



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113315552 B

(45) 授权公告日 2022.02.11

(21) 申请号 202110578466.X

H04W 52/02 (2009.01)

(22) 申请日 2021.05.26

G06F 30/20 (2020.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

G06F 111/10 (2020.01)

申请公布号 CN 113315552 A

G06F 119/06 (2020.01)

(43) 申请公布日 2021.08.27

(56) 对比文件

(73) 专利权人 西安电子科技大学

CN 111313946 A, 2020.06.19

地址 710071 陕西省西安市太白南路2号西安电子科技大学

CN 110166090 A, 2019.08.23

CN 111970033 A, 2020.11.20

CN 104993881 A, 2015.10.21

(72) 发明人 张阳 唐洁 庞立华 郑聃天 栾英姿

WO 2020234486 A1, 2020.11.26

张瑞清. 大规模MIMO系统中能效优化设计. 《现代电子技术》. 2020,

(74) 专利代理机构 西安维赛恩专利代理事务所 (普通合伙) 61257

Yun Zhang. Sum-Rate-Driven Energy Efficiency Optimization in Massive MIMO Relay Networks. 《2018 IEEE/CIC International Conference on Communications in China》. 2019,

代理人 李明全

审查员 陈琼

(51) Int. Cl.

H04B 7/0413 (2017.01)

H04B 7/06 (2006.01)

H04B 17/391 (2015.01)

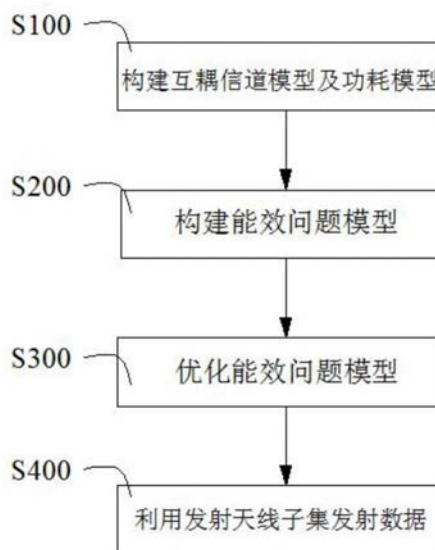
权利要求书4页 说明书11页 附图2页

(54) 发明名称

一种紧致平面天线阵列Massive MIMO系统的能效优化方法

(57) 摘要

本发明公开了一种紧致平面天线阵列Massive MIMO系统的能效优化方法, 构建紧致平面天线阵列结构下的互耦信道模型及功耗模型; 基于互耦信道模型和功耗模型, 以最大化Massive MIMO系统的能效为目标构建能效问题模型; 基于透视重构和顺序参数凸近似理论优化能效问题模型, 得到发射天线子集和波束赋形参数; 基于波束赋形参数进行波束赋形预处理, 并利用发射天线子集向用户发射数据; 本发明以最大化系统能效为目标, 将基于天线选择的预处理架构引入到紧致平面天线阵列Massive MIMO系统中, 在减少基站功率消耗的同时抑制互耦损伤、改善系统性能, 提高了紧致平面天线阵列Massive MIMO系统的通信能效。



CN 113315552 B

1.一种紧致平面天线阵列Massive MIMO系统的能效优化方法,其特征在于,包括以下步骤:

构建紧致平面天线阵列结构下的互耦信道模型及功耗模型;

基于所述互耦信道模型和功耗模型,以最大化Massive MIMO系统的能效为目标构建能效问题模型;

基于透视重构和顺序参数凸近似理论优化所述能效问题模型,得到发射天线子集和波束赋形参数;

基于所述波束赋形参数进行波束赋形预处理,并利用所述发射天线子集向用户发射数据;

以最大化Massive MIMO系统的能效为目标构建能效问题模型包括:

$$\text{通过 } R_{sum}(\mathbf{G}, \mathbf{W}) = \sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{h}_k^H \mathbf{G} \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{i \neq k} |\mathbf{h}_k^H \mathbf{G} \mathbf{w}_i|^2 + \sigma^2} \right) \text{ 计算系统下行传输和速率; 其中, } R_{sum}$$

(G,W)为系统下行传输和速率,G为对角矩阵, $\mathbf{G} \triangleq \text{diag}(g_1, g_2, \dots, g_N)$, g_i 表示第i个射频链路和第i根天线之间的通断状态,W是数字波束赋形矩阵, $\mathbf{W} = (\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_K) \in \mathbb{C}^{N \times K}$, \mathbf{w}_k 是给用户k的波束赋形矢量, $\mathbb{C}^{N \times K}$ 为N×K维的复数矩阵,N,K均为正整数, $\mathbf{h}_k \in \mathbb{H}$, \mathbf{h}_k^H 是基站到用户k的下行信道矢量,信道建模考虑互耦效应的影响,H为下行信道矩阵, $\mathbf{H} = (\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_K)^H \in \mathbb{C}^{K \times N}$, σ^2 噪声矢量的方差;

结合所述下行传输和速率构建能效问题模型:

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{G}, \mathbf{W}} \quad & \text{EE}(\mathbf{G}, \mathbf{W}) = \frac{R_{sum}(\mathbf{G}, \mathbf{W})}{P_{total}(\mathbf{G}, \mathbf{W})} \\ \text{s.t.} \quad & \text{c1: } \|\mathbf{G}\mathbf{W}\|_F^2 \leq P_{max} \\ & \text{c2: } \frac{|\mathbf{h}_k^H \mathbf{G} \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{i \neq k} |\mathbf{h}_k^H \mathbf{G} \mathbf{w}_i|^2 + \sigma^2} \geq \bar{\gamma}_{k,th}, \quad \forall k \\ & \text{c3: } \mathbf{G} \in G_F \end{aligned}$$

其中, $P_{total}(\mathbf{G}, \mathbf{W})$ 为所述功耗模型; $P_{total}(\mathbf{G}, \mathbf{W}) = \beta \cdot \|\mathbf{G}\mathbf{W}\|_F^2 + \|\mathbf{G}\|_F^2 P_{RF} + NP_{SW} + P_{st}$, β 是发射功率放大器效率系数的倒数, P_{RF} 表示每条RF链路上的功耗, P_{SW} 表示每个开关的功耗, P_{st} 表示Massive MIMO系统中其余部分的静态电路功耗;c1为最大发射功率约束, P_{max} 为基站端的最大发射功率;c2为用户服务质量约束,要求用户k的信干噪比大于等于最低门限 $\bar{\gamma}_{k,th}$;c3为天线选择开关状态的二进制离散约束, G_F 是开关状态矩阵G的样本空间;

基于透视重构和顺序参数凸近似理论优化所述能效问题模型包括:

改写约束条件重写所述能效问题模型;

引入辅助变量将重写后的所述能效问题模型进行转化;

迭代求解转化后的能效问题模型;

改写约束条件重写所述能效问题模型包括:

根据Massive MIMO系统得出 $g_i=0 \Rightarrow \overline{\mathbf{w}}_i=0$, 并将 $g_i=0 \Rightarrow \overline{\mathbf{w}}_i=0$ 通过施加约束 $\|\overline{\mathbf{w}}_i\|_2^2 \leq g_i p_i$ 来满足; $\overline{\mathbf{w}}_i$ 为与第i个天线相关联的所有用户的波束赋形权重向量, p_i 为第i跟天线上的软功率水平;

最大发射功率约束 $\|\mathbf{G}\mathbf{W}\|_F^2 \leq P_{max}$ 改写为 $\sum_{i=1}^N p_i \leq P_{max}$;

总功率 $P_{total}(G, W)$ 改写为 $P_{total}(\mathbf{g}, \mathbf{p}) = \beta \cdot \sum_{i=1}^N p_i + \sum_{i=1}^N g_i P_{RF} + NP_{SW} + P_{st}$;

能效问题模型重写为:

$$\begin{aligned} & \max_{\{\mathbf{w}, g_i, p_i\}} \frac{R_{sum}(\mathbf{W})}{P_{total}(\mathbf{g}, \mathbf{p})} \\ \text{s.t.} \quad & \text{c1: } \sum_{i=1}^N p_i \leq P_{max}, \quad \forall i \\ & \text{c2: } \left\| \left[\sigma, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{k-1}, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{k+1}, \dots, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_K \right]^T \right\|_2 \leq \frac{1}{\sqrt{\gamma_{k,th}}} \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k, \forall k, \\ & \text{c3: } \text{Im}(\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k) = 0, \quad \forall k \\ & \text{c4: } g_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \\ & \text{c5: } \left\| \overline{\mathbf{w}}_i^T, \frac{1}{2}(p_i - g_i) \right\|_2 \leq \frac{1}{2}(p_i + g_i), \quad \forall i \end{aligned}$$

其中, c2-c3是用户信干噪比约束的二阶锥表达形式, c5是 $\|\overline{\mathbf{w}}_i\|_2^2 \leq g_i p_i$ 的二阶锥形式;

引入辅助变量将重写后的所述能效问题模型进行转化包括:

引入多个辅助变量 $\{\chi_k, \gamma_k, \delta_k, \mu, \tau, \varepsilon\}$ 将上述问题等价地转化为:

$$\begin{aligned}
& \max_{\{\mathbf{w}, p_i, g_i, \chi_k, \gamma_k, \delta_k, \mu, \tau, \varepsilon\}} \varepsilon \\
& \text{s.t.} \quad \text{c1: } \sum_{i=1}^N p_i \leq P_{\max}, \quad \forall i \\
& \quad \text{c2: } \left\| \left[\sigma, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{k-1}, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{k+1}, \dots, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_K \right]^T \right\|_2 \leq \frac{1}{\sqrt{\gamma_{k,th}}} \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k, \forall k \\
& \quad \text{c3: } \text{Im}(\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k) = 0, \quad \forall k \\
& \quad \text{c4: } g_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \\
& \quad \text{c5: } \left\| \mathbf{w}_i^{-T}, \frac{1}{2}(p_i - g_i) \right\|_2 \leq \frac{1}{2}(p_i + g_i), \quad \forall i \\
& \quad \text{c6: } \left\| \left[\sigma, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{k-1}, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{k+1}, \dots, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_K \right]^T \right\|_2 \leq \chi_k, \forall k \\
& \quad \text{c7: } \log_2(1 + \gamma_k) \geq \delta_k \\
& \quad \text{c8: } \sum_{k=1}^K \delta_k \geq \mu \\
& \quad \text{c9: } \sqrt{\tau} \geq \beta \cdot \sum_{i=1}^N p_i + \sum_{i=1}^N g_i P_{RF} + NP_{SW} + P_{st} \\
& \quad \text{c10: } \mathbf{h}_k \mathbf{w}_k \geq \chi_k \sqrt{\gamma_k}, \forall k \\
& \quad \text{c11: } \mu \geq \varepsilon \sqrt{\tau}
\end{aligned}$$

迭代求解转化后的能效问题模型包括：

当约束c6-c11都取等号时达到最优，针对非凸约束c10和c11，根据顺序参数凸近似方法进行近似替换，将上述非凸问题转化为凸问题迭代求解；

上标I代表第I次迭代， $\chi_k \sqrt{\gamma_k}$ 和 $\varepsilon \sqrt{\tau}$ 的凸上界函数分别为：

$$\begin{aligned}
\mathcal{F}^{(I)}(\chi_k, \gamma_k, \omega_k) &= \frac{\omega_k^{(I)}}{2} \chi_k^2 + \frac{1}{2\omega_k^{(I)}} \gamma_k \\
\mathcal{F}^{(I)}(\xi, \varepsilon, \tau) &= \frac{\xi^{(I)}}{2} \varepsilon^2 + \frac{1}{\xi^{(I)}} \tau
\end{aligned}$$

其中， $\omega_k^{(I)}$ 是一个固定的参数，它的更新依赖于第(I-1)次迭代求出的最优 $\gamma_k^{(I-1)}$ 和 $\chi_k^{(I-1)}$ ；

参数 $\omega_k^{(I)}$ 的更新规则为 $\omega_k^{(I)} = \sqrt{\gamma_k^{(I-1)}} / \chi_k^{(I-1)}$ ；

参数 $\xi^{(I)}$ 的更新规则为 $\xi^{(I)} = \sqrt{\tau^{(I-1)}} / \varepsilon^{(I-1)}$ ；

将 $\chi_k \sqrt{\gamma_k}$ 和 $\varepsilon \sqrt{\tau}$ 用其凸上界函数近似替换，在第I次迭代中，要求解如下形式的混合整数凸问题(I)：

$$\begin{aligned}
& \max_{\{\mathbf{W}, p_i, g_i, \chi_k, \gamma_k, \delta_k, \mu, \tau, \varepsilon\}} \varepsilon \\
& \text{s.t.} \quad \text{c1: } \sum_{i=1}^N p_i \leq P_{\max}, \quad \forall i \\
& \quad \text{c2: } \left\| \left[\sigma, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{k-1}, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{k+1}, \dots, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_K \right]^T \right\|_2 \leq \frac{1}{\sqrt{\gamma_{k,th}}} \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k, \forall k \\
& \quad \text{c3: } \text{Im}(\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k) = 0, \quad \forall k \\
& \quad \text{c4: } g_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \\
& \quad \text{c5: } \left\| \mathbf{w}_i^{-T}, \frac{1}{2}(p_i - g_i) \right\|_2 \leq \frac{1}{2}(p_i + g_i), \quad \forall i \\
& \quad \text{c6: } \left\| \left[\sigma, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{k-1}, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{k+1}, \dots, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_K \right]^T \right\|_2 \leq \chi_k, \forall k \\
& \quad \text{c7: } \log_2(1 + \gamma_k) \geq \delta_k \\
& \quad \text{c8: } \sum_{k=1}^K \delta_k \geq \mu \\
& \quad \text{c9: } \sqrt{\tau} \geq \beta \cdot \sum_{i=1}^N p_i + \sum_{i=1}^N g_i P_{RF} + NP_{SW} + P_{st} \\
& \quad \text{c10: } \left\| \left[\left(\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k - \frac{1}{2\omega_k^{(l)}} \gamma_k - 1 \right), \sqrt{2\omega_k^{(l)}} \chi_k \right]^T \right\|_2 \leq \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k - \frac{1}{2\omega_k^{(l)}} \gamma_k + 1, \forall k; \\
& \quad \text{c11: } \left\| \left[\left(\mu - \frac{1}{2\zeta^{(l)}} \tau - 1 \right), \sqrt{2\zeta^{(l)}} \varepsilon \right]^T \right\|_2 \leq \mu - \frac{1}{2\zeta^{(l)}} \tau + 1
\end{aligned}$$

所述迭代求解方法为:

S331、由当前信道状态信息H,产生初始可行点 $\{g_i^{(0)}, \mathbf{W}^{(0)}\}$,并计算初始参数 $\{\omega_k^{(0)}, \zeta^{(0)}\}$,迭代计数器I=0;

S333、用 $\{\omega_k^{(l)}, \zeta^{(l)}\}$ 求解混合整数凸问题(I),得到变量 $\{\mathbf{W}, p_i, g_i, \chi_k, \gamma_k, \delta_k, \mu, \tau, \varepsilon\}$ 的最优值并记为 $\{\mathbf{W}^{(l)}, p_i^{(l)}, g_i^{(l)}, \chi_k^{(l)}, \gamma_k^{(l)}, \delta_k^{(l)}, \mu^{(l)}, \tau^{(l)}, \varepsilon^{(l)}\}$;

S335、判断辅助变量的最优值是否能使得混合整数凸问题(I)满足收敛条件,当满足收敛条件时,得出 $\{g_i^{(l)}, \mathbf{W}^{(l)}\}$;否则,根据 $\{\gamma_k^{(l)}, \chi_k^{(l)}, \tau^{(l)}, \varepsilon^{(l)}\}$ 更新参数 $\{\omega_k^{(l+1)}, \zeta^{(l+1)}\}$,并继续迭代计算,直至满足收敛条件,得出 $\{g_i^{(l)}, \mathbf{W}^{(l)}\}$ 。

一种紧致平面天线阵列Massive MIMO系统的能效优化方法

技术领域

[0001] 本发明属于移动通信技术领域,尤其涉及一种紧致平面天线阵列Massive MIMO系统的能效优化方法。

背景技术

[0002] Massive MIMO技术通过增大天线数量可以深度挖掘空间资源,在容量增益方面拥有巨大的潜力。在实际工程部署时,考虑到一些物理尺寸(受风面)、功耗、成本等方面受限的场景,Massive MIMO系统需要部署紧致平面天线阵列。

[0003] 但是,大量天线紧密排布会导致不可忽视的电磁互耦效应,对系统性能的影响很大。其次,采用紧致平面阵列虽然可以在有限空间部署大量天线,但大规模的天线阵列对应着大量的射频链路,系统的能耗和成本都会急剧上升。此时,考虑到通信系统的能效,天线选择就变得尤为迫切和重要。

发明内容

[0004] 本发明的目的是提供一种紧致平面天线阵列Massive MIMO系统的能效优化方法,以提升紧致平面天线阵列的能耗利用率。

[0005] 本发明采用以下技术方案:一种紧致平面天线阵列Massive MIMO系统的能效优化方法,包括以下步骤:

[0006] 构建紧致平面天线阵列结构下的互耦信道模型及功耗模型;

[0007] 基于互耦信道模型和功耗模型,以最大化Massive MIMO系统的能效为目标构建能效问题模型;

[0008] 基于透视重构和顺序参数凸近似理论优化能效问题模型,得到发射天线子集和波束赋形参数;

[0009] 基于波束赋形参数进行波束赋形预处理,并利用发射天线子集向用户发射数据。

[0010] 进一步地,以最大化Massive MIMO系统的能效为目标构建能效问题模型包括:

[0011] 通过 $R_{sum}(\mathbf{G}, \mathbf{W}) = \sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{|h_k^H \mathbf{G} \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{i \neq k} |h_k^H \mathbf{G} \mathbf{w}_i|^2 + \sigma^2} \right)$ 计算系统下行传输和速率;其

中, $R_{sum}(\mathbf{G}, \mathbf{W})$ 为系统下行传输和速率, \mathbf{G} 为对角矩阵, $\mathbf{G} \triangleq \text{diag}(g_1, g_2, \dots, g_N)$, g_i 表示第 i 个射频链路和第 i 根天线之间的通断状态, $\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_K) \in \mathbb{C}^{N \times K}$, w_k 是给用户 k 的波束赋形矢量, $\mathbb{C}^{N \times K}$ 为 $N \times K$ 维的复数矩阵, N, K 均为正整数, $h_k \in \mathbb{H}$, h_k^H 是基站到用户 k 的下行信道矢量,信道建模考虑互耦效应的影响, \mathbb{H} 为下行信道矩阵, $\mathbb{H} = (h_1, h_2, \dots, h_K)^H \in \mathbb{C}^{K \times N}$, σ^2 噪声矢量的方差;

[0012] 结合下行传输和速率构建能效问题模型:

$$\begin{aligned}
& \max_{\mathbf{G}, \mathbf{W}} \quad \text{EE}(\mathbf{G}, \mathbf{W}) = \frac{R_{\text{sum}}(\mathbf{G}, \mathbf{W})}{P_{\text{total}}(\mathbf{G}, \mathbf{W})} \\
& \text{s.t.} \quad \text{c1: } \|\mathbf{G}\mathbf{W}\|_F^2 \leq P_{\text{max}} \\
& \text{c2: } \frac{|\mathbf{h}_k^H \mathbf{G}\mathbf{w}_k|^2}{\sum_{i \neq k} |\mathbf{h}_k^H \mathbf{G}\mathbf{w}_i|^2 + \sigma^2} \geq \bar{\gamma}_{k,th}, \quad \forall k \\
& \text{c3: } \mathbf{G} \in G_F
\end{aligned}$$

[0014] 其中, $P_{\text{total}}(\mathbf{G}, \mathbf{W})$ 为功耗模型; $P_{\text{total}}(\mathbf{G}, \mathbf{W}) = \beta \cdot \|\mathbf{G}\mathbf{W}\|_F^2 + \|\mathbf{G}\|_F^2 P_{\text{RF}} + NP_{\text{SW}} + P_{\text{st}}$, β 是发射功率放大器效率系数的倒数, P_{RF} 表示每条RF链路上的功耗, P_{SW} 表示每个开关的功耗, P_{st} 表示Massive MIMO系统中其余部分的静态电路功耗; c1为最大发射功率约束, P_{max} 为基站端的最大发射功率; c2为用户服务质量约束, 要求用户k的信干噪比大于等于最低门限 $\bar{\gamma}_{k,th}$; c3为天线选择开关状态的二进制离散约束, G_F 是开关状态矩阵G的样本空间。

[0015] 进一步地, 基于透视重构和顺序参数凸近似理论优化能效问题模型包括:

[0016] 改写约束条件重写能效问题模型;

[0017] 引入辅助变量将重写后的能效问题模型进行转化;

[0018] 迭代求解转化后的能效问题模型。

[0019] 进一步地, 改写约束条件重写能效问题模型包括:

[0020] 根据Massive MIMO系统得出 $\mathbf{g}_i = 0 \Rightarrow \bar{\mathbf{w}}_i = 0$, 并将 $\mathbf{g}_i = 0 \Rightarrow \bar{\mathbf{w}}_i = 0$ 通过施加约束 $\|\bar{\mathbf{w}}_i\|_2^2 \leq g_i p_i$ 来满足;

[0021] 最大发射功率约束 $\|\mathbf{G}\mathbf{W}\|_F^2 \leq P_{\text{max}}$ 改写为 $\sum_{i=1}^N p_i \leq P_{\text{max}}$;

[0022] 总功率 P_{total} 改写为 $P_{\text{total}}(\mathbf{g}, \mathbf{p}) = \beta \cdot \sum_{i=1}^N p_i + \sum_{i=1}^N g_i P_{\text{RF}} + NP_{\text{SW}} + P_{\text{st}}$;

[0023] 能效问题模型重写为:

$$\begin{aligned}
& \max_{\{\mathbf{W}, g_i, p_i\}} \quad \frac{R_{\text{sum}}(\mathbf{W})}{P_{\text{total}}(\mathbf{g}, \mathbf{p})} \\
& \text{s.t.} \quad \text{c1: } \sum_{i=1}^N p_i \leq P_{\text{max}}, \quad \forall i \\
& \text{c2: } \left\| \left[\sigma, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{k-1}, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{k+1}, \dots, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_K \right]^T \right\|_2 \leq \frac{1}{\sqrt{\bar{\gamma}_{k,th}}} \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k, \quad \forall k, \\
& \text{c3: } \text{Im}(\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k) = 0, \quad \forall k \\
& \text{c4: } g_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \\
& \text{c5: } \left\| \bar{\mathbf{w}}_i^T, \frac{1}{2}(p_i - g_i) \right\|_2 \leq \frac{1}{2}(p_i + g_i), \quad \forall i
\end{aligned}$$

[0025] 其中, c2-c3是用户信干噪比约束的二阶锥表达形式, c5是 $\|\bar{\mathbf{w}}_i\|_2^2 \leq g_i p_i$ 的二阶锥形

式。

[0026] 进一步地,引入辅助变量将重写后的能效问题模型进行转化包括:

[0027] 引入多个辅助变量 $\{x_k, \gamma_k, \delta_k, \mu, \tau, \varepsilon\}$ 将上述问题等价地转化为:

[0028]
$$\max_{\{w_i, p_i, g_i, \gamma_k, \delta_k, \mu, \tau, \varepsilon\}} \varepsilon$$

[0029] s.t.
$$c1: \sum_{i=1}^N p_i \leq P_{max}, \quad \forall i$$

[0030]
$$c2: \left\| \left[\sigma, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{k-1}, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{k+1}, \dots, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_K \right]^T \right\|_2 \leq \frac{1}{\sqrt{\gamma_{k,th}}} \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k, \forall k$$

[0031]
$$c3: \text{Im}(\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k) = 0, \quad \forall k$$

[0032]
$$c4: g_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i$$

[0033]
$$c5: \left\| \mathbf{w}_i, \frac{1}{2}(p_i - g_i) \right\|_2 \leq \frac{1}{2}(p_i + g_i), \quad \forall i$$

[0034]
$$c6: \left\| \left[\sigma, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{k-1}, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{k+1}, \dots, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_K \right]^T \right\|_2 \leq \chi_k, \forall k$$

[0035]
$$c7: \log_2(1 + \gamma_k) \geq \delta_k$$

[0036]
$$c8: \sum_{k=1}^K \delta_k \geq \mu$$

[0037]
$$c9: \sqrt{\tau} \geq \beta \cdot \sum_{i=1}^N p_i + \sum_{i=1}^N g_i P_{RF} + NP_{SW} + P_{st} \quad \circ$$

[0038]
$$c10: \mathbf{h}_k \mathbf{w}_k \geq \chi_k \sqrt{\gamma_k}, \forall k$$

[0039]
$$c11: \mu \geq \varepsilon \sqrt{\tau}$$

[0040] 进一步地,迭代求解转化后的能效问题模型包括:

[0041] 当约束c6-c11都取等号时达到最优,针对非凸约束c10和c11,根据顺序参数凸近似方法进行近似替换,将上述非凸问题转化为凸问题迭代求解;

[0042] 上标I代表第I次迭代, $\chi_k \sqrt{\gamma_k}$ 和 $\varepsilon \sqrt{\tau}$ 的凸上界函数分别为:

[0043]
$$\mathcal{F}^{(I)}(\chi_k, \gamma_k, \omega_k) = \frac{\omega_k^{(I)}}{2} \chi_k^2 + \frac{1}{2\omega_k^{(I)}} \gamma_k$$

$$\mathcal{F}^{(I)}(\xi, \varepsilon, \tau) = \frac{\xi^{(I)}}{2} \varepsilon^2 + \frac{1}{\xi^{(I)}} \tau$$

[0044] 其中, $\omega_k^{(I)}$ 是一个固定的参数,它的更新依赖于第(I-1)次迭代求出的最优 $\gamma_k^{(I-1)}$ 和 $\chi_k^{(I-1)}$;

[0045] 参数 $\omega_k^{(I)}$ 的更新规则为 $\omega_k^{(I)} = \sqrt{\gamma_k^{(I-1)}} / \chi_k^{(I-1)}$;

[0046] 参数 $\xi^{(I)}$ 的更新规则为 $\xi^{(I)} = \sqrt{\tau^{(I-1)}} / \varepsilon^{(I-1)}$;

[0047] 将 $\chi_k \sqrt{\gamma_k}$ 和 $\varepsilon \sqrt{\tau}$ 用其凸上界函数近似替换,在第I次迭代中,要求解如下形式的混

合整数凸问题 (I) :

$$[0048] \quad \max_{\{\mathbf{w}, p_i, g_i, \chi_k, \gamma_k, \delta_k, \mu, \tau, \varepsilon\}} \varepsilon$$

$$[0049] \quad \text{s.t.} \quad \text{c1:} \sum_{i=1}^N p_i \leq P_{\max}, \quad \forall i$$

$$[0050] \quad \text{c2:} \left\| \left[\sigma, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{k-1}, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{k+1}, \dots, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_K \right]^T \right\|_2 \leq \frac{1}{\sqrt{\gamma_{k,th}}} \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k, \forall k$$

$$[0051] \quad \text{c3:} \text{Im}(\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k) = 0, \quad \forall k$$

$$[0052] \quad \text{c4:} g_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i$$

$$[0053] \quad \text{c5:} \left\| \left[\mathbf{w}_i^{-T}, \frac{1}{2}(p_i - g_i) \right] \right\|_2 \leq \frac{1}{2}(p_i + g_i), \quad \forall i$$

$$[0054] \quad \text{c6:} \left\| \left[\sigma, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{k-1}, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{k+1}, \dots, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_K \right]^T \right\|_2 \leq \chi_k, \forall k$$

$$[0055] \quad \text{c7:} \log_2(1 + \gamma_k) \geq \delta_k$$

$$[0056] \quad \text{c8:} \sum_{k=1}^K \delta_k \geq \mu$$

$$[0057] \quad \text{c9:} \sqrt{\tau} \geq \beta \cdot \sum_{i=1}^N p_i + \sum_{i=1}^N g_i P_{RF} + NP_{SW} + P_{st}$$

$$[0058] \quad \text{c10:} \left\| \left[\left(\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k - \frac{1}{2\omega_k^{(l)}} \gamma_k - 1 \right), \sqrt{2\omega_k^{(l)}} \chi_k \right]^T \right\|_2 \leq \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k - \frac{1}{2\omega_k^{(l)}} \gamma_k + 1, \forall k;$$

$$[0059] \quad \text{c11:} \left\| \left[\left(\mu - \frac{1}{2\xi^{(l)}} \tau - 1 \right), \sqrt{2\xi^{(l)}} \varepsilon \right]^T \right\|_2 \leq \mu - \frac{1}{2\xi^{(l)}} \tau + 1$$

[0060] 其中,混合整数凸问题 (I) 的求解方法为:

[0061] S331、由当前信道状态信息H(即下行信道矩阵),产生初始可行点 $\{\mathbf{g}_i^{(0)}, \mathbf{W}^{(0)}\}$,并计算初始参数 $\{\omega_k^{(0)}, \xi^{(0)}\}$,迭代计数器I=0;

[0062] S333、用 $\{\omega_k^{(l)}, \xi^{(l)}\}$ 求解混合整数凸问题 (I),得到变量 $\{\mathbf{w}, p_i, g_i, x_k, \gamma_k, \delta_k, \mu, \tau, \varepsilon\}$ 的最优值并记为 $\{\mathbf{W}^{(l)}, p_i^{(l)}, g_i^{(l)}, \chi_k^{(l)}, \gamma_k^{(l)}, \delta_k^{(l)}, \mu^{(l)}, \tau^{(l)}, \varepsilon^{(l)}\}$ 。

[0063] S335、判断这些辅助变量的最优值是否能使得混合整数凸问题 (I) 满足收敛条件,当满足收敛条件时,得出 $\{\mathbf{g}_i^{(l)}, \mathbf{W}^{(l)}\}$;否则,根据 $\{\gamma_k^{(l)}, \chi_k^{(l)}, \tau^{(l)}, \varepsilon^{(l)}\}$ 更新参数 $\{\omega_k^{(l+1)}, \xi^{(l+1)}\}$,并继续迭代计算,直至满足收敛条件,得出 $\{\mathbf{g}_i^{(l)}, \mathbf{W}^{(l)}\}$ 。

[0064] 本发明的有益效果是:本发明以最大化系统能效为目标,将基于天线选择的预处理架构引入到紧致平面天线阵列Massive MIMO系统中,考虑紧致架构下的新特性,从发射

天线子集和波束赋形两个维度进行优化。通过透视重构和顺序参数凸近似理论设计迭代求解算法,获得非规则的发射天线子集和波束赋形参数,在减少基站功率消耗的同时抑制互耦损伤、改善系统性能,提高了紧致平面天线阵列Massive MIMO系统的通信能效。

附图说明

[0065] 图1为本发明实施例一种紧致平面天线阵列Massive MIMO系统的能效优化方法的流程图;

[0066] 图2为本发明实施例中单小区多用户Massive MIMO系统下行通信系统示意图;

[0067] 图3为本发明验证实施例中各个方法在不同条件下的平均能耗对比图;

[0068] 图4为本发明验证实施例中在不同阵元间隔下每根天线的归一化选中概率示意图。

具体实施方式

[0069] 下面结合附图和具体实施方式对本发明进行详细说明。

[0070] 在部署大量天线时,利用天线选择可以获得低互耦效应的优化天线子集,间接地抑制互耦以获得系统性能的提升,而且在降低射频链路功耗方面具备天然优势。但单独的天线选择会失去一定的空间自由度,如果与波束赋形联合优化,则可以利用波束赋形提供的高功率增益,进一步保证系统性能,从而获得系统能耗与通信质量之间的更好折衷。

[0071] 但现有的技术方案存在一些问题,大部分研究仅从波束赋形单一维度对能效进行优化,考虑到天线规模和天线阵列结构的变化,需要从天线选择和波束赋形两个维度联合优化。而已有的联合优化方法是针对天线数较少的MIMO系统,均假定天线电磁特性彼此隔离,对紧致平面天线阵列Massive MIMO系统并不适用。因此,需要充分考虑紧致架构下的互耦特性,从天线选择和波束赋形两个维度出发,对紧凑型Massive MIMO系统提出有效的能效优化方法,响应绿色节能通信的号召。

[0072] 本发明公开了一种紧致平面天线阵列Massive MIMO系统的能效优化方法,如图1所示,包括以下步骤:S100、构建紧致平面天线阵列结构下的互耦信道模型及功耗模型;S200、基于互耦信道模型和功耗模型,以最大化Massive MIMO系统的能效为目标构建能效问题模型;S300、基于透视重构和顺序参数凸近似理论优化能效问题模型,得到发射天线子集和波束赋形参数;S400、基于波束赋形参数进行波束赋形预处理,并利用发射天线子集向用户发射数据。

[0073] 本发明以最大化系统能效为目标,将基于天线选择的预处理架构引入到紧致平面天线阵列Massive MIMO系统中,考虑紧致架构下的新特性,从发射天线子集和波束赋形两个维度进行优化。通过透视重构和顺序参数凸近似理论设计迭代求解算法,获得非规则的发射天线子集和波束赋形参数,在减少基站功率消耗的同时抑制互耦损伤、改善系统性能,提高了紧致平面天线阵列Massive MIMO系统的通信能效。

[0074] 如图2所示,为本实施例中单小区多用户Massive MIMO系统下行通信系统,有K个单天线用户终端,基站采用一种基于天线选择的预处理架构。具体是在每条RF链路上安装一个开关,通过控制开关状态进行有源天线选择。每次下行数据传输要经过数字波束赋形,并由一组特定的天线子集将信号发射出去。

[0075] 定义一个二进制对角矩阵 $\mathbf{G} \triangleq \text{diag}(g_1, g_2, \dots, g_N)$, 其对角线上的元素 $g_i \in \{0, 1\}$ 表示第 i 个射频链路和第 i 根天线之间的通断状态。如当 $g_5 = 1$ 时, 表示第 5 个射频链路和第 5 根天线之间为接通状态, 在发射数据时, 需要用到该天线。

[0076] 假设 $\mathbf{s} = [s_1, \dots, s_K]^T \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ 是基站给 K 个用户的发送数据矢量, $\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_K) \in \mathbb{C}^{N \times K}$ 是数字波束赋形矩阵, 那么基站发射信号为:

[0077] $\mathbf{x} = \mathbf{G}\mathbf{W}\mathbf{s}$;

[0078] 其中, \mathbf{x} 是发射信号矢量。在该系统中, 波束赋形矩阵 \mathbf{W} 中的有效元素将由开关矩阵 \mathbf{G} 对角线上的非零项决定, 若第 i 根天线未被选中, 则所有与该天线相关的波束赋形权重强制为零, 即满足如下条件:

[0079] $g_i = 0 \Rightarrow \overline{\mathbf{w}_i} = \mathbf{0}$;

[0080] 其中, 向量 $\overline{\mathbf{w}_i} \triangleq [[\mathbf{w}_1]_i, [\mathbf{w}_2]_i, \dots, [\mathbf{w}_K]_i] \in \mathbb{C}^{1 \times K}$ 收集了与第 i 个天线相关联的所有用户的波束赋形权重。假设 $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{K \times N}$ 是下行信道矩阵, 接收信号矢量为:

[0081] $\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{G}\mathbf{W}\mathbf{s} + \mathbf{n}$;

[0082] 其中, \mathbf{n} 是由均值为 0、方差为 σ_n^2 的复高斯随机变量组成的噪声矢量。在用户 k 处的接收信号为:

[0083] $y_k = \mathbf{h}_k^H \mathbf{G}\mathbf{w}_k s_k + \sum_{i \neq k} \mathbf{h}_i^H \mathbf{G}\mathbf{w}_i s_i + n_k$,

[0084] 其中, $\mathbf{h}_k^H \in \mathbb{C}^{1 \times N}$ 是基站到用户 k 的下行信道矢量。基站已知当前的信道状态信息, 计算得到系统下行传输和速率为:

[0085] $R_{\text{sum}}(\mathbf{G}, \mathbf{W}) = \sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{h}_k^H \mathbf{G}\mathbf{w}_k|^2}{\sum_{i \neq k} |\mathbf{h}_i^H \mathbf{G}\mathbf{w}_i|^2 + \sigma^2} \right)$ 。

[0086] 在该系统中, 基站部署半波长偶极天线构成的紧致平面天线阵列。假设垂直方向部署 N_v 根天线, 水平方向部署 N_h 根天线, 基站总天线数为 $N = N_v N_h$, 天线阵元之间相邻间隔为 d , 阵元间的电磁耦合用互耦矩阵 $\mathbf{C} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 来描述:

[0087] $\mathbf{C} = (\mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_A) (\mathbf{Z} + \mathbf{Z}_L \mathbf{I})^{-1}$,

[0088] 式中, \mathbf{Z}_L 和 \mathbf{Z}_A 分别表示负载阻抗和天线阻抗, $\mathbf{I} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 是单位阵, $\mathbf{Z} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 是互阻抗矩阵。用 $Z_{(p,q)(m,n)}$ 表示平面阵列第 p 行和第 q 列的天线与第 m 行和第 n 列的天线之间的互阻抗, 采用 EMF 方法将其建模为:

[0089] $Z_{(p,q)(m,n)} = R_{(p,q)(m,n)} + jX_{(p,q)(m,n)}$,

[0090] 而 $R_{(p,q)(m,n)}$ 和 $X_{(p,q)(m,n)}$ 分别表示互阻抗和互感抗, 对于齐平放置的半波长偶极子天线, $R_{(p,q)(m,n)}$ 和 $X_{(p,q)(m,n)}$ 分别由以下公式计算得到:

[0091]
$$R_{(p,q)(m,n)} = \frac{\sqrt{\mu_0}}{4\pi\sqrt{\epsilon_0}} [2C_{in}(u_0) - C_{in}(u_1) - C_{in}(u_2)]$$
,

$$X_{(p,q)(m,n)} = \frac{\sqrt{\mu_0}}{4\pi\sqrt{\epsilon_0}} [2S_{in}(u_0) - S_{in}(u_1) - S_{in}(u_2)]$$

[0092] 其中 l_0 和 ϵ_0 分别表示电常数和磁常数, $C_{in}(\cdot)$ 和 $S_{in}(\cdot)$ 是余弦和正弦积分函数,假设 l 是偶极子天线的长度, $d_{(p,q)(m,n)}=d\sqrt{(p-m)^2+(q-n)^2}$ 是 (p,q) 天线与 (m,n) 天线之间的距离, u_0 、 u_1 、 u_2 分别由以下公式计算得到:

$$[0093] \quad u_0 = 2\pi d_{(p,q)(m,n)}$$

$$[0094] \quad u_1 = 2\pi \left(\sqrt{d_{(p,q)(m,n)}^2 + l^2} + l \right);$$

$$[0095] \quad u_2 = 2\pi \left(\sqrt{d_{(p,q)(m,n)}^2 + l^2} - l \right)$$

[0096] 在本发明实施例中,信道建模考虑紧致平面天线阵列结构下电磁互耦的影响,互耦信道表示为 $\mathbf{H} = \overline{\mathbf{H}}\mathbf{C}$,其中, $\overline{\mathbf{H}} = (\overline{\mathbf{h}}_1, \overline{\mathbf{h}}_2, \dots, \overline{\mathbf{h}}_K) \in \mathbb{C}^{K \times N}$ 是不考虑互耦效应时的Saleh-Valenzuela信道模型,信道矢量 $\overline{\mathbf{h}}_k$ 是 N_{ray} 条散射簇的贡献之和。

[0097] 系统功耗模型考虑发射功耗和电路功耗两部分。假设 $E\{s_k\} = 0$ 和 $E\{s_k^2\} = 1$, β 是发射功率放大器效率系数的倒数,则发射信号功率为 $\beta \cdot E[\mathbf{x}^H \mathbf{x}] = \beta \cdot \text{Tr}(\mathbf{G}\mathbf{W}\mathbf{W}^H \mathbf{G}^H) = \beta \cdot \|\mathbf{G}\mathbf{W}\|_F^2$ 。基站电路功耗主要包括有效RF链路、开关控制、其他部分的静态电路功耗(包括基带预处理功耗等),其中有效RF链路的个数 N_{RF} 由开关状态矩阵决定,即满足 $N_{RF} = \|\mathbf{G}\|_0 = \|\mathbf{G}\|_F^2$ 。进而,系统总功耗建模为:

$$[0098] \quad P_{total}(\mathbf{G}, \mathbf{W}) = \beta \cdot \|\mathbf{G}\mathbf{W}\|_F^2 + \|\mathbf{G}\|_F^2 P_{RF} + NP_{SW} + P_{st},$$

[0099] 其中, P_{RF} 表示每条RF链路上的功耗, P_{SW} 表示每个开关的功耗, P_{st} 表示Massive MIMO系统中其余部分的静态电路功耗。

[0100] 在满足基站发射功率约束、保证用户服务质量的基础上,以最大化系统能效为目标,对波束赋形和天线选择进行联合优化设计。优化问题建模为:

$$[0101] \quad \begin{aligned} \max_{\mathbf{G}, \mathbf{W}} \quad & EE(\mathbf{G}, \mathbf{W}) = \frac{R_{sum}(\mathbf{G}, \mathbf{W})}{P_{total}(\mathbf{G}, \mathbf{W})} \\ \text{s.t.} \quad & \text{c1: } \|\mathbf{G}\mathbf{W}\|_F^2 \leq P_{max} \\ & \text{c2: } \frac{|\mathbf{h}_k^H \mathbf{G}\mathbf{w}_k|^2}{\sum_{i \neq k} |\mathbf{h}_k^H \mathbf{G}\mathbf{w}_i|^2 + \sigma^2} \geq \bar{\gamma}_{k,th}, \forall k \\ & \text{c3: } \mathbf{G} \in G_F \end{aligned}$$

[0102] 其中, $P_{total}(\mathbf{G}, \mathbf{W})$ 为功耗模型; $P_{total}(\mathbf{G}, \mathbf{W}) = \beta \cdot \|\mathbf{G}\mathbf{W}\|_F^2 + \|\mathbf{G}\|_F^2 P_{RF} + NP_{SW} + P_{st}$;c1为最大发射功率约束, P_{max} 为基站端的最大发射功率;c2为用户服务质量约束,要求用户 k 的信干噪比大于等于最低门限 $\bar{\gamma}_{k,th}$;c3为天线选择开关状态的二进制离散约束, G_F 是开关状态矩阵 \mathbf{G} (即对角矩阵)的样本空间。 \mathbf{w}_k 是给用户 k 的波束赋形矢量, $\mathbf{C}^{N \times K}$ 为 $N \times K$ 维的矩阵, N, K 均为正整数, $\mathbf{h}_k \in \mathbb{H}$, \mathbf{h}_k^H 是基站到用户 k 的下行信道矢量,信道建模考虑互耦效应的影响, \mathbf{H} 为下行信道矩阵, $\mathbf{H} = (\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_K)^H \in \mathbb{C}^{K \times N}$, σ^2 噪声矢量的方差。

[0103] 具体的,基于透视重构和顺序参数凸近似理论优化能效问题模型包括:

[0104] 改写约束条件重写能效问题模型；引入辅助变量将重写后的能效问题模型进行转化；迭代求解转化后的能效问题模型。

[0105] 为了解开两优化变量 $\{G, W\}$ 的乘性耦合关系，引入辅助变量 p_i 来表征第 i 根天线上的软功率水平，进而将 $g_i=0 \Rightarrow \overline{\mathbf{w}}_i=0$ 这个条件通过施加约束 $\|\overline{\mathbf{w}}_i\|_2^2 \leq g_i p_i$ 来满足，其二阶锥形式为：

$$[0106] \quad \left\| \overline{\mathbf{w}}_i^T, \frac{1}{2}(p_i - g_i) \right\|_2 \leq \frac{1}{2}(p_i + g_i) ;$$

[0107] 这种约束被称为透视重构。进一步地，最大发射功率约束 $\|\mathbf{GW}\|_F^2 \leq P_{max}$ 改写为

$\sum_{i=1}^N p_i \leq P_{max}$ ；总功率 P_{total} 改写为 $P_{total}(\mathbf{g}, \mathbf{p}) = \beta \cdot \sum_{i=1}^N p_i + \sum_{i=1}^N g_i P_{RF} + NP_{SW} + P_{st}$ ；进而能效问题模型重写为：

$$[0108] \quad \max_{\{\mathbf{w}, g_i, p_i\}} \frac{R_{sum}(\mathbf{W})}{P_{total}(\mathbf{g}, \mathbf{p})}$$

$$[0109] \quad \text{s.t.} \quad \text{c1:} \sum_{i=1}^N p_i \leq P_{max}, \quad \forall i$$

$$[0110] \quad \text{c2:} \left\| \left[\sigma, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{k-1}, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{k+1}, \dots, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_K \right]^T \right\|_2 \leq \frac{1}{\sqrt{\gamma_{k,th}}} \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k, \forall k,$$

$$[0111] \quad \text{c3:} \text{Im}(\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k) = 0, \quad \forall k$$

$$[0112] \quad \text{c4:} g_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i$$

$$[0113] \quad \text{c5:} \left\| \overline{\mathbf{w}}_i^T, \frac{1}{2}(p_i - g_i) \right\|_2 \leq \frac{1}{2}(p_i + g_i), \quad \forall i$$

[0114] 其中，c2-c3是用户信干噪比约束的二阶锥表达形式，c5是 $\|\overline{\mathbf{w}}_i\|_2^2 \leq g_i p_i$ 的二阶锥形式。

[0115] 进一步地，引入辅助变量将重写后的能效问题模型进行转化包括：

[0116] 为了进一步揭露目标函数中的凸性，引入多个辅助变量 $\{x_k, \gamma_k, \delta_k, \mu, \tau, \varepsilon\}$ 将上述问题等价地转化为：

$$[0117] \quad \max_{\{\mathbf{w}, p_i, g_i, x_k, \gamma_k, \delta_k, \mu, \tau, \varepsilon\}} \varepsilon$$

$$[0118] \quad \text{s.t.} \quad \text{c1:} \sum_{i=1}^N p_i \leq P_{max}, \quad \forall i$$

$$[0119] \quad \text{c2:} \left\| \left[\sigma, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{k-1}, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{k+1}, \dots, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_K \right]^T \right\|_2 \leq \frac{1}{\sqrt{\gamma_{k,th}}} \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k, \forall k$$

$$[0120] \quad \text{c3:} \text{Im}(\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k) = 0, \quad \forall k$$

$$[0121] \quad \text{c4:} g_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i$$

$$[0122] \quad c5: \left\| \mathbf{w}_i^{-T}, \frac{1}{2}(p_i - g_i) \right\|_2 \leq \frac{1}{2}(p_i + g_i), \quad \forall i$$

$$[0123] \quad c6: \left\| \left[\sigma, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{k-1}, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{k+1}, \dots, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_K \right]^T \right\|_2 \leq \chi_k, \forall k$$

$$[0124] \quad c7: \log_2(1 + \gamma_k) \geq \delta_k$$

$$[0125] \quad c8: \sum_{k=1}^K \delta_k \geq \mu$$

$$[0126] \quad c9: \sqrt{\tau} \geq \beta \cdot \sum_{i=1}^N p_i + \sum_{i=1}^N g_i P_{RF} + NP_{SW} + P_{st}.$$

$$[0127] \quad c10: \mathbf{h}_k \mathbf{w}_k \geq \chi_k \sqrt{\gamma_k}, \forall k$$

$$[0128] \quad c11: \mu \geq \varepsilon \sqrt{\tau}$$

[0129] 进一步地,迭代求解转化后的能效问题模型包括:

[0130] 该问题当约束c6-c11都取等号时达到最优,所以是一种等价转换。针对非凸约束c10和c11,根据顺序参数凸近似方法进行近似替换,将上述非凸问题转化为凸问题迭代求解;

[0131] 上标I代表第I次迭代, $\chi_k \sqrt{\gamma_k}$ 和 $\varepsilon \sqrt{\tau}$ 的凸上界函数分别为:

$$[0132] \quad \mathcal{F}^{(I)}(\chi_k, \gamma_k, \omega_k) = \frac{\omega_k^{(I)}}{2} \chi_k^2 + \frac{1}{2\omega_k^{(I)}} \gamma_k$$

$$\mathcal{F}^{(I)}(\xi, \varepsilon, \tau) = \frac{\xi^{(I)}}{2} \varepsilon^2 + \frac{1}{\xi^{(I)}} \tau$$

[0133] 其中, $\omega_k^{(I)}$ 是一个固定的参数,它的更新依赖于第(I-1)次迭代求出的最优 $\gamma_k^{(I-1)}$ 和 $\chi_k^{(I-1)}$; 参数 $\omega_k^{(I)}$ 的更新规则为 $\omega_k^{(I)} = \sqrt{\gamma_k^{(I-1)} / \chi_k^{(I-1)}}$; 参数 $\xi^{(I)}$ 的更新规则为 $\xi^{(I)} = \sqrt{\tau^{(I-1)} / \varepsilon^{(I-1)}}$ 。

[0134] 将 $\chi_k \sqrt{\gamma_k}$ 和 $\varepsilon \sqrt{\tau}$ 用其凸上界函数近似替换,在第I次迭代中,要求解如下形式的混合整数凸问题(I):

$$[0135] \quad \max_{\{\mathbf{w}, p_i, g_i, \chi_k, \gamma_k, \delta_k, \mu, \tau, \varepsilon\}} \varepsilon$$

$$[0136] \quad \text{s.t.} \quad c1: \sum_{i=1}^N p_i \leq P_{max}, \quad \forall i$$

$$[0137] \quad c2: \left\| \left[\sigma, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{k-1}, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{k+1}, \dots, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_K \right]^T \right\|_2 \leq \frac{1}{\sqrt{\gamma_{k,th}}} \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k, \forall k$$

$$[0138] \quad c3: \text{Im}(\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k) = 0, \quad \forall k$$

$$[0139] \quad c4: g_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i$$

$$[0140] \quad c5: \left\| \mathbf{w}_i^{-T}, \frac{1}{2}(p_i - g_i) \right\|_2 \leq \frac{1}{2}(p_i + g_i), \quad \forall i$$

$$[0141] \quad c6: \left\| \left[\sigma, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{k-1}, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{k+1}, \dots, \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_K \right]^T \right\|_2 \leq \chi_k, \forall k$$

$$[0142] \quad c7: \log_2(1 + \gamma_k) \geq \delta_k$$

$$[0143] \quad c8: \sum_{k=1}^K \delta_k \geq \mu$$

$$[0144] \quad c9: \sqrt{\tau} \geq \beta \cdot \sum_{i=1}^N p_i + \sum_{i=1}^N g_i P_{RF} + NP_{SW} + P_{st}$$

$$[0145] \quad c10: \left\| \left[\left(\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k - \frac{1}{2\omega_k^{(l)}} \gamma_k - 1 \right), \sqrt{2\omega_k^{(l)}} \chi_k \right]^T \right\|_2 \leq \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k - \frac{1}{2\omega_k^{(l)}} \gamma_k + 1, \forall k;$$

$$[0146] \quad c11: \left\| \left[\left(\mu - \frac{1}{2\zeta^{(l)}} \tau - 1 \right), \sqrt{2\zeta^{(l)}} \varepsilon \right]^T \right\|_2 \leq \mu - \frac{1}{2\zeta^{(l)}} \tau + 1$$

[0147] 其中,混合整数凸问题(I)的求解方法可以有多种,可以根据需要自行选择,本实施例中利用如MOSEK的求解器结合凸优化工具包进行有效求解,具体为:

[0148] S331、由当前信道状态信息H(即下行信道矩阵),产生初始可行点 $\{\mathbf{g}_i^{(0)}, \mathbf{W}^{(0)}\}$,并计算初始参数 $\{\omega_k^{(0)}, \zeta^{(0)}\}$,迭代计数器I=0;

[0149] S333、用 $\{\omega_k^{(l)}, \zeta^{(l)}\}$ 求解混合整数凸问题(I),得到变量 $\{W, p_i, g_i, x_k, \gamma_k, \delta_k, \mu, \tau, \varepsilon\}$ 的最优值并记为 $\{\mathbf{W}^{(l)}, p_i^{(l)}, g_i^{(l)}, \chi_k^{(l)}, \gamma_k^{(l)}, \delta_k^{(l)}, \mu^{(l)}, \tau^{(l)}, \varepsilon^{(l)}\}$ 。

[0150] S335、判断这些辅助变量的最优值是否能使得混合整数凸问题(I)满足收敛条件,当满足收敛条件时,得出 $\{g_i^{(l)}, \mathbf{W}^{(l)}\}$;否则,根据 $\{\gamma_k^{(l)}, \chi_k^{(l)}, \tau^{(l)}, \varepsilon^{(l)}\}$ 更新参数 $\{\omega_k^{(l+1)}, \zeta^{(l+1)}\}$,并继续迭代计算,直至满足收敛条件,得出 $\{g_i^{(l)}, \mathbf{W}^{(l)}\}$ 。作为一种具体的实现方式,收敛条件为 $|\varepsilon^{(l)} - \varepsilon^{(l-1)}| \leq \delta$, δ 为收敛门限,本实施例中 $\delta=10^{-3}$ 。

[0151] 另外,在本实施例中,在以下条件下对本发明的发明进行验证。假设用户数为4,基站部署 8×8 的紧致平面阵列,基站提供的最大发射功率为 $P_{\max} = 30\text{dBm}$,用户k的最小信干噪比为5dB,每个射频链路上的功耗 $P_{RF} = 17\text{dBm}$,每个开关控制的功耗 $P_{SW} = 0.005\text{W}$,其他部分的静态电路功耗 $P_{st} = 10\text{W}$ 。

[0152] 本实施例在理想和实际两种情况下仿真对比了三种算法,如图3所示,本发明提出的波束赋形与天线选择联合优化方法,迫零波束赋形与本发明的天线选择结合,以及本发明仅考虑波束赋形时的退化算法。 λ 是载波波长,实线是假定天线彼此隔离的理想情况,虚线代表紧致阵列下存在互耦的实际情况。

[0153] 可以看出,理想情况下,各方法的能效性能几乎不随天线间隔变化。建模互耦的实

际情况下,随着天线间隔减小,互耦效应增大,对系统能效造成的损伤越大。本发明提出的联合优化方法在有理想和实际两种情况下都优于另外两种比对算法。当建模互耦的影响且阵元间隔 $d=0.4\lambda$ 时,本发明仅考虑波束赋形时的平均能效为 4.767 (bps/Hz/Joule),而波束赋形与天线选择联合优化时平均能效为 5.412 (bps/Hz/Joule),提高了 13% ,这说明了天线选择的重要性。另外,点虚线是忽略互耦时采用本发明方法进行优化可以得到的实际能效性能,远远低于理想情况和实际情况,说明紧致阵列下能效优化要考虑互耦的影响。

[0154] 图4仿真考察了在建模互耦的情况下,基站采用本发明提出的优化方法时,紧致平面阵列中每个天线的归一化选中概率。在图4(a)中,天线间隔 $d=0.2\lambda$,阵列四周尤其是四个端点的天线被选概率很高,而中间部分的天线选中概率极低,甚至低于 0.1 (相对于最高选中次数)。因为阵列四周的天线拥有更少的邻近天线,受到互耦的影响更小。图4(b)中,天线间隔增大到 $d=0.5\lambda$,这种天线子集“四周化”趋势逐渐减小。这说明本发明方法在天线间隔小、互耦效应强的时候,会构造非规则的“四周化”天线子集,间接抑制互耦的影响。

[0155] 本发明以最大化能效为目标,将一种基于天线选择的预处理架构引入到单小区多用户的紧致天线阵列Massive MIMO下行系统中。在系统资源受限、保证用户服务质量的前提下,从天线选择和波束赋形两个维度对系统能效进行优化。通过透视重构和顺序凸近似理论设计了迭代求解算法,最终获得基站的优化天线子集和分配给各个用户的波束赋形参数,使系统获得更高和速率的同时降低系统功率消耗,达到绿色、节能的目的。本发明从天线选择和波束赋形两个维度对系统能效进行优化,提高了系统的能量效率。

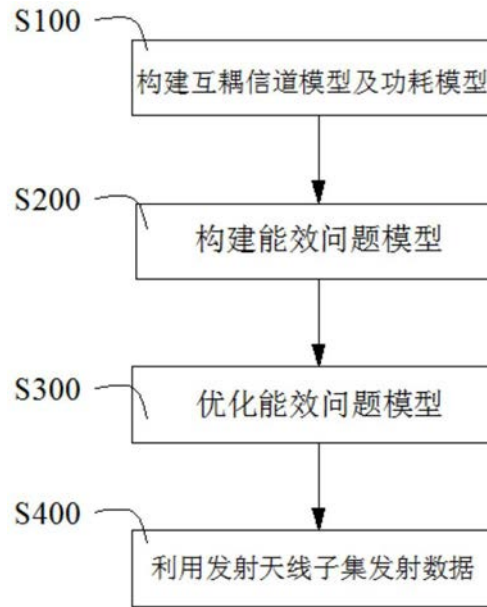


图1

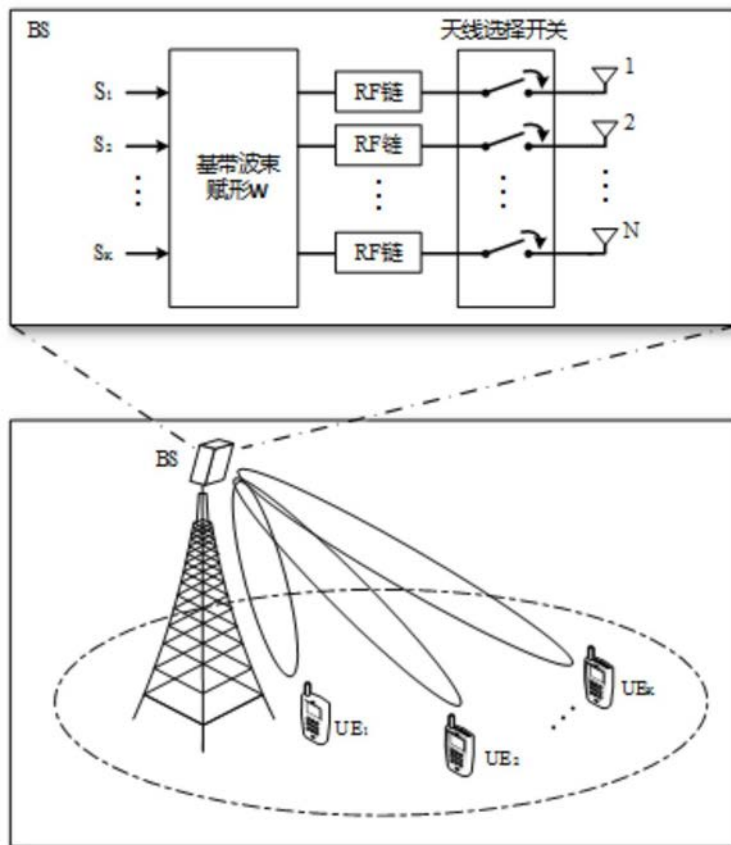


图2

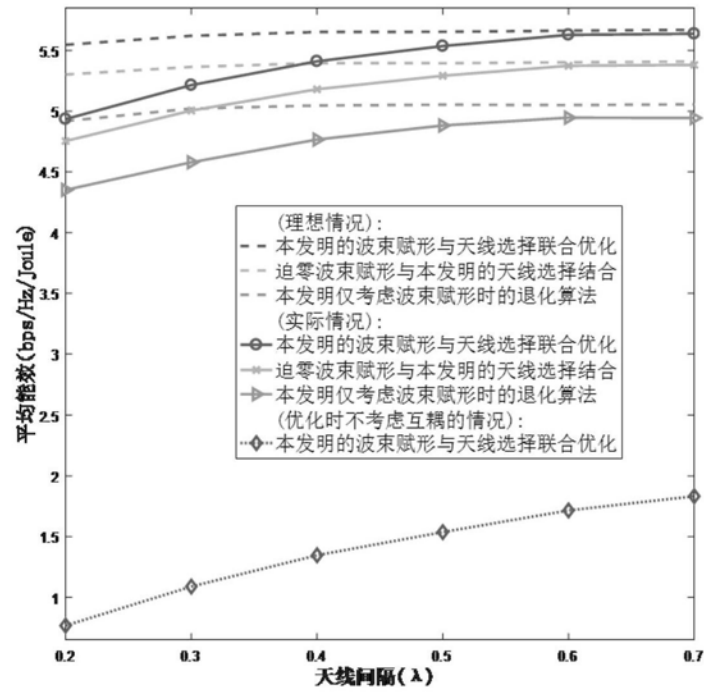


图3

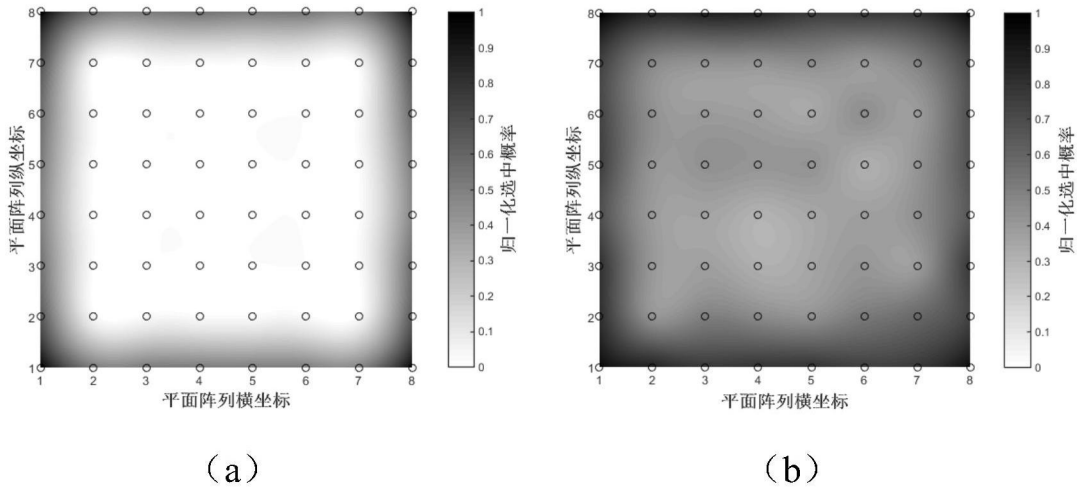


图4