMSV-JASUS算法。该算法主要分成两个部分:

[0048] 1) 基于半正交性用户选择的向下分支定界算法

[0049] 通过该算法能够尽可能找到系统性能接近穷举法的天线集合 $A$ 与用户集合 $U$ ;

[0050] 2) 基于天线与用户集合元素交换的局部迭代寻优算法

[0051] 在已经获得 $A$ 和 $U$ 的情况下,分别固定集合 $A$ 、 $U$ ,交换选中的用户元素和天线元素。如果发现交换元素后的集合 $A$ 、 $U$ 能够使信道速率更大,则跳出当前局部最优解到另一个性能更优的局部最优解。因为全局最优解便是局部最优解中的最大值,故该方法有更大概率获得全局最优解。

[0052] 1.2.1基于半正交性的向下分支定界算法

[0053] 1) 向下分支定界算法

[0054] 向下分支定界算法是一种非监督分类算法,满足向下单调性时可以搜索全局最优。其分类理论如下:

[0055] • 目标:假设存在集合 $X = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ 包含5个元素,现在需要从该集合中选出2个元素构成的集合 $X_2$ ,满足目标函数 $J(X)$ :

$$[0056] \quad J(X_2) = \max J(X_n), X_n \subseteq X, |X_n| = 2 \quad (8)$$

[0057] • 向下单调性:若存在集合 $X_n$ ,当 $X_m \subseteq X_n$ 时,总有:

$$[0058] \quad J(X_n) \geq J(X_m) \quad (9)$$

[0059] 则称目标函数 $J(X)$ 满足向下单调性。若集合 $X_n$ 满足:

$$[0060] \quad J(X_s) = \max J(X_n), X_n \subseteq X, |X_s| = |X_n| \quad (10)$$

[0061] 则集合 $X_s$ 所在分支是最优的搜索方向。

[0062] • 全局最优:基于目标函数 $J(X)$ 的向下单调性,经过多次迭代,该算法能够获得全局最优解 $X_2$ 。

[0063] 如图1所示,分支定界算法分成搜索分支和边界确定两个过程。步骤如下:

[0064] a) 根节点为原始集合 $X = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ ,包含5个元素。

[0065] b) 分支搜索:集合 $X$ 大小为 $n$ ,可分为 $n$ 个搜索分支,每个分支代表从集合 $X$ 中去掉其中的一个元素 $i$ ,构成集合 $X_{-i}, i = 1, \dots, n$ ;如第一轮中,该集合 $X$ 有5个元素,故可以分成5个分支;分支上的数代表将该元素从集合 $X$ 中移出,故有5个分支。

[0066] c) 边界确定:根据b)原理,将每个分支生成的集合 $X_{-i}$ 带入目标函数,计算 $J(X_{-i})$ 的取值;找出 $J(X_{-i})$ 中使函数取值最大的集合 $X_s$ (满足公式(10))。如第一轮中,去掉元素3后的集合 $X_s = \{1, 2, 4, 5\}$ 是最优的搜索方向。

[0067] d) 将集合 $X_s$ 由 $X$ 替换,计算该集合的元素个数是否满足要求。如果大于2个,转到步骤b)执行;如果等于2个,就结束搜索过程。

[0068] 基于a)~d),经过三轮搜索,各轮依次去掉元素3,2,5;最后获得全局最优解 $X_2 = \{1, 4\}$ 。该算法共需要搜索 $(M-N)$ 轮,总的计算复杂度不高。

[0069] 2) 基于半正交性用户选择的向下分支定界算法

[0070] 如果 $J(X_n)$ 满足向下单调,根据分支定界算法原理能够寻找到全局最优解。在[9]中,当被服务用户固定时,只进行天线选择;此时信道矩阵 $H$ 的最大MSV为 $J(A) = \lambda_{\min}(H_{(A, :)})$ 满足向下单调[9, 12],能够获得全局最优解。

[0071] 在本发明中,当用户数量大于AFE数量( $k > N$ )时,就需要同时进行天线和用户选择,此时 $J(A, U) = \lambda_{\min}(H_{(A, U)})$ 就不完全满足向下单调,故不能获得全局最优解。

[0072] 基于以上分析,本发明的LMSV-JASUS算法就利用寻找局部最大MSV的原理提出了实现JASUS的向下分支定界算法,该算法采用天线子集分支、半正交用户选择、搜索方向确定三个步骤进行天线选择。为从 $k$ 个用户中选择最合适的 $N$ 个用户,本发明利用[13]中提出的基于用户半正交性最好、且正交后幅度最大的用户半正交选择(Semi-orthogonal User Selection, SUS)算法。故在图1的每个节点都会先利用SUS算法选择最合适的用户集合 $U$ ,再求解基于当前被服务用户集合 $U$ 的各天线分支的 $J(A_{-i}, U) = \lambda_{\min}(\mathbf{H}_{(A_{-i}, U)})$ ,确定最优的搜索

方向  $A_{-m} = \arg \max_{A_{-i}} \left\{ \lambda_{\min}(\mathbf{H}_{(A_{-i}, U)}) \right\}$ , 去掉对系统性能影响最大的单根天线 $m$ 。通过  $(M-N)$ 次

迭代,能得到该条件下的局部最优集合 $A, U$ 。

[0073] 1.2.2局部迭代寻优算法

[0074] 一般情况下,1.2.1算法求解的天线和用户集合 $A, U$ 都会陷入局部最优而非全局最

优,且局部最优解的波动性很大。为降低局部最优解的波动性,本发明基于[1]设计的局部迭代寻优算法能跳出当前局部最优解而找到性能更好的局部最优解,增大获得全局最优解的可能。其具体思路如图2所示:

[0075] 假设存在二维平面空间,平面上的每个点都由一个天线、用户集合  $(A_i, U_j)$  表示  $i=1, \dots, C_M^N; j=1, \dots, C_k^N$ , 目标就是找到最优的点让系统的和速率最大。

[0076] a) 根据1.2.1向下分支定界算法获得局部最优的天线与用户集合A、U,将其设置为初始点P  $(A_1, U_1)$ 。

[0077] b) 固定天线集合A1,利用SUS算法寻找天线集合确定的用户集合U2;集合  $(A_1, U_2)$  构成点q。如果在q点计算获得系统的和速率大于在p点的和速率,则更新最优解  $(A, U) = (A_1, U_2)$ 。

[0078] c) 固定用户集合U2,利用DBAB算法寻找到最优的天线集合A2,构成点 R。如果在R点的系统和速率大于在q点的系统和速率,则更新最优解为  $(A, U) = (A_2, U_2)$ 。

[0079] d) 重复步骤c)、d),直到系统和速率不再增加。此时的解集合  $(A, U)$  就是最终输出的天线集合和用户集合。

[0080] 二、每个算法的具体实现步骤

[0081] 在1.2小节中,本发明详细分析了基于LMSV-JASUS算法的结构组成和实现原理。其主要由向下分支定界算法、半正交用户选择算法和局部迭代寻优算法构成。每个算法的具体实现步骤如下所示。

[0082] 2.1向下分支定界算法(DBAB)

[0083] 本发明的向下分支定界算法由天线子集分支、半正交用户选择、搜索方向确定三个步骤构成,根据1.2.1小节分析可知,该算法能够获得局部最优的天线集合A与用户集合U。具体步骤流程如图3所示:

[0084] a) 基站获取信道矩阵H,获得系统的AFE模块数量N、天线数量M和用户数量k;初始化待选天线集合A和搜索循环的轮数t:

[0085]  $A = \{1, \dots, M\}$  (11)

[0086]  $t = 1$  (12)

[0087] b) 对于任意天线元素  $i \in A$ ,从天线集合A中移出该天线i后生成集合  $A_{-i}$ ,并基于该天线集合获取当前的信道矩阵  $H_{-i}$ ;

[0088] c) 调用半正交用户选择(SUS)算法(2.2详细分析),传递对应信道矩阵  $H_{-i}$  和单次能被服务的用户数N,生成对应的用户集合  $U_{-i}$ ;

[0089] d) 根据  $A_{-i}, U_{-i}$  计算对应的信道矩阵的最小奇异值  $\lambda_{\min}(\mathbf{H}_{(A_{-i}, U_{-i})})$ 。找出让最小奇异值最大的天线集合与用户集合  $A_{-i}, U_{-i}$ ,其指示满足:

[0090]  $m = \arg \max_{i \in A} (\lambda_{\min}(\mathbf{H}_{(A_{-i}, U_{-i})}))$  (13)

[0091]  $A \leftarrow \{i \in A, i \neq m\}$  (14)

[0092]  $U = U_{-m}$  (15)

[0093] e) 如果  $|A| > N$ ,  $t \leftarrow t + 1$ ,重复b) ~ d);如果  $|A| = N$ ,停止迭代过程,输出局部最优的天线集合与用户集合A、U。

[0094] 2.2半正交用户选择(SUS) [8]

[0095] 半正交用户选择算法是在天线集合A固定的情况下选择N个正交性最好的用户U进行服务,该算法通过N轮搜索完成。每轮从待选择用户集合中选择一个与已选用户集正交性最好的用户加入被服务用户集合,直到被服务用户集合包含N个元素。输入参数为CSI矩阵 $H = [h_1, \dots, h_k]$ 和可被同时服务的用户数N。其实现步骤如下:

[0096] a) 参数初始化:

[0097] 根据CSI信息,小区中总用户数为k。初始化待选的用户集合 $T_1$ 和第i被选用户:

$$[0098] \quad T_1 = \{1, \dots, k\} \quad (16)$$

$$[0099] \quad i = 1 \quad (17)$$

[0100] 被选择服务的用户集合U为空集:

$$[0101] \quad U = \emptyset \quad (18)$$

[0102] b) 对于每个用户 $k \in T_i$ ,基于信道向量 $h_k$ 计算其与扩展空间 $\{g_{(1)}, \dots, g_{(i-1)}\}$ 的正交分量 $g_k$ :

$$[0103] \quad g_k = h_k - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{h_k g_{(j)}^*}{\|g_{(j)}\|^2} g_{(j)} \quad (19)$$

[0104] 当 $i=1$ 时, $g_k = h_k$ 。其中,正交向量基 $g_{(j)}$ 为已选择用户 $j=1, \dots, (i-1)$ 的有效正交分量。

[0105] c) 寻找第i个最佳被服务用户 $\pi(i)$  (该符号指第i轮从待选用户集 $T_i$ 中选择的条件最好的被服务用户的编号):

$$[0106] \quad \pi(i) = \arg \max_{k \in T_i} \|g_k\| \quad (20)$$

$$[0107] \quad U \leftarrow U \cup \pi(i) \quad (21)$$

$$[0108] \quad g_{(i)} = g_{\pi(i)} \quad (22)$$

[0109] d) 如果 $|U| < N, i \leftarrow i+1$ ,更新待选天线集合 $T_{i+1}$ 为:

$$[0110] \quad T_{i+1} = \{k \in T_i, k \neq \pi(i)\} \quad (23)$$

[0111] 重复步骤b) ~d); 否则,转到e);

[0112] e) 返回空间大小为N的被选择用户集合U。

[0113] 2.3局部迭代寻优求解

[0114] 通过2.1和2.2构成的基于用户半正交性的JASUS能够获得一组局部最优解 (A, U)。在此基础上进行的局部迭代寻优算法的主要步骤的流程如图4所示:

[0115] f) 根据2.1向下分支定界算法获得局部最优的天线与用户集合A、U,将其设置为初始点(A,U)。

[0116] g) 保存当前的最优天线与用户集合 $(A_t, U_t) = (A, U)$ 。

[0117] h) 在第i轮中( $i=1, 2, \dots$ 为迭代轮数)固定天线集合A,利用SUS算法求解最优的用户集合 $U_i$ 。若此时的平面上的点 $(A, U_i)$ 使系统速率 $R(A, U_i) > R(A, U)$ 满足,则更新用户集合 $U = U_i$ 、系统的和速率 $R(A, U) = R(A, U_i)$ ; 否则,不更新U和 $R(A, U)$ 。

[0118] i) 固定用户集合U,利用向下分支定界算法(未包含SUS)能求解当前最优的天线集合 $A_i$ 。若此时的平面上的点 $(A_i, U)$ 使系统速率 $R(A_i, U) > R(A, U)$ ,则更新天线集合 $A = A_i$ 、系

统的和速率  $R(A,U) = R(A_i,U)$  ;否则,不更新目标解A和 $R(A,U)$ 。

[0119] j) 比较最优解  $(A_t,U_t)$  与迭代后更新的最优解  $(A,U)$  是否相同。如果不同,再次执行c) ~e) ;如果相同,停止迭代过程,执行法k)。

[0120] k) 获得该算法的最优解  $(A,U)$  ,利用公式(4)、(5)求解该系统的和速率  $R$ 。

[0121] 三、性能分析

[0122] 3.1数值结果评价

[0123] 在本小节中,将本发明提出的LMSV-JASUS算法和JASUS[8]、TCB-SUS[1]、穷举法(BFS)等算法的系统性能进行比较,分析各种方法的优劣。在仿真实验中,由于穷举法的计算复杂度太高,当涉及到与穷举法性能比较时,其参数设置都比较小。

[0124] 图5是不同的联合天线选择和用户调度算法的平均速率随SNR的对比图。因为无线信道是随机过程,故试验中采取系统的速率和标准差作为衡量指标;且因为穷举法的高复杂度,故简化参数。假设在蜂窝系统单个小区中,基站部署 10根天线和5个AFE模块,共有10个用户需要被服务。由于AFE数量有限,在上行通信中每次最多只能有5个用户被服务。故基站每次最多会选择五根天线同时服务5个用户。假设系统各态历经,文中求解50次速率的均值作为系统速率的期望。当系统的SNR由0dB逐渐增加到30dB时,LMSV-JASUS算法比已有的JASUS、TCB-SUS有更好的速率期望,且专利中LMSV-JASUS算法求解的系统速率逼近BFS的最优值。

[0125] 图6是不同的联合天线选择和用户调度算法的平均和速率的标准差随SNR 变化的对比图。其主要参数与图5的设置一致。随着SNR的增加,穷举法的和速率标准差最小,LMSV-JASUS算法的和速率标准差逼近穷举法,比已有的 JASUS、TCB-SUS有更低的值,系统的和速率相对更稳定。

[0126] 图7是不同联合天线选择和用户调度算法的速率随AFE变化曲线。假设在蜂窝系统单个小区中,基站部署有64根天线,该小区共有用户25个,用户发射端的SNR为10dB。因为天线数量和用户数量较多,BFS的速率就没有再比较。当AFE的数量由4个逐渐增加到12个时,仅依靠元素交换的TCB-JASUS很快丧失优势,陷入局部最优解;JASUS和LMSV-JASUS算法的速率能够持续在增加,且本发明的算法比JASUS性能更佳。

[0127] 图8是不同天线选择和用户调度算法的平均迭代次数随AFE增加的变化曲线。JASUS没有迭代过程,故没在图中画出。可以发现,随着AFE数量的增加,TCB-JASUS的迭代次数约为2,文章提出的局部迭代寻优算法的迭代次数总是略小于1,且相对恒定。这说明在大多数情况下,基于用户半正交性选择的向下分支定界算法的结果都是可以通过迭代再次进行优化,但通过一次迭代就能实现性能的明显提升。

[0128] 基于对图5-8的分析可知,LMSV-JASUS算法的实现的系统速率、速率的标准差都比TCB-JASUS、JASUS更优、更接近穷举法的性能。已有的向下分支定界算法实现JASUS的解都会陷入局部最优,仅依靠元素交换的迭代寻优算法的性能在被选集合增大时容易失去作用。本发明提出的方法既充分发挥两种算法的优势,又不会增加迭代次数。故本发明提出的基于用户半正交性选择的向下分支定界、局部迭代寻优相结合的LMSV-JASUS算法是非常有意义的。

[0129] 3.2复杂度分析

[0130] 本发明提出的LMSV-JASUS算法的计算复杂度主要由基于用户半正交性选择的向

下分支定界算法和局部迭代寻优算法的计算复杂度构成。

[0131] 基于1.2.1节分析可知,基于向下分支定界算法的计算复杂度主要为

$\sum_{i=1}^{M-N} (M+1-i)O(J(x))$ 。而目标函数 $J(x)$ 的计算复杂度包含正交用户集合的选择算法SUS、确

定用户集合后的SVD的复杂度,即 $O(J(x))=O(N^3)+\sum_{j=1}^N (k+1)O(N^2)$ 。故向下分支定界算法

的复杂度为 $\sum_{i=1}^{M-N} (M+1-i)\left(O(N^3)+\sum_{j=1}^N (k+1)O(N^2)\right)$ 。

[0132] 基于1.2.2节分析可知,一轮局部迭代寻优包含单独的SUS和向下分支定界算法。

故此时的计算复杂度为 $\sum_{i=1}^{M-N} (M+1-i)O(N^3)+\sum_{j=1}^N (k+1)O(N^2)$ 。

[0133] 故LMSV-JASUS算法的计算复杂度约为 $(t+1)\sum_{i=1}^{M-N} (M+1-i)O(N^3)$ , $t$ 为迭代轮数。

由于实际仿真的平均迭代次数低于一次,总的平均计算复杂度小于 $2\sum_{i=1}^{M-N} (M+1-i)O(N^3)$ ,

所以其计算复杂度与[8]中的JASUS算法相比,并未明显增加。

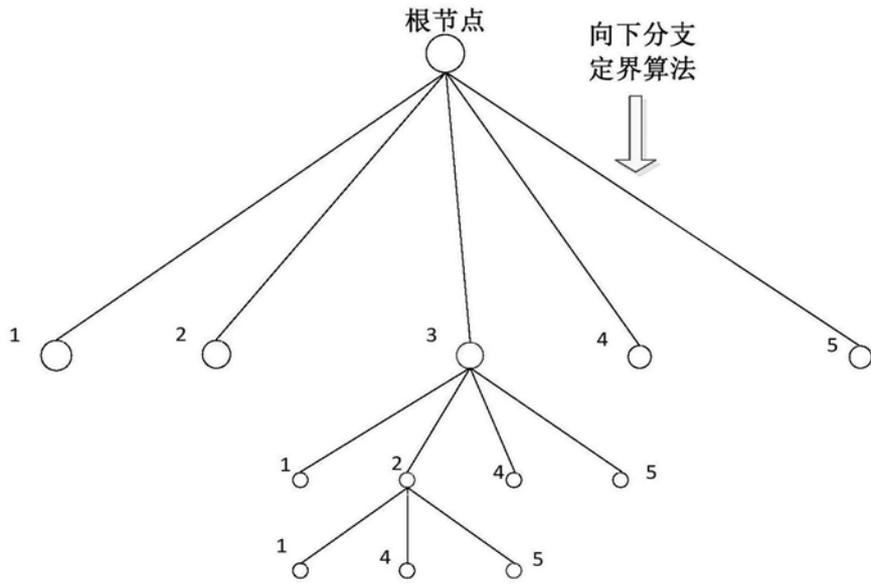


图1

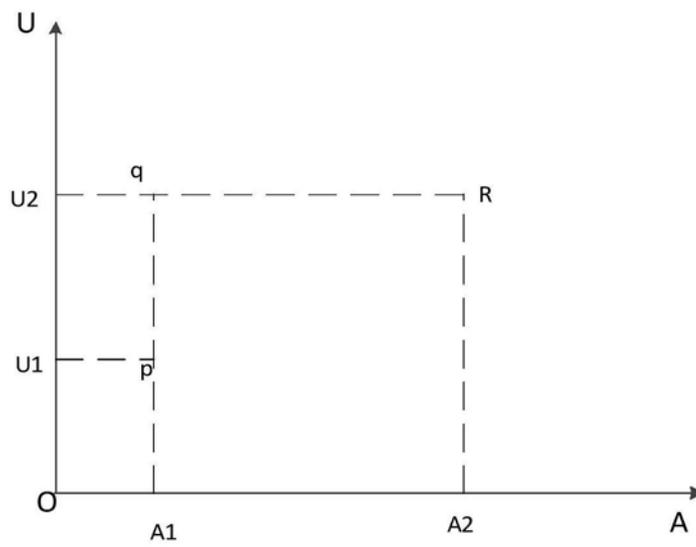


图2

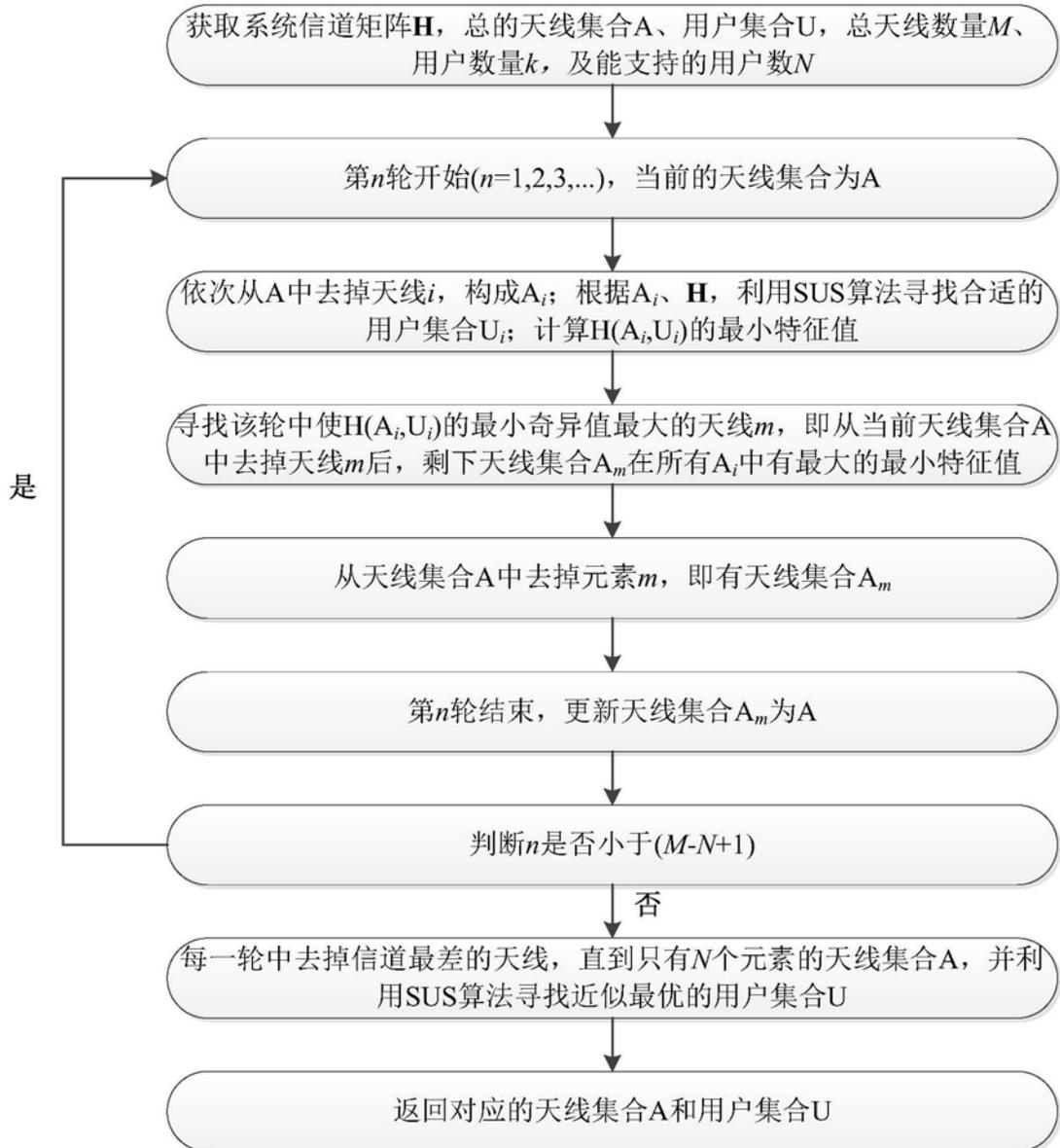


图3

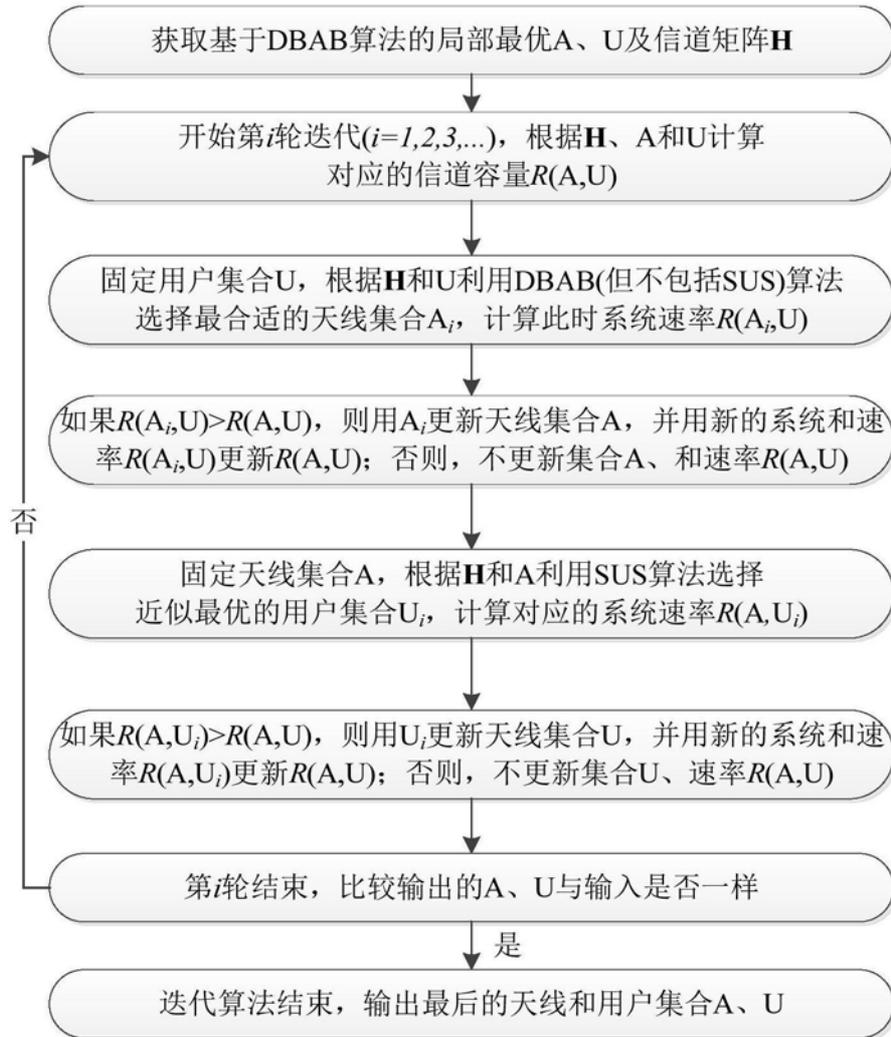


图4

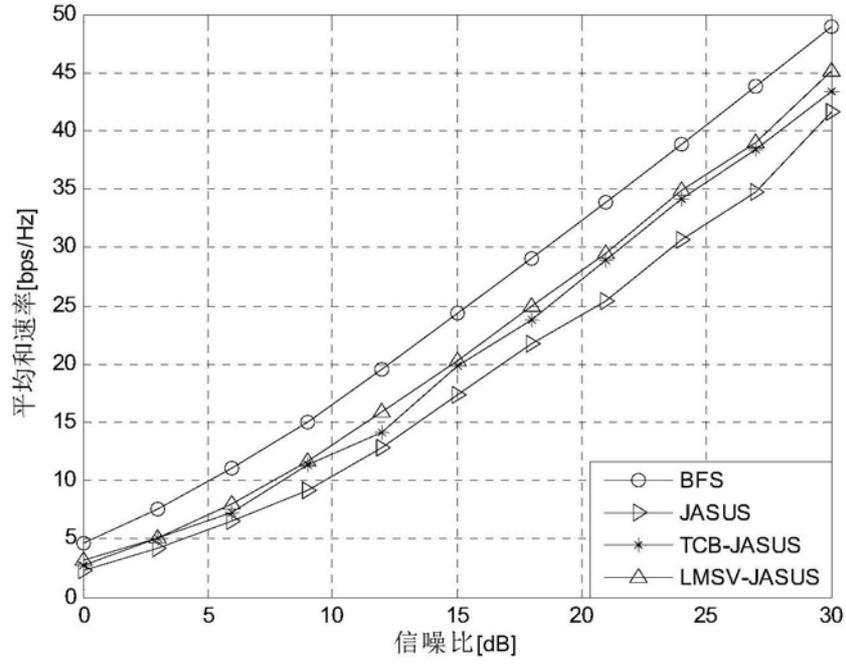


图5

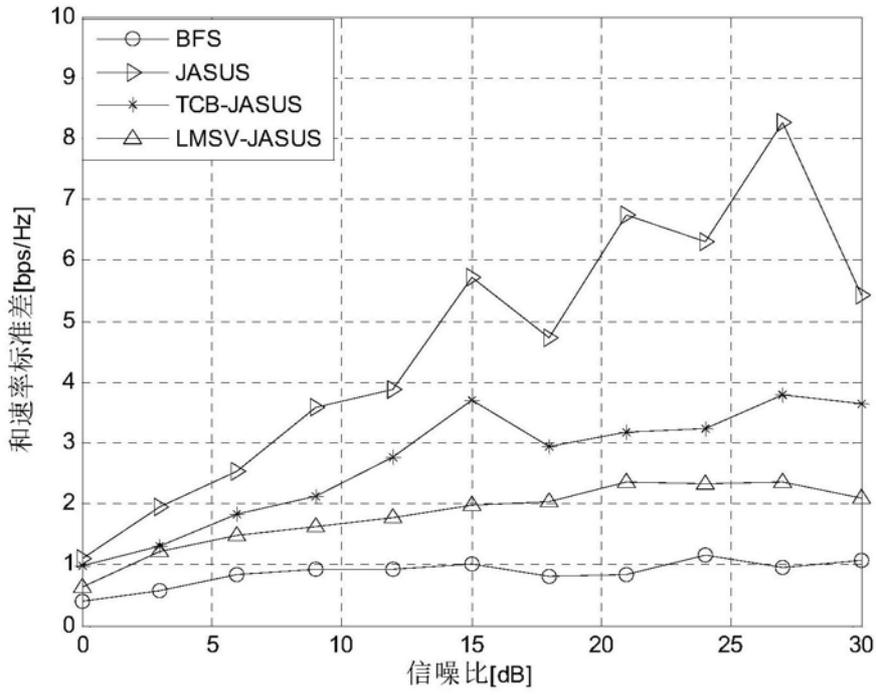


图6

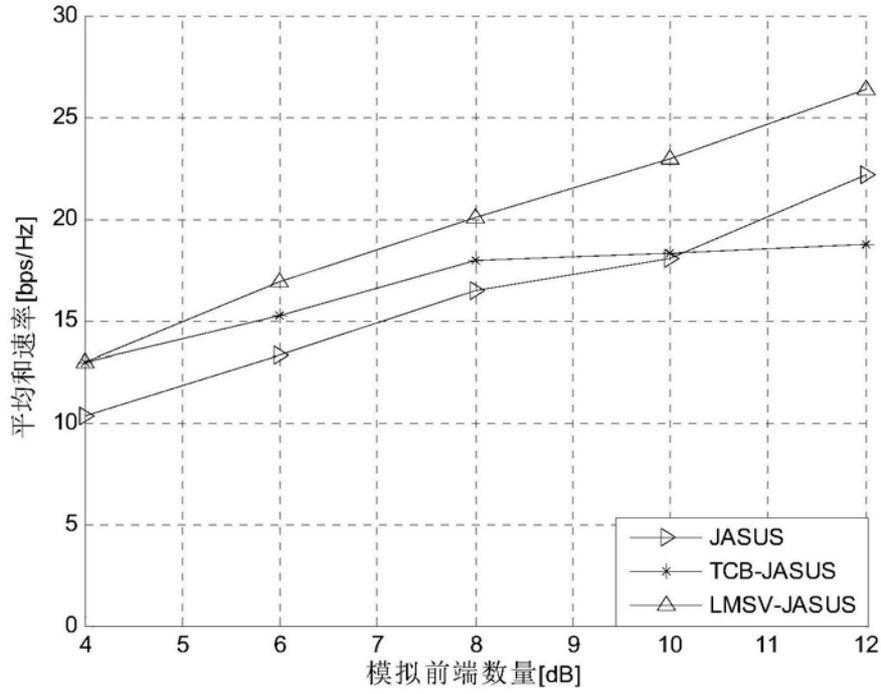


图7

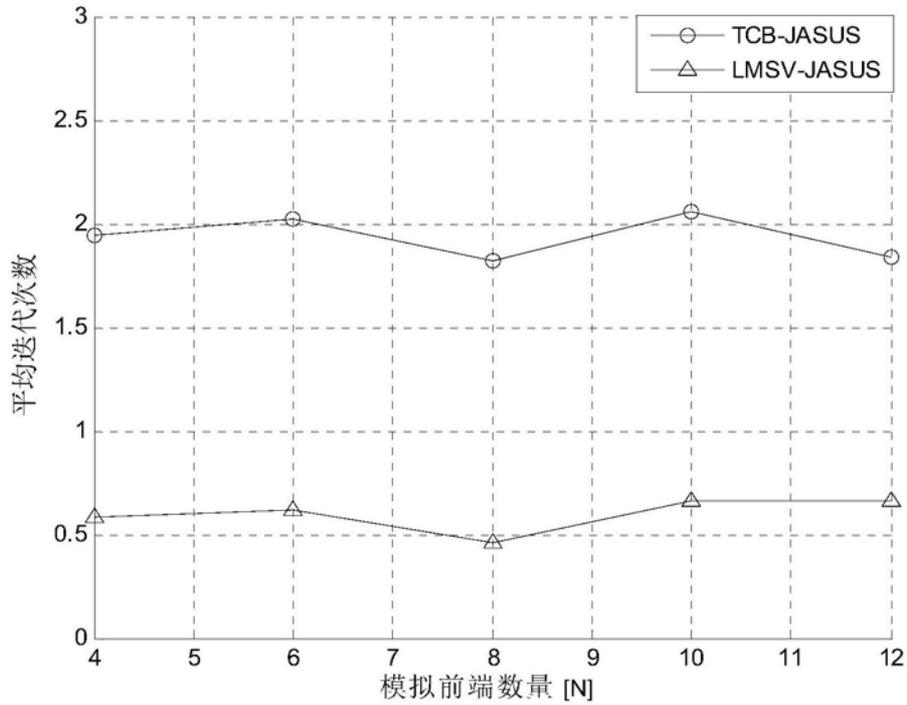


图8