



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114448479 B

(45) 授权公告日 2023.02.28

(21) 申请号 202210102024.2

CN 110650479 A, 2020.01.03

(22) 申请日 2022.01.27

CN 111970035 A, 2020.11.20

(65) 同一申请的已公布的文献号

US 2019229833 A1, 2019.07.25

申请公布号 CN 114448479 A

杨广宇. 无线携能系统的能效优化与传输安全.《信息科技》.2020,

(43) 申请公布日 2022.05.06

Shengbin L.

(73) 专利权人 北京科技大学

Rongjun H.

地址 100083 北京市海淀区学院路30号

Gang Y.

专利权人 北京科技大学顺德研究生院

Chuanzuo S.

(72) 发明人 陈月云 王锦涛 乞香平

Hao H.

(74) 专利代理机构 北京市广友专利事务所有限

Yunnan W..A Secure Transmission

责任公司 11237

Scheme Based on Artificial Noise in a

专利代理师 张仲波

MISO Eavesdropping System.《2020 IEEE 20th

(51) Int.Cl.

International Conference on Communication

H04B 7/0452 (2017.01)

Technology (ICCT)》.2020,

H04B 7/06 (2006.01)

闫淞.Massive MIMO的物理层安全预编码技

H04B 7/0426 (2017.01)

术研究.《信息科技》.2020,

(56) 对比文件

审查员 方莹

CN 113949427 A, 2022.01.18

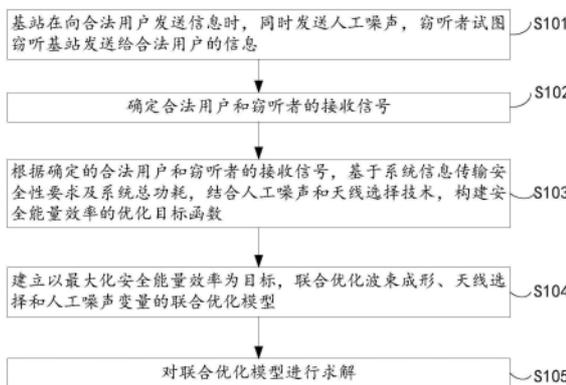
权利要求书2页 说明书9页 附图2页

(54) 发明名称

一种基于天线选择的Massive MIMO安全传输优化方法

(57) 摘要

本发明提供一种基于天线选择的Massive MIMO安全传输优化方法,属于无线通信技术领域。所述方法包括:基站在向合法用户发送信息时,同时发送人工噪声,窃听者试图窃听基站发送给合法用户的信息;确定合法用户和窃听者的接收信号;根据确定的合法用户和窃听者的接收信号,基于系统信息传输安全性要求及系统总功耗,结合人工噪声和天线选择技术,构建安全能量效率的优化目标函数;建立以最大化安全能量效率为目标,联合优化波束成形、天线选择和人工噪声变量的联合优化模型;对联合优化模型进行求解。采用本发明,能够提升Massive MIMO安全传输系统的安全能量效率。



1.一种基于天线选择的Massive MIMO安全传输优化方法,其特征在于,包括:

基站在向合法用户发送信息时,同时发送人工噪声,窃听者试图窃听基站发送给合法用户的信息;

确定合法用户和窃听者的接收信号;

根据确定的合法用户和窃听者的接收信号,基于系统信息传输安全性要求及系统总功耗,结合人工噪声和天线选择技术,构建安全能量效率的优化目标函数;

建立以最大化安全能量效率为目标,联合优化波束成形、天线选择和人工噪声变量的联合优化模型;

对联合优化模型进行求解;

其中,基站的发送信号表示为

$$\mathbf{x} = \sum_{k=1}^K \mathbf{F}\mathbf{w}_k s_k + \mathbf{F}\mathbf{w}_a s_a$$

其中, $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 表示基站的发送信号, N_t 表示基站配备的发射天线的数目,形式 $\mathbb{C}^{M \times N}$ 表示 $M \times N$ 的复数矩阵; $\mathbf{w}_k \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 和 $s_k \in \mathbb{C}$ 分别表示第 k 个合法用户的波束成形向量和携带信息的符号,满足 $\mathbb{E}\{|s_k|^2\} = 1$, $\mathbb{E}\{\cdot\}$ 表示取期望, $k \in \{1, 2, \dots, K\}$, K 表示合法用户的数目; $\mathbf{w}_a \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 和 $s_a \in \mathbb{C}$ 分别表示人工噪声波束成形向量和人工噪声符号,满足 $\mathbb{E}\{|s_a|^2\} = 1$; $\mathbf{F} \in \mathbb{R}^{N_t \times N_t}$ 表示天线选择矩阵,是对角阵,如果第 i 根天线被选择, $F[i, i] = 1$, 否则 $F[i, i] = 0$;

其中,第 k 个合法用户和窃听者的接收信号分别表示为:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{F}\mathbf{w}_k s_k + \sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{H}_k \mathbf{F}\mathbf{w}_i s_i + \mathbf{H}_k \mathbf{F}\mathbf{w}_a s_a + \mathbf{n}_k \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$$

$$\mathbf{y}_{e,k} = \mathbf{G}\mathbf{F}\mathbf{w}_k s_k + \sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{G}\mathbf{F}\mathbf{w}_i s_i + \mathbf{G}\mathbf{F}\mathbf{w}_a s_a + \mathbf{n}_e \in \mathbb{C}^{N_e \times 1}$$

其中, $y_k, y_{e,k}$ 分别表示第 k 个合法用户的接收信号和窃听者的接收信号, $\mathbf{H}_k \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$ 和 $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{N_e \times N_t}$ 分别表示从基站到合法用户和窃听者的信道矩阵, N_r 表示每个合法用户配备的接收天线的数目, N_e 表示窃听者配备的接收天线的数目; $\mathbf{n}_k \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ 和 $\mathbf{n}_e \in \mathbb{C}^{N_e \times 1}$ 都表示加性高斯白噪声;

其中,所述根据确定的合法用户和窃听者的接收信号,基于系统信息传输安全性要求及系统总功耗,结合人工噪声和天线选择技术,构建安全能量效率的优化目标函数包括:

根据确定的合法用户和窃听者的接收信号,确定第 k 个合法用户和窃听者的信干噪比;

确定系统总功耗 P_{total} ;

根据确定的第 k 个合法用户和窃听者的信干噪比,确定多用户系统的安全总速率 R_{sec} ;

将安全总速率与系统总功耗的比值作为安全能量效率 SEE , 其中, $SEE = \frac{R_{\text{sec}}}{P_{\text{total}}}$;

其中,第 k 个合法用户和窃听者的信干噪比分别表示为:

$$SINR_k = \frac{\|\mathbf{H}_k \mathbf{F} \mathbf{w}_k\|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K \|\mathbf{H}_k \mathbf{F} \mathbf{w}_i\|^2 + \|\mathbf{H}_k \mathbf{F} \mathbf{w}_a\|^2 + \sigma_k^2}$$

$$SINR_{e,k} = \frac{\|\mathbf{G} \mathbf{F} \mathbf{w}_k\|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K \|\mathbf{G} \mathbf{F} \mathbf{w}_i\|^2 + \|\mathbf{G} \mathbf{F} \mathbf{w}_a\|^2 + \sigma_e^2}$$

其中, $SINR_k$ 、 $SINR_{e,k}$ 分别表示第k个合法用户和窃听者的信干噪比;

其中, 系统总功耗 P_{total} 表示为:

$$P_{total} = \frac{1}{\eta} \left(\sum_{k=1}^K \|\mathbf{F} \mathbf{w}_k\|^2 + \|\mathbf{F} \mathbf{w}_a\|^2 \right) + P_c \sum_{i=1}^{N_t} F[i, i] + P_0$$

其中, η 表示功率放大器效率, $\left(\sum_{k=1}^K \|\mathbf{F} \mathbf{w}_k\|^2 + \|\mathbf{F} \mathbf{w}_a\|^2 \right)$ 表示总发射功率, $\sum_{i=1}^{N_t} F[i, i]$ 表示活跃的发射天线数, P_c 表示活跃状态下一条射频链路的功耗, $P_c \sum_{i=1}^{N_t} F[i, i]$ 表示系统的射频链路功耗, P_0 表示静态电路功耗;

其中, 安全总速率 R_{sec} 表示为:

$$R_{sec} = \sum_{k=1}^K [R_k - R_{e,k}]^+$$

$$R_k = \log_2(1 + SINR_k)$$

$$R_{e,k} = \log_2(1 + SINR_{e,k})$$

其中, R_k 和 $R_{e,k}$ 分别表示第k个合法用户和窃听者的可达速率, $[\]^+$ 表示非线性算子;

其中, 所述联合优化模型表示为:

$$\max_{\mathbf{F}, \mathbf{W}, \mathbf{w}_a} SEE(\mathbf{F}, \mathbf{W}, \mathbf{w}_a)$$

$$s.t. \quad \sum_{k=1}^K \|\mathbf{F} \mathbf{w}_k\|^2 + \|\mathbf{F} \mathbf{w}_a\|^2 \leq P_{max}$$

$$F[i, i] = \{0, 1\}, i = 1, 2, \dots, N_t$$

$$\sum_{i=1}^{N_t} F[i, i] = L$$

$$R_k - R_{e,k} \geq R_0$$

其中, $\mathbf{W} = [w_1, w_2, \dots, w_K]$ 表示波束成形矩阵; P_{max} 表示最大的发射功率限制; L 表示选择的发射天线数; R_0 表示每个合法用户的保密率下限, 为给定的非负值。

2. 根据权利要求1所述的基于天线选择的Massive MIMO安全传输优化方法, 其特征在于, 所述对联合优化模型进行求解包括:

采用连续凸逼近算法对联合优化模型进行求解。

一种基于天线选择的Massive MIMO安全传输优化方法

技术领域

[0001] 本发明涉及无线通信技术领域,特别是指一种基于天线选择的Massive MIMO安全传输优化方法。

背景技术

[0002] 大规模多入多出(Massive Multiple-Input Multiple-Output,Massive MIMO)是一种将天线元件的数量比传统MIMO系统中使用的数量增加几个数量级的技术,大规模数量的天线产生丰富的空间自由度,利用可用的空间资源来提高频谱效率和能量效率。但是由于其在自由空间的传播特性,导致信息容易被窃听、被阻塞,就需要将物理层安全技术与Massive MIMO技术结合,实现无线系统的高效和安全传输。

[0003] 另外,大量的天线也带来较高的硬件成本和复杂性,天线选择技术,突破了传统通信系统中射频链路和天线“一一对应”的思想,在系统的发送端或接收端安装比射频链路更多的天线元件,并根据特定标准结合某些算法从发射或接收端的天线中选择得到最佳天线子集,射频链路通过开关结构自适应地切换到选定的天线子集以进行信号发送和接收,可以在保证系统性能的前提下,有效地降低硬件成本和复杂性。

[0004] 由于Massive MIMO的出现,天线选择技术的发展迅速,现有算法主要是基于信道状态信息(Channel State Information,CSI)进行天线选择,如穷举搜索、逐次递增算法、逐次递减算法、随机选择算法及行相关算法;或依据某些准则,如最小均方误差(Minimum Mean Square Error,MMSE),最小方差无畸变响应(Minimum Variance Distortionless Response,MVDR)等进行迭代交替优化实现天线选择,缺乏对系统整体性的考虑。

[0005] 当前Massive MIMO与安全传输场景结合的研究较少,系统建模时一般限制为单用户单天线,并没有充分实现Massive MIMO的意义;且在窃听信道或者人工引入干扰等安全传输场景中,对天线选择技术的研究较少,优化目标多为保密率或保密中断概率,缺乏利用天线选择和人工噪声技术提升系统安全能量效率的研究,利用天线选择技术提升系统的安全能量效率有重要的研究意义。

[0006] 综上,经典的天线选择算法仅依赖于信道条件进行选择,缺乏对系统整体性能的考虑;现有的Massive MIMO安全传输场景中对天线选择技术的研究较少,缺乏利用天线选择和人工噪声技术提升系统安全能量效率的研究。

发明内容

[0007] 本发明实施例提供了一种基于天线选择的Massive MIMO安全传输优化方法,能够提升Massive MIMO安全传输系统的安全能量效率。所述技术方案如下:

[0008] 本发明实施例提供了一种基于天线选择的Massive MIMO安全传输优化方法,包括:

[0009] 基站在向合法用户发送信息时,同时发送人工噪声,窃听者试图窃听基站发送给合法用户的信息;

[0010] 确定合法用户和窃听者的接收信号；

[0011] 根据确定的合法用户和窃听者的接收信号，基于系统信息传输安全性要求及系统总功耗，结合人工噪声和天线选择技术，构建安全能量效率的优化目标函数；

[0012] 建立以最大化安全能量效率为目标，联合优化波束成形、天线选择和人工噪声变量的联合优化模型；

[0013] 对联合优化模型进行求解。

[0014] 进一步地，基站的发送信号表示为

$$[0015] \quad \mathbf{x} = \sum_{k=1}^K \mathbf{F}\mathbf{w}_k s_k + \mathbf{F}\mathbf{w}_a s_a$$

[0016] 其中， $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 表示基站的发送信号， N_t 表示基站配备的发射天线的数目，形式 $\mathbb{C}^{M \times N}$ 表示 $M \times N$ 的复数矩阵； $\mathbf{w}_k \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 和 $s_k \in \mathbb{C}$ 分别表示第 k 个合法用户的波束成形向量和携带信息的符号，满足 $\mathbb{E}\{|s_k|^2\} = 1$ ， $\mathbb{E}\{\cdot\}$ 表示取期望， $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ ， K 表示合法用户的数目； $\mathbf{w}_a \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 和 $s_a \in \mathbb{C}$ 分别表示人工噪声波束成形向量和人工噪声符号，满足 $\mathbb{E}\{|s_a|^2\} = 1$ ； $\mathbf{F} \in \mathbb{R}^{N_t \times N_t}$ 表示天线选择矩阵，是对角阵，如果第 i 根天线被选择， $F[i, i] = 1$ ，否则 $F[i, i] = 0$ 。

[0017] 进一步地，第 k 个合法用户和窃听者的接收信号分别表示为：

$$[0018] \quad \mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{F}\mathbf{w}_k s_k + \sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{H}_k \mathbf{F}\mathbf{w}_i s_i + \mathbf{H}_k \mathbf{F}\mathbf{w}_a s_a + \mathbf{n}_k \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$$

$$[0019] \quad \mathbf{y}_{e,k} = \mathbf{G}\mathbf{F}\mathbf{w}_k s_k + \sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{G}\mathbf{F}\mathbf{w}_i s_i + \mathbf{G}\mathbf{F}\mathbf{w}_a s_a + \mathbf{n}_e \in \mathbb{C}^{N_e \times 1}$$

[0020] 其中， y_k 、 $y_{e,k}$ 分别表示第 k 个合法用户的接收信号和窃听者的接收信号， $\mathbf{H}_k \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$ 和 $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{N_e \times N_t}$ 分别表示从基站到合法用户和窃听者的信道矩阵， N_r 表示每个合法用户配备的接收天线的数目， N_e 表示窃听者配备的接收天线的数目； $\mathbf{n}_k \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ 和 $\mathbf{n}_e \in \mathbb{C}^{N_e \times 1}$ 都表示加性高斯白噪声。

[0021] 进一步地，所述根据确定的合法用户和窃听者的接收信号，基于系统信息传输安全性要求及系统总功耗，结合人工噪声和天线选择技术，构建安全能量效率的优化目标函数包括：

[0022] 根据确定的合法用户和窃听者的接收信号，确定第 k 个合法用户和窃听者的信干噪比；

[0023] 确定系统总功耗 P_{total} ；

[0024] 根据确定的第 k 个合法用户和窃听者的信干噪比，确定多用户系统的安全总速率 R_{sec} ；

[0025] 将安全总速率与系统总功耗的比值作为安全能量效率 SEE ，其中， $SEE = \frac{R_{\text{sec}}}{P_{\text{total}}}$ 。

[0026] 进一步地，第 k 个合法用户和窃听者的信干噪比分别表示为：

$$[0027] \quad SINR_k = \frac{\|\mathbf{H}_k \mathbf{Fw}_k\|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K \|\mathbf{H}_k \mathbf{Fw}_i\|^2 + \|\mathbf{H}_k \mathbf{Fw}_a\|^2 + \sigma_k^2}$$

$$[0028] \quad SINR_{e,k} = \frac{\|\mathbf{Gw}_k\|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K \|\mathbf{Gw}_i\|^2 + \|\mathbf{Gw}_a\|^2 + \sigma_e^2}$$

[0029] 其中, $SINR_k$ 、 $SINR_{e,k}$ 分别表示第k个合法用户和窃听者的信干噪比。

[0030] 进一步地, 系统总功耗 P_{total} 表示为:

$$[0031] \quad P_{total} = \frac{1}{\eta} \left(\sum_{k=1}^K \|\mathbf{Fw}_k\|^2 + \|\mathbf{Fw}_a\|^2 \right) + P_c \sum_{i=1}^{N_t} F[i, i] + P_0$$

[0032] 其中, η 表示功率放大器效率, $\left(\sum_{k=1}^K \|\mathbf{Fw}_k\|^2 + \|\mathbf{Fw}_a\|^2 \right)$ 表示总发射功率, $\sum_{i=1}^{N_t} F[i, i]$ 表示

活跃的发射天线数, P_c 表示活跃状态下一条射频链路的功耗, $P_c \sum_{i=1}^{N_t} F[i, i]$ 表示系统的射频链路功耗, P_0 表示静态电路功耗。

[0033] 进一步地, 安全总速率 R_{sec} 表示为:

$$[0034] \quad R_{sec} = \sum_{k=1}^K [R_k - R_{e,k}]^+$$

$$[0035] \quad R_k = \log_2 (1 + SINR_k)$$

$$[0036] \quad R_{e,k} = \log_2 (1 + SINR_{e,k})$$

[0037] 其中, R_k 和 $R_{e,k}$ 分别表示第k个合法用户和窃听者的可达速率, $[\]^+$ 表示非线性算子。

[0038] 进一步地, 所述联合优化模型表示为:

$$[0039] \quad \max_{\mathbf{F}, \mathbf{W}, \mathbf{w}_a} SEE(\mathbf{F}, \mathbf{W}, \mathbf{w}_a)$$

$$[0040] \quad s.t. \quad \sum_{k=1}^K \|\mathbf{Fw}_k\|^2 + \|\mathbf{Fw}_a\|^2 \leq P_{max}$$

$$[0041] \quad F[i, i] = \{0, 1\}, i = 1, 2, \dots, N_t$$

$$[0042] \quad \sum_{i=1}^{N_t} F[i, i] = L$$

$$[0043] \quad R_k - R_{e,k} \geq R_0$$

[0044] 其中, $\mathbf{W} = [w_1, w_2, \dots, w_K]$ 表示波束成形矩阵; P_{max} 表示最大的发射功率限制; L 表示选择的发射天线数; R_0 表示每个合法用户的保密率下限, 为给定的非负值。

[0045] 进一步地, 所述对联合优化模型进行求解包括:

[0046] 采用连续凸逼近算法对联合优化模型进行求解。

[0047] 本发明实施例提供的技术方案带来的有益效果至少包括:

[0048] 本发明实施例中, 针对多用户 Massive MIMO 下行安全传输场景, 基于系统信息传输安全性要求及系统总功耗, 结合人工噪声和天线选择技术, 构建安全能量效率的优化目

标函数；利用所构建的安全能量效率目标函数，同时考虑用户间干扰、窃听者以及噪声，建立以最大化安全能量效率为目标，联合优化波束成形、天线选择和人工噪声变量的联合优化模型；对联合优化模型进行求解。这样，在满足无线通信系统数据传输的安全性需求的同时，有效降低了Massive MIMO安全传输系统的硬件成本及功耗，并提升了Massive MIMO安全传输系统的安全能量效率。

附图说明

[0049] 为了更清楚地说明本发明实施例中的技术方案，下面将对实施例描述中所需要使用的附图作简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动的前提下，还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0050] 图1为本发明实施例提供的基于天线选择的Massive MIMO安全传输优化方法的流程示意图；

[0051] 图2为本发明实施例提供的系统模型的结构示意图；

[0052] 图3为本发明实施例提供的安全能量效率随合法用户数变化示意图。

具体实施方式

[0053] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚，下面将结合附图对本发明实施方式作进一步地详细描述。

[0054] 如图1所示，本发明实施例提供了一种基于天线选择的Massive MIMO安全传输优化方法，包括：

[0055] S101，基站在向合法用户发送信息时，同时发送人工噪声，窃听者试图窃听基站发送给合法用户的信息；

[0056] 本实施例中，考虑多用户Massive MIMO下行安全传输场景，其中一个有 N_t 根发射天线的基站，同时向 K 个合法用户发送信息，每个合法用户都有 N_r 根接收天线，同时，配备 N_e 根天线的窃听者试图窃听基站发送给合法用户的信息，如图2所示。为了避免信息被窃听者窃听，基站在发送信息时，同时发送人工噪声。

[0057] 本实施例中，将基站的发送信号表示为

$$[0058] \quad \mathbf{x} = \sum_{k=1}^K \mathbf{F} \mathbf{w}_k s_k + \mathbf{F} \mathbf{w}_a s_a \quad (1)$$

[0059] 其中， $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 表示基站的发送信号，形式 $\mathbb{C}^{M \times N}$ 表示 $M \times N$ 的复数矩阵； N_t 表示基站配备的发射天线的数目； $\mathbf{w}_k \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 和 $s_k \in \mathbb{C}$ 分别表示第 k 个合法用户的波束成形向量和携带信息的符号，满足 $\mathbb{E}\{|s_k|^2\} = 1$ ， $\mathbb{E}\{\cdot\}$ 表示取期望， $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ ， K 表示合法用户的数目； $\mathbf{w}_a \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 和 $s_a \in \mathbb{C}$ 分别表示人工噪声波束成形向量和人工噪声符号，满足 $\mathbb{E}\{|s_a|^2\} = 1$ ； $\mathbf{F} \in \mathbb{R}^{N_t \times N_t}$ 表示天线选择矩阵，是对角阵，如果第 i 根天线被选择， $F[i, i] = 1$ ，否则 $F[i, i] = 0$ 。

[0060] S102，确定合法用户和窃听者的接收信号；

[0061] 本实施例中,第k个合法用户和窃听者的接收信号分别表示为:

$$[0062] \quad \mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{F} \mathbf{w}_k s_k + \sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{H}_k \mathbf{F} \mathbf{w}_i s_i + \mathbf{H}_k \mathbf{F} \mathbf{w}_a s_a + \mathbf{n}_k \in \mathbb{C}^{N_r \times 1} \quad (2a)$$

$$[0063] \quad \mathbf{y}_{e,k} = \mathbf{G} \mathbf{F} \mathbf{w}_k s_k + \sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{G} \mathbf{F} \mathbf{w}_i s_i + \mathbf{G} \mathbf{F} \mathbf{w}_a s_a + \mathbf{n}_e \in \mathbb{C}^{N_e \times 1} \quad (2b)$$

[0064] 其中, y_k 、 $y_{e,k}$ 分别表示第k个合法用户的接收信号和窃听者的接收信号, $\mathbf{H}_k \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$ 和 $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{N_e \times N_t}$ 分别表示从基站到合法用户和窃听者的信道矩阵,假设所有信道都是Saleh-Valenzuela信道,窃听者在系统中是可信任的,所有信道的CSI都是可获得的, N_r 表示每个合法用户配备的接收天线的数目, N_e 表示窃听者配备的接收天线的数目; $\mathbf{n}_k \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ 和 $\mathbf{n}_e \in \mathbb{C}^{N_e \times 1}$ 分别是具有零均值和协方差为 $\sigma_k^2 \mathbf{I}_{N_r}$ 和 $\sigma_e^2 \mathbf{I}_{N_e}$ 的加性高斯白噪声, \mathbf{I}_{N_r} 和 \mathbf{I}_{N_e} 都表示单位矩阵。

[0065] S103,根据确定的合法用户和窃听者的接收信号,基于系统信息传输安全性要求及系统总功耗,结合人工噪声和天线选择技术,构建安全能量效率的优化目标函数;具体可以包括以下步骤:

[0066] A1,根据确定的合法用户和窃听者的接收信号,确定第k个合法用户和窃听者的信干噪比;

[0067] 本实施例中,第k个合法用户和窃听者的信干噪比分别可以表示为:

$$[0068] \quad SINR_k = \frac{\|\mathbf{H}_k \mathbf{F} \mathbf{w}_k\|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K \|\mathbf{H}_k \mathbf{F} \mathbf{w}_i\|^2 + \|\mathbf{H}_k \mathbf{F} \mathbf{w}_a\|^2 + \sigma_k^2} \quad (3a)$$

$$[0069] \quad SINR_{e,k} = \frac{\|\mathbf{G} \mathbf{F} \mathbf{w}_k\|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K \|\mathbf{G} \mathbf{F} \mathbf{w}_i\|^2 + \|\mathbf{G} \mathbf{F} \mathbf{w}_a\|^2 + \sigma_e^2} \quad (3b)$$

[0070] 其中, $SINR_k$ 、 $SINR_{e,k}$ 分别表示第k个合法用户和窃听者的信干噪比。

[0071] A2,确定系统总功耗 P_{total} ;

[0072] 本实施例中,系统总功耗 P_{total} 可以表示为:

$$[0073] \quad P_{total} = \frac{1}{\eta} \left(\sum_{k=1}^K \|\mathbf{F} \mathbf{w}_k\|^2 + \|\mathbf{F} \mathbf{w}_a\|^2 \right) + P_c \sum_{i=1}^{N_t} F[i, i] + P_0 \quad (4)$$

[0074] 其中, η 表示功率放大器效率, $\left(\sum_{k=1}^K \|\mathbf{F} \mathbf{w}_k\|^2 + \|\mathbf{F} \mathbf{w}_a\|^2 \right)$ 表示总发射功率, $\sum_{i=1}^{N_t} F[i, i]$ 表示

活跃的发射天线数, P_c 表示活跃状态下一条射频链路的功耗, $P_c \sum_{i=1}^{N_t} F[i, i]$ 表示系统的射频链路功耗, P_0 表示静态电路功耗。

[0075] A3,根据确定的第k个合法用户和窃听者的信干噪比,确定多用户系统的安全总速率 R_{sec} ;

[0076] 本实施例中,安全总速率 R_{sec} 可以表示为:

$$[0077] \quad R_{\text{sec}} = \sum_{k=1}^K [R_k - R_{e,k}]^+ \quad (5)$$

[0078] 其中,

$$[0079] \quad R_k = \log_2(1 + \text{SINR}_k) \quad (6a)$$

$$[0080] \quad R_{e,k} = \log_2(1 + \text{SINR}_{e,k}) \quad (6b)$$

[0081] 其中, R_k 和 $R_{e,k}$ 分别表示第 k 个合法用户和窃听者的可达速率, $[\]^+$ 表示非线性算子。

[0082] A4, 将安全总速率与系统总功耗的比值作为安全能量效率 SEE , 其中,

$$[0083] \quad SEE = \frac{R_{\text{sec}}}{P_{\text{total}}} \quad (7)$$

[0084] 本实施例中, 图3为安全能量效率随合法用户数变化示意图, 其中, 图3中所提出算法指本发明实施例所述的基于天线选择的 Massive MIMO 安全传输优化方法。

[0085] S104, 建立以最大化安全能量效率为目标, 联合优化波束成形、天线选择和人工噪声变量的联合优化模型;

[0086] 本实施例中, 联合应用天线选择和人工噪声来优化安全能量效率, 同时满足合法用户的安全要求, 发射功率约束和天线选择约束, 优化问题/建立的联合优化模型可以表述为:

$$[0087] \quad \max_{\mathbf{F}, \mathbf{W}, \mathbf{w}_a} SEE(\mathbf{F}, \mathbf{W}, \mathbf{w}_a) \quad (8a)$$

$$[0088] \quad s.t. \quad \sum_{k=1}^K \|\mathbf{F}\mathbf{w}_k\|^2 + \|\mathbf{F}\mathbf{w}_a\|^2 \leq P_{\text{max}} \quad (8b)$$

$$[0089] \quad F[i, i] = \{0, 1\}, i = 1, 2, \dots, N_t \quad (8c)$$

$$[0090] \quad \sum_{i=1}^{N_i} F[i, i] = L \quad (8d)$$

$$[0091] \quad R_k - R_{e,k} \geq R_0 \quad (8e)$$

[0092] 其中, $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_K]$ 表示波束成形矩阵; P_{max} 表示最大的发射功率限制; L 表示选择的发射天线数; R_0 表示每个合法用户的保密率下限, 为给定的非负值。

[0093] S105, 对联合优化模型进行求解。

[0094] 本实施例中, 上述联合优化模型是一个混合整数非线性非凸分式规划问题, 以目前的形式很难解决。因此, 本实施例中, 采用连续凸逼近 (Successive Convex Approximation, SCA) 算法对联合优化模型进行求解, 得到优化问题的近优解, 具体的:

[0095] 为了便于处理, 首先从式 (5) 中删除非线性算子 $[\]^+$, 由于约束式 (8e), 令 $R_0 > 0$ 可将 R_{sec} 限制为非负。

[0096] 进一步地, 移除天线选择矩阵 \mathbf{F} , 并将式 (3)、(4)、(6)、(7) 重写为:

$$[0097] \quad \widetilde{\text{SINR}}_k = \frac{\|\mathbf{H}_k \mathbf{w}_k\|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K \|\mathbf{H}_k \mathbf{w}_i\|^2 + \|\mathbf{H}_k \mathbf{w}_a\|^2 + \sigma_k^2} \quad (9a)$$

$$[0098] \quad \widetilde{SINR}_{e,k} = \frac{\|\mathbf{G}\mathbf{w}_k\|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K \|\mathbf{G}\mathbf{w}_i\|^2 + \|\mathbf{G}\mathbf{w}_a\|^2 + \sigma_e^2} \quad (9b)$$

$$[0099] \quad \widetilde{P}_{total} = \frac{1}{\eta} \left(\sum_{k=1}^K \|\mathbf{w}_k\|^2 + \|\mathbf{w}_a\|^2 \right) + P_c \sum_{i=1}^{N_t} f_i + P_0 \quad (9c)$$

$$[0100] \quad \widetilde{R}_k = \log_2(1 + \widetilde{SINR}_k) \quad (9d)$$

$$[0101] \quad \widetilde{R}_{e,k} = \log_2(1 + \widetilde{SINR}_{e,k}) \quad (9e)$$

$$[0102] \quad \widetilde{SEE} = \frac{\sum_{k=1}^K (\widetilde{R}_k - \widetilde{R}_{e,k})}{\widetilde{P}_{total}} \quad (9f)$$

[0103] 其中,上标 \sim 表示重写后的相应参数;

[0104] 定义一个 $N_t \times 1$ 的二进制天线选择向量 \mathbf{f} 来代替天线选择矩阵 \mathbf{F} ,以将式(8)中的天线选择变量从目标函数转换到约束中,其表示为

$$[0105] \quad f_i = \{0, 1\}, i = 1, 2, \dots, N_t \quad (10a)$$

$$[0106] \quad \|\hat{\mathbf{w}}_i\|^2 + |w_{a,i}|^2 \leq f_i P_{\max}, i = 1, 2, \dots, N_t \quad (10b)$$

[0107] 其中, $\hat{\mathbf{w}}_i \triangleq [\mathbf{w}_1[i], \mathbf{w}_2[i], \dots, \mathbf{w}_K[i]]^T$, $\hat{\mathbf{w}}_i$ 表示第 i 根发射天线上的波束成形矢量, \triangleq 表示定义为, $\mathbf{w}_k[i]$ 表示第 k 个合法用户在第 i 根发射天线上的波束成形标量, $[\]^T$ 表示矩阵转置; $w_{a,i}$ 表示第 i 根发射天线上的人工噪声预编码标量。通过约束式(10b),将天线选择子问题转换为每根发射天线上的功率约束问题,从而将天线选择和波束成形变量从它们的非凸相乘项中分离。 $f_i = 0$ 表示第 i 根发射天线未被选择,即第 i 根发射天线上的发射功率 $\|\hat{\mathbf{w}}_i\|^2 + |w_{a,i}|^2$ 被限制为0,第 i 根发射天线上的波束成形矢量为0。 $f_i = 1$ 表示第 i 根发射天线被选择,第 i 根发射天线上的最大发射功率 $\|\hat{\mathbf{w}}_i\|^2 + |w_{a,i}|^2$ 为 P_{\max} 。

[0108] 因为二元变量 \mathbf{f} ,优化问题仍然是一个混合整数规划问题,利用连续松弛方法将式(10a)转化为凸的易处理形式,式(10a)等价替换为以下两个约束:

$$[0109] \quad f_i = [0, 1], i = 1, 2, \dots, N_t \quad (11a)$$

$$[0110] \quad \sum_{i=1}^{N_t} f_i - \sum_{i=1}^{N_t} f_i^2 \leq 0 \quad (11b)$$

[0111] 其中,式(11a)是式(10a)的连续松弛形式,将离散整数变量转换为连续变量。另外,通过不等式约束式(11b),松弛后的变量可以逼近于0或1。因此,同时满足上述两个约束条件就等价于满足约束条件式(10a)。

[0112] 等效变换后,联合优化模型转化为式(12)

$$[0113] \quad \max_{\mathbf{f}, \mathbf{W}, \mathbf{w}_a} \widetilde{SEE}(\mathbf{f}, \mathbf{W}, \mathbf{w}_a) \quad (12a)$$

$$[0114] \quad s.t. \quad \sum_{k=1}^K \|\mathbf{w}_k\|^2 + \|\mathbf{w}_a\|^2 \leq P_{\max} \quad (12b)$$

$$[0115] \quad \tilde{R}_k - \tilde{R}_{e,k} \geq R_0, k = 1, 2, \dots, K \quad (12c)$$

$$[0116] \quad \sum_{i=1}^{N_f} f_i = L \quad (12d)$$

[0117] (10b), (11) (12e)

[0118] 通过等效变换去掉整数变量,得到一个连续的非凸分式规划问题式(12),观察到式(12a)、(12c)、(11b)仍然是非凸的,通过引入辅助变量对SINR表达式进行化简,

$$[0119] \quad \sum_{i=1}^K \|\mathbf{H}_k \mathbf{w}_i\|^2 + \|\mathbf{H}_k \mathbf{w}_a\|^2 + \sigma_k^2 \geq e^{s_{b,k}} \quad (13a)$$

$$[0120] \quad \sum_{i=1, i \neq k}^K \|\mathbf{H}_k \mathbf{w}_i\|^2 + \|\mathbf{H}_k \mathbf{w}_a\|^2 + \sigma_k^2 \leq e^{n_{b,k}} \quad (13b)$$

$$[0121] \quad \sum_{i=1}^K \|\mathbf{G} \mathbf{w}_i\|^2 + \|\mathbf{G} \mathbf{w}_a\|^2 + \sigma_e^2 \leq e^{s_e} \quad (13c)$$

$$[0122] \quad \sum_{i=1, i \neq k}^K \|\mathbf{G} \mathbf{w}_i\|^2 + \|\mathbf{G} \mathbf{w}_a\|^2 + \sigma_e^2 \geq e^{n_{e,k}} \quad (13d)$$

[0123] 进而有

$$[0124] \quad \tilde{R}_k - \tilde{R}_{e,k} \geq \log_2(e^{s_{b,k} - n_{b,k} - s_e + n_{e,k}}) \geq R_{\min,k} \quad (14)$$

[0125] 其中, $R_{\min,k}$, $s_{b,k}$, $n_{b,k}$, s_e , $n_{e,k}$ 为新引入的辅助变量, $e^{s_{b,k}}$ 、 $e^{n_{b,k}}$ 、 e^{s_e} 、 $e^{n_{e,k}}$ 、 $R_{\min,k}$ 中的 e 都表示自然常数,进一步应用一阶泰勒近似,

$$[0126] \quad \sum_{i=1}^K \|\mathbf{H}_k \mathbf{w}_i\|^2 + \|\mathbf{H}_k \mathbf{w}_a\|^2 + \sigma_k^2 \geq \sum_{i=1}^K \left(2 \operatorname{Re}((\mathbf{w}_i^{(n)})^H \mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k \mathbf{w}_i) - \|\mathbf{H}_k \mathbf{w}_i^{(n)}\|^2 \right) \\ + 2 \operatorname{Re}((\mathbf{w}_a^{(n)})^H \mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k \mathbf{w}_a) - \|\mathbf{H}_k \mathbf{w}_a^{(n)}\|^2 + \sigma_k^2 \quad (15a)$$

$$[0127] \quad \sum_{i=1, i \neq k}^K \|\mathbf{G} \mathbf{w}_i\|^2 + \|\mathbf{G} \mathbf{w}_a\|^2 + \sigma_e^2 \geq \sum_{i=1, i \neq k}^K \left(2 \operatorname{Re}((\mathbf{w}_i^{(n)})^H \mathbf{G}^H \mathbf{G} \mathbf{w}_i) - \|\mathbf{G} \mathbf{w}_i^{(n)}\|^2 \right) \\ + 2 \operatorname{Re}((\mathbf{w}_a^{(n)})^H \mathbf{G}^H \mathbf{G} \mathbf{w}_a) - \|\mathbf{G} \mathbf{w}_a^{(n)}\|^2 + \sigma_e^2 \quad (15b)$$

$$[0128] \quad e^{n_{b,k}} \approx e^{n_{b,k}^{(n)}} (n_{b,k} - n_{b,k}^{(n)} + 1) \quad (15c)$$

$$[0129] \quad e^{s_e} \approx e^{s_e^{(n)}} (s_e - s_e^{(n)} + 1) \quad (15d)$$

$$[0130] \quad \sum_{i=1}^{N_f} f_i - \sum_{i=1}^{N_f} f_i^2 \leq \sum_{i=1}^{N_f} f_i - \sum_{i=1}^{N_f} (f_i^{(n)})^2 - 2 \sum_{i=1}^{N_f} f_i^{(n)} (f_i - f_i^{(n)}) \quad (15e)$$

[0131] 其中, $[\]^H$ 表示矩阵共轭转置, $\mathbf{w}_i^{(n)}$, $\mathbf{w}_a^{(n)}$, $e^{n_{b,k}^{(n)}}$, $n_{b,k}^{(n)}$, $s_e^{(n)}$ 表示上一次迭代求得的最优解。

[0132] 优化问题式(12)重新表示为

$$[0133] \quad \max_{\mathbf{f}, \mathbf{w}_i, \mathbf{w}_a, \mathbf{R}_{\min}, s_{b,k}, n_{b,k}, s_e, n_{e,k}} \frac{\sum_{k=1}^K R_{\min,k}}{\tilde{P}_{total}} \quad (16a)$$

$$\begin{aligned}
[0134] \quad & s.t. \sum_{i=1}^K \left(2 \operatorname{Re}((\mathbf{w}_i^{(n)})^H \mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k \mathbf{w}_i) - \|\mathbf{H}_k \mathbf{w}_i^{(n)}\|^2 \right) \\
& + 2 \operatorname{Re}((\mathbf{w}_a^{(n)})^H \mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k \mathbf{w}_a) - \|\mathbf{H}_k \mathbf{w}_a^{(n)}\|^2 + \sigma_k^2 \geq e^{s_{b,k}} \quad (16b)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
[0135] \quad & \sum_{i=1, i \neq k}^K \left(2 \operatorname{Re}((\mathbf{w}_i^{(n)})^H \mathbf{G}^H \mathbf{G} \mathbf{w}_i) - \|\mathbf{G} \mathbf{w}_i^{(n)}\|^2 \right) \\
& + 2 \operatorname{Re}((\mathbf{w}_a^{(n)})^H \mathbf{G}^H \mathbf{G} \mathbf{w}_a) - \|\mathbf{G} \mathbf{w}_a^{(n)}\|^2 + \sigma_e^2 \geq e^{n_{e,k}} \quad (16c)
\end{aligned}$$

$$[0136] \quad \sum_{i=1, i \neq k}^K \|\mathbf{H}_k \mathbf{w}_i\|^2 + \|\mathbf{H}_k \mathbf{w}_a\|^2 + \sigma_k^2 \leq e^{n_{b,k}^{(n)}} (n_{b,k} - n_{b,k}^{(n)} + 1) \quad (16d)$$

$$[0137] \quad \sum_{i=1}^K \|\mathbf{G} \mathbf{w}_i\|^2 + \|\mathbf{G} \mathbf{w}_a\|^2 + \sigma_e^2 \leq e^{s_e^{(n)}} (s_e - s_e^{(n)} + 1) \quad (16e)$$

$$[0138] \quad \sum_{i=1}^{N_i} f_i - \sum_{i=1}^{N_i} (f_i^{(n)})^2 - 2 \sum_{i=1}^{N_i} f_i^{(n)} (f_i - f_i^{(n)}) \leq 0 \quad (16f)$$

$$[0139] \quad (s_{b,k} - n_{b,k} - s_e + n_{e,k}) \log_2 e \geq R_{\min,k}, k=1, 2, \dots, K \quad (16g)$$

$$[0140] \quad R_{\min,k} \geq R_0, k=1, 2, \dots, K \quad (16h)$$

$$[0141] \quad (10b), (11a), (12b), (12d) \quad (16i)$$

[0142] 式(16)中所有约束已经变换为凸形式,目标函数为分式,可以直接通过Dinkelbach算法转换为凸函数。

[0143] 本实施例中,利用基于SCA的算法对优化问题进行迭代求解,当达到最大迭代次数或优化目标函数的值收敛时,迭代过程停止,得到优化问题的近优解。

[0144] 本发明实施例所述的基于天线选择的Massive MIMO安全传输优化方法,针对多用户Massive MIMO下行安全传输场景,基于系统信息传输安全性要求及系统总功耗,结合人工噪声和天线选择技术,构建安全能量效率的优化目标函数;利用所构建的安全能量效率目标函数,同时考虑用户间干扰、窃听者以及噪声,建立以最大化安全能量效率为目标,联合优化波束成形、天线选择和人工噪声变量的联合优化模型;对联合优化模型进行求解。这样,在满足无线通信系统数据传输的安全性需求的同时,有效降低了Massive MIMO安全传输系统的硬件成本及功耗,并提升了Massive MIMO安全传输系统的安全能量效率。

[0145] 以上所述仅为本发明的较佳实施例,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

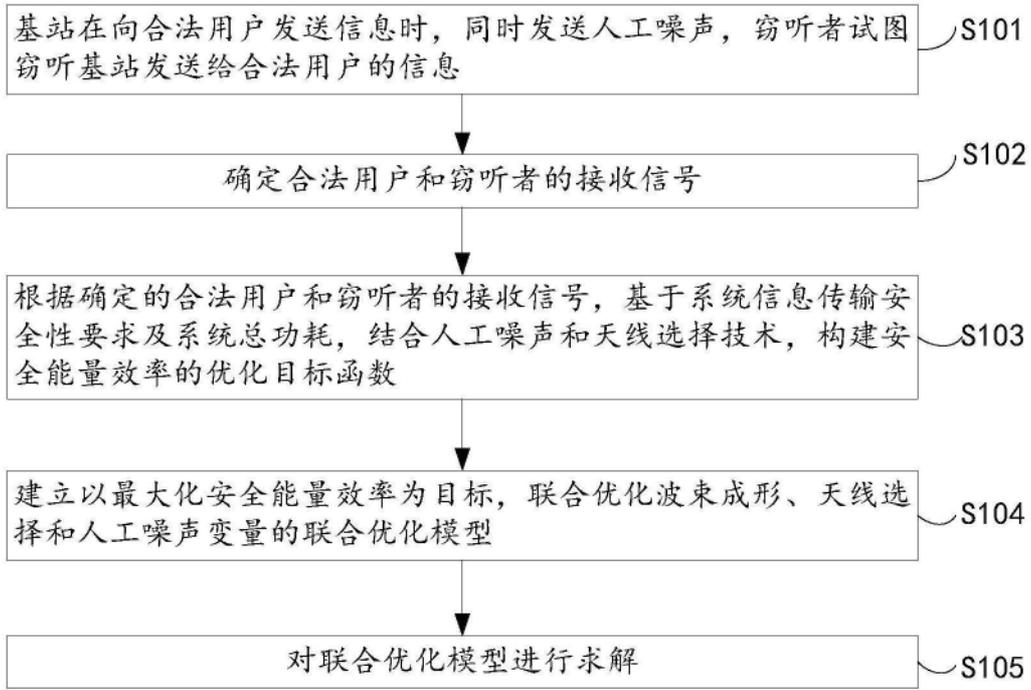


图1

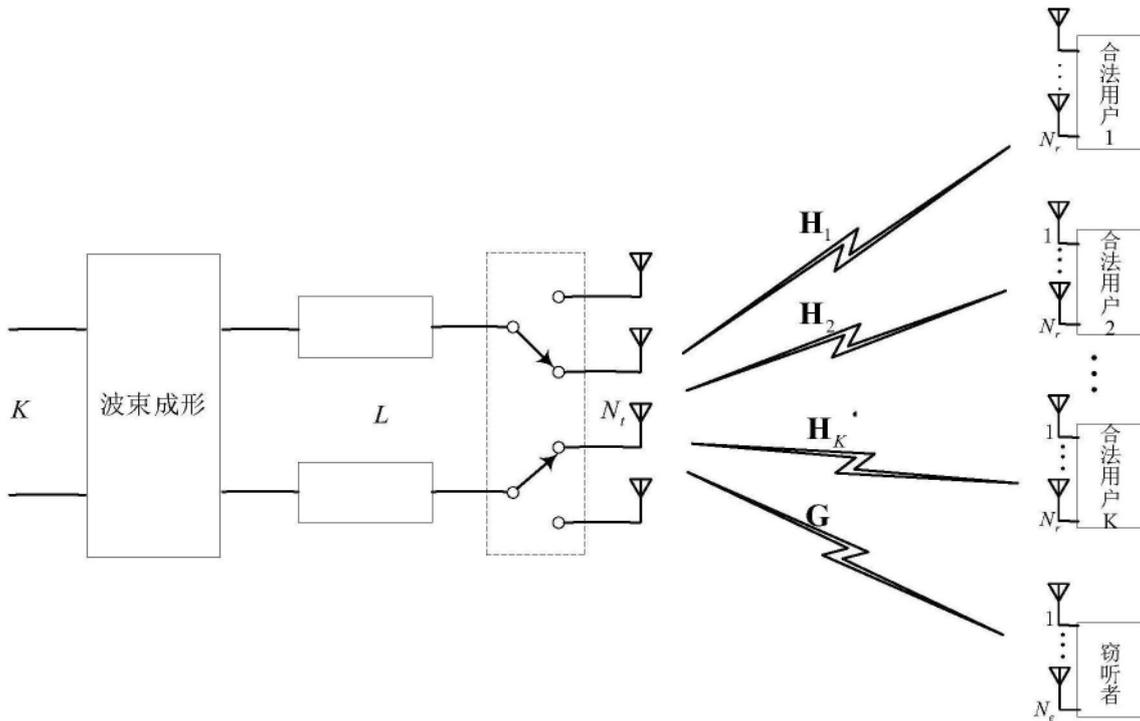


图2

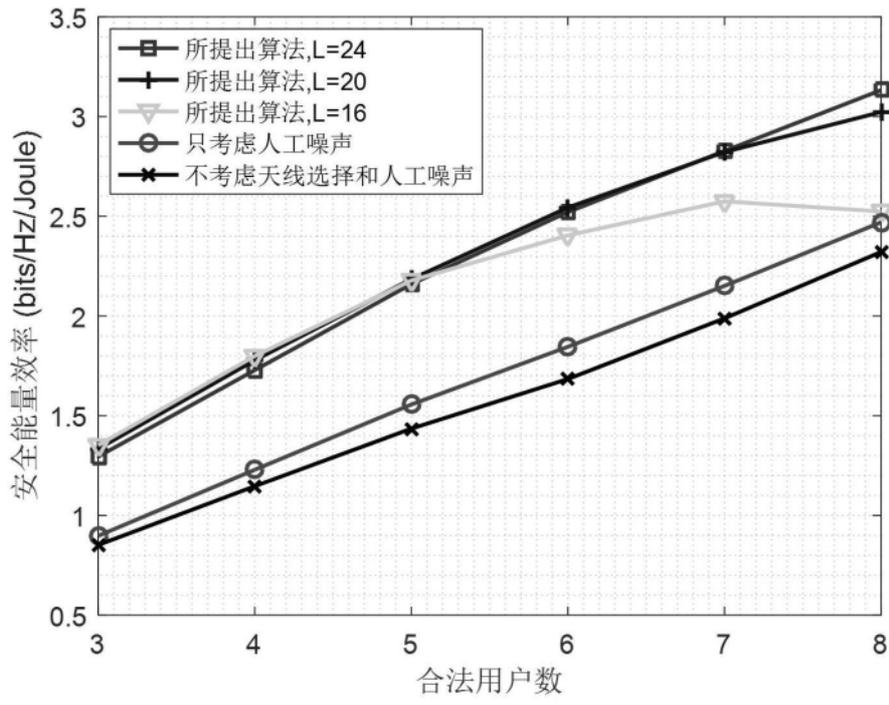


图3