

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2016年8月4日 (04.08.2016)



(10) 国际公布号
WO 2016/119289 A1

- (51) 国际专利分类号:
H04L 1/00 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2015/073967
- (22) 国际申请日: 2015年3月10日 (10.03.2015)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201510044838.5 2015年1月29日 (29.01.2015) CN
- (71) 申请人: 清华大学 (TSINGHUA UNIVERSITY)
[CN/CN]; 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。
- (72) 发明人: 栗欣 (SU, Xin); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 曾捷 (ZENG, Jie); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 肖驰洋 (XIAO, Chiyang); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 肖立民 (XIAO, Limin); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 赵明 (ZHAO, Ming); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 王京 (WANG, Jing); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。
- (74) 代理人: 北京清亦华知识产权代理事务所 (普通合伙) (TSINGYIHUA INTELLECTUAL PROPERTY LLC); 中国北京市海淀区清华园清华大学照澜院商业楼 301 室, Beijing 100084 (CN)。
- (81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。
- (84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

[见续页]

(54) Title: DETECTION METHOD FOR MULTI-USER SIGNAL IN LARGE-SCALE MULTI-ANTENNA SYSTEM

(54) 发明名称: 大规模多天线中多用户信号的检测方法

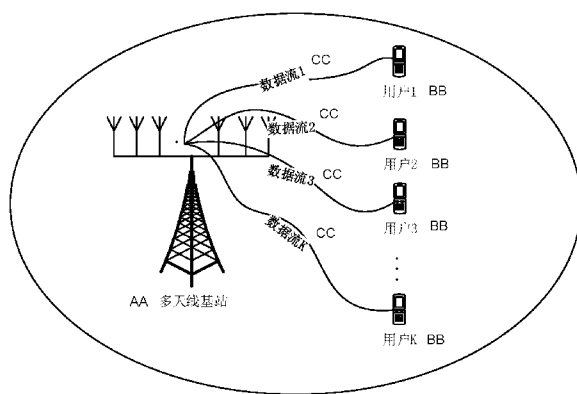


图 2

AA: MULTI-ANTENNA BASE STATION
BB: USER
CC: DATA STREAM

(57) Abstract: The present invention relates to a detection method for a multi-user signal in a large-scale multi-antenna system, and belongs to the technical field of wireless communications. In this method, an obtained CSI is used to detect multi-user information at a base station side. This method has low complexity and good bit error rate performance which can approximate the bit error rate performance detected with an optimal MMSE within several iterations. In this method, a system of linear equations is solved by means of a Lanczos iteration algorithm, so that the use of a direct large matrix inversion method for obtaining an MMSE equalization matrix is avoided, and the computational complexity of detection can be greatly reduced. In addition, by means of this detection method, LLR values of various information bits in lower complexity can be calculated as inputs of a decoder, and the performance of joint detection and decoding can be significantly improved. When a ratio of the number K of users to the number N of base station antennas is constant and the number of the two both tends to infinity, such reduction in complexity is particularly obvious, and at the same time the bit error rate performance can gradually reach the maximum likelihood detection (optimal) performance.

(57) 摘要:

[见续页]



WO 2016/119289 A1

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第 21 条(3))。

本发明涉及一种大规模多天线系统中多用户信号的检测方法，属于无线通信技术领域。该方法利用已获得的 CSI 在基站侧对多用户的信息进行检测。本方法复杂度低，误比特率性能好，能在几步迭代以内就逼近最优 MMSE 检测的误比特率性能。本方法通过 Lanczos 迭代算法求解线性方程组，避免了通过直接对大型矩阵求逆的方式获得 MMSE 均衡矩阵，能大大减少检测的计算复杂度；此外，本检测方法能在较低的复杂度内计算出各个信息比特的 LLR 值作为译码器的输入，能显著提升联合检测译码的性能。在用户数 K 与基站天线数 N 的比值一定时且二者数目都趋于无穷时，这种复杂度的降低尤为明显，同时误比特率性能能够渐进达到最大似然检测的(最优)性能。

大规模多天线中多用户信号的检测方法

技术领域

5 本发明涉及无线通信技术领域，尤其涉及一种大规模多天线系统中多用户信号的检测方法。

背景技术

10 随着移动终端数的飞速增长、物联网的发展，以及无线数据业务种类的不断增多，用户对无线数据业务的需求不断对现有的移动通信技术提出新的挑战。作为一种具有满足未来无线移动通信对频谱效率、能量效率和信道容量需求潜质的技术，大规模多输入多输出（以下简称 **Massive MIMO**）技术已经在学术界和产业界引起了广泛的关注。

Massive MIMO 技术通过在基站（以下简称 **BS**）侧部署数量众多的天线，来为与通信用户之间的通信提供足够多的自由度以提高分集增益和复用增益。然而，当 **BS** 的天线数
15 很大时，传统的高性能 **MIMO** 检测技术的计算复杂度将会变得十分巨大，如基于球形译码（**SD**）算法的检测技术的计算复杂度随着天线数的增加呈指数增加。而基于邻域搜索的检测技术虽然在复杂度上比基于 **SD** 算法的检测技术有所下降，但不能保证最终的检测结果不是局部最优的。在传统的 **MIMO** 框架下（非大规模天线），复杂度较低的线性检测算法，如迫零（**ZF**）检测算法不能提供足够的波束成形增益，匹配滤波（**MF**）检测算法不能充分
20 消除各用户之间信号的相互干扰，存在一定的局限性且检测性能不是十分理想。然而，当 **BS** 侧的天线数趋于无穷时，由于用户与 **BS** 的不同天线之间的信道渐进正交，线性检测算法能以较低的复杂度渐进达到最优的检测性能。但是，实际场景中 **BS** 由于受空间范围和建设成本的限制，不可能采用无穷多的天线配置，因此，低复杂度的接近最优检测性能的线性检测算法仍有待研究。

25

发明内容

本发明旨在至少解决上述技术问题之一。

为此，本发明的目的是提出一种大规模多天线系统中多用户信号的检测方法，在 **BS** 侧利用已有的信道状态信息（以下简称 **CSI**）对多个用户的信号进行检测和分离，在检测
30 过程中计算来自各个用户信号中每比特的对数似然信息（以下简称 **LLR**），并根据该对数似然信息进行迭代译码，在较低的计算复杂度下保证一定的误码率性能。

为了实现上述目的，本发明提出的大规模多天线系统中多用户信号的检测方法，包括

以下步骤:

建立所述大规模多天线系统中的多用户信号检测的等效线性方程组模型;

通过 Lanczos 算法对所述等效线性方程组模型进行求解, 以获取所述大规模多天线系统的 t 时刻的天线发送信号的估计值, 其中, 所述 t 时刻的天线发送信号的估计值包括与 K 个用户信号分别对应的 K 个比特序列, $t \in 1:T_N$, T_N 为时隙数量, K 为正整数;

分别获取与所述 K 个用户信号分别对应的 K 个比特序列中每个比特的对数似然比, 以得到与所述 K 个用户信号分别对应的 K 个对数似然比序列;

对所述 K 个对数似然比进行解交织和信道译码, 以得到 t 时刻 K 个用户发射的比特序列的检测结果。

10 在本发明的一个实施例中, 建立所述大规模多天线系统中的多用户信号检测的等效线性方程组模型包括:

通过以下公式获取所述大规模多天线系统的基站在所述 t 时刻接收到的信号向量的匹配滤波向量 $\mathbf{y}_t^{MF}$:

$$\mathbf{y}_t^{MF} = \mathbf{H}_t^H \mathbf{y}_t, \text{ 其中, } \mathbf{H}_t^H \text{ 为所述大规模多天线系统的 } t \text{ 时刻的上行信道矩阵 } \mathbf{H}_t \text{ 的共轭}$$

15 转置, $\mathbf{y}_t$ 为所述基站在 t 时刻接收到的信号向量;

通过以下公式获取所述上行信道矩阵 $\mathbf{H}_t^H$ 的 Gram 矩阵 $\mathbf{G}_t$:

$$\mathbf{G}_t = \mathbf{H}_t^H \mathbf{H}_t + \frac{1}{\rho} \mathbf{I}_K, \text{ 其中, } \rho \text{ 为所述基站的接收信号的信噪比, } \mathbf{I}_K \text{ 为 } K \text{ 阶单位矩阵;}$$

基于以下公式建立所述大规模多天线系统中的多用户信号检测的等效线性方程组模型:

$$\mathbf{G}_t \hat{\mathbf{x}}_t = \mathbf{y}_t^{MF}, \text{ 其中, } \hat{\mathbf{x}}_t \text{ 为 } t \text{ 时刻的天线发送信号的估计值。}$$

在本发明的一个实施例中, 通过 Lanczos 算法对所述等效线性方程组模型进行求解包括:

S1、根据所述等效线性方程组模型基于所述 Lanczos 算法获取与所述 Gram 矩阵 $\mathbf{G}_t$ 的相关列正交矩阵 $\mathbf{Q}$ 和对称三对角矩阵 $\mathbf{T}$;

25 S2、根据所述对称三对角矩阵 $\mathbf{T}$ 获取所述 t 时刻的天线发送信号的估计值 $\hat{\mathbf{x}}_t$ 在所述列正交矩阵 $\mathbf{Q}$ 的各列张成的线性子空间中的坐标向量 $\mathbf{z}$;

S3、根据所述列正交矩阵 $\mathbf{Q}$ 和所述坐标向量 $\mathbf{z}$ 计算所述 t 时刻的天线发送信号的估计值 $\hat{\mathbf{x}}_t$ 。

在本发明的一个实施例中，所述 S1 具体包括：

S11、初始化过程：确定所述 $\hat{\mathbf{x}}_t$ 的初始值 $\hat{\mathbf{x}}_{t,0} = \mathbf{0}$ ，并根据所述 $\hat{\mathbf{x}}_t$ 的初始值 $\hat{\mathbf{x}}_{t,0}$ 计算所述等效线性方程组模型的初始余向量 $\mathbf{r}_0 = \mathbf{y}_t^{MF}$ ，根据所述初始余向量 $\mathbf{r}_0$ 确定所述列正交矩阵 $\mathbf{Q}$ 和所述对称三对角矩阵 $\mathbf{T}$ 的初始值，其中，所述列正交矩阵 $\mathbf{Q}$ 的初始值中第零列和
 5 第一列分别为 $\mathbf{q}_0 = \mathbf{0}$ 和 $\mathbf{q}_1 = \frac{\mathbf{r}_0}{\beta}$ ， β 为所述初始余向量 $\mathbf{r}_0$ 的模， $\beta = \|\mathbf{r}_0\|_2$ ，所述对称三对角矩阵 $\mathbf{T}$ 的初始值中第一个主对角元为 $\alpha_1 = \mathbf{q}_1^H \mathbf{G}_t \mathbf{q}_1$ ，其中， $\mathbf{q}_1^H$ 表示 $\mathbf{q}_1$ 的共轭转置，第零个次对角元为 $\theta_0 = 0$ ；

S12、迭代过程：

A、计算在第 p 次迭代时所述等效线性方程组模型的余向量： $\mathbf{r}_p = \mathbf{G}_t \mathbf{q}_p - \alpha_p \mathbf{q}_p - \theta_{p-1} \mathbf{q}_{p-1}$ ；

10 B、计算在第 p 次迭代时对称三对角矩阵 $\mathbf{T}_{p+1}$ 的第 $p+1$ 行上的次对角元： $\theta_p = \|\mathbf{r}_p\|_2$ ；

C、判断 θ_p 是否等于 0；

D、若 $\theta_p = 0$ ，则停止迭代，并令 $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_p$ ， $\mathbf{T} = \mathbf{T}_p$ ；

E、若 $\theta_p \neq 0$ ，则执行 F-H；

F、计算在第 p 次迭代时列正交矩阵 $\mathbf{Q}_{p+1}$ 的第 $p+1$ 列为： $\mathbf{q}_{p+1} = \frac{\mathbf{r}_p}{\|\mathbf{r}_p\|_2}$ ，并得到列正交

15 矩阵 $\mathbf{Q}_{p+1} = [\mathbf{Q}_p, \mathbf{q}_{p+1}]$ ；

G、根据所述列正交矩阵 $\mathbf{Q}_{p+1}$ 的第 $p+1$ 列 $\mathbf{q}_{p+1}$ 计算在第 p 次迭代时对称三对角矩阵 $\mathbf{T}_{p+1}$ 的第 $p+1$ 行上的主对角元： $\alpha_{p+1} = \mathbf{q}_{p+1}^H \mathbf{G}_t \mathbf{q}_{p+1}$ ，其中 $\mathbf{q}_{p+1}^H$ 表示 $\mathbf{q}_{p+1}$ 的共轭转置，并得到对称

$$\text{三对角矩阵 } \mathbf{T}_{p+1} = \begin{bmatrix} & & & 0 \\ & \mathbf{T}_p & & \vdots \\ & & & \theta_p \\ 0 & \cdots & \theta_p & \alpha_{p+1} \end{bmatrix};$$

H、按照预设步长更新迭代变量 p ， $p \in (1 \dots P')$ ， P' 为预设迭代次数；

20 I、若更新后的迭代变量大于预设迭代次数 P' ，停止迭代，并令 $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_p$ ， $\mathbf{T} = \mathbf{T}_p$ ，若更新后的迭代变量不大于预设迭代次数 P' ，并重复迭代过程 A-H，直至迭代变量大于预设迭代次数 P' 。

在本发明的一个实施例中，所述 S2 具体包括：

S21、对所述对称三对角矩阵 T 进行 LU 分解，以得到所述对称三对角矩阵 T 的下双对角矩阵 L 和上双角矩阵 U ；

5 S22、根据所述下双对角矩阵 L 和所述上双角矩阵 U 获取所述 t 时刻的天线发送信号的估计值 $\hat{\mathbf{x}}_t$ 在所述列正交矩阵 Q 的各列张成的线性子空间中的坐标向量 $\mathbf{z}$ 。

在本发明的一个实施例中，所述 S21 具体包括：

根据所述对称三对角矩阵 T 分别确定所述上双角矩阵 U 的第一行第一列的元素 $U_{1,1} = T_{1,1}$ 和第一行第二列的元素 $U_{1,2} = T_{1,2}$ ；

10 根据所述对称三对角矩阵 T 、所述上双角矩阵 U 的第一行第一列的元素 $U_{1,1}$ 和第一行第二列的元素 $U_{1,2}$ 确定所述下双对角矩阵 L 和所述上双角矩阵 U ，其中，

所述下双对角矩阵 L 中对角元素为 1，第 m 行第 $m-1$ 列的元素 $L_{m,m-1} = \frac{T_{m,m-1}}{U_{m-1,m-1}}$ ，其

他元素为 0，所述上双角矩阵 U 中对角元素 $U_{m,m} = T_{m,m} - L_{m,m-1}U_{m-1,m}$ ，第 $i-1$ 行第 i 列的元素 $U_{m-1,m} = T_{m-1,m} - L_{m-1,m-2}U_{m-2,m-1}$ ，其他元素为 0， $m = 2, \dots, P$ ， $i = 3, \dots, P$ ， P 为在所述迭代过程 S12 中的迭代次数。

15 在本发明的一个实施例中，所述 S22 具体包括：

根据所述上双角矩阵 U 定义中间变量 $\mathbf{b}$ ，其中， $\mathbf{b} = \mathbf{U}\mathbf{z}$ ；

根据所述下双对角矩阵 L 对公式 $\mathbf{L}\mathbf{b} = \beta\mathbf{e}_1$ 求解，以获取所述中间变量 $\mathbf{b}$ ，

$$b_i = \begin{cases} \beta / L_{i,i}, & i = 1 \\ -\frac{L_{i,i-1}b_{i-1}}{L_{i,i}}, & i = 2, \dots, P \end{cases} \quad \text{其中，} P \text{ 为在所述迭代过程 S12 中的迭代次数，} \mathbf{e}_1 \text{ 的第一个元}$$

素为 1，其他元素均为 0；

20 根据所述中间变量 $\mathbf{b}$ 和所述上双对角矩阵 U 获取所述坐标向量 $\mathbf{z}$ ，其中，

$$z_i = \begin{cases} b_i / U_{i,i}, & i = P \\ \frac{(b_i - U_{i,i+1}z_{i+1})}{U_{i,i}}, & i = P-1, \dots, 1 \end{cases}, \quad z_i \text{ 为所述坐标向量 } \mathbf{z} \text{ 的第 } i \text{ 个元素，其中，} P \text{ 为在所述}$$

迭代过程 S12 中的迭代次数。

在本发明的一个实施例中，所述 S3 包括：

25 通过以下公式将所述列正交矩阵 Q 的各列按照所述坐标向量 $\mathbf{z}$ 的各个元素进行线性组合，以得到所述 t 时刻的天线发射信号的估计值 $\hat{\mathbf{x}}_t$ ：

$$\hat{\mathbf{x}}_t = \mathbf{Q}\mathbf{z}。$$

在本发明的一个实施例中，分别获取与所述 K 个用户信号分别对应的 K 个比特序列中每个比特的对数似然比包括：

- 根据所述列正交矩阵 $\mathbf{Q}$ 、所述对称三对角 $\mathbf{T}$ 和所述上行信道矩阵 $\mathbf{H}_t$ 计算所述大规模多
 5 天线系统中天线发射信号与天线发射信号的估计值 $\hat{\mathbf{x}}_t$ 之间的等效信道增益矩阵 $\mathbf{B}$ 和所述 K
 个用户信号的等效接收噪声 $\tilde{\mathbf{w}}_t$ ，其中， $\mathbf{B} = \mathbf{Q}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{Q}^H\mathbf{H}_t^H\mathbf{H}_t$ ， $\tilde{\mathbf{w}}_t = \mathbf{Q}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{Q}^H\mathbf{H}_t^H\mathbf{w}_t$ ， $\mathbf{T}^{-1}$ 为所
 述对称三对角 $\mathbf{T}$ 的逆，并计算所述等效接收噪声 $\tilde{\mathbf{w}}_t$ 的协方差矩阵 Θ ，其中，
 $\Theta = \mathbf{Q}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{Q}^H\mathbf{H}_t^H\mathbf{H}_t\mathbf{Q}(\mathbf{T}^{-1})^H\mathbf{Q}^H$ ；

- 根据所述等效信道增益矩阵 $\mathbf{B}$ 分别获取所述 K 个用户信号中每个用户信号收到其他用
 10 户信号的干扰强度，以得到与所述 K 个用户信号分别对应的 K 个干扰强度，并根据所述协
 方差矩阵 Θ 分别获取所述 K 个用户信号中每个用户信号在被基站接收时基站接收到的噪声
 强度，以得到与所述 K 个用户信号分别对应的 K 个噪声强度；

根据所述等效信道增益矩阵 $\mathbf{B}$ 、所述 K 个干扰强度和 K 个噪声强度基于以下公式计算
 所述与所述 K 个用户信号分别对应的 K 个比特序列中每个比特的对数似然比：

$$15 \quad L_{k,b} = \frac{\mu_k^2}{v_k^2} \left(\min_{a \in \mathcal{X}_b^0} \left| \frac{\hat{x}_{t,k}}{\mu_k} - a \right|^2 - \min_{a' \in \mathcal{X}_b^1} \left| \frac{\hat{x}_{t,k}}{\mu_k} - a' \right|^2 \right), \quad 1 \leq k \leq K, \quad 1 \leq b \leq B,$$

- 其中， $L_{k,b}$ 为第 k 个用户信号 $x_{t,k}$ 对应的比特序列中第 b 个比特的对数似然比， B 为每
 个比特序列中包含的比特数量， $\mu_k = B_{k,k}$ 为第 k 个用户的等效信道增益矩阵， $\hat{x}_{t,k}$ 为第 k 个
 用户信号的估计值， $\mathcal{X}_b^0$ 为第 b 个比特为 0 的所有可用符号的集合， $\mathcal{X}_b^1$ 为第 b 个比特为 1
 的所有可用符号的集合， a 和 a' 分别为 $\mathcal{X}_b^0$ 和 $\mathcal{X}_b^1$ 中的符号， $v_k^2 = \mathbf{I}n_k + N_k$ ，其中，
 20 $\mathbf{I}n_k = \sum_{u, u \neq k} |B_{k,u}|^2 E_s$ 为与第 k 个用户信号对应的干扰强度， $N_k = \Theta_{k,k} N_0$ 为与第 k 个用户信
 号对应的噪声强度， N_0 为通过谱分析技术估计得到的噪声功率谱密度。

在本发明的一个实施例中，其中，通过以下步骤对公式 $\mathbf{L}\mathbf{U}\mathbf{a}_c = \mathbf{e}_c, 1 \leq c \leq P$ 求解以获取
 所述对称三对角矩阵 $\mathbf{T}$ 的逆矩阵 $\mathbf{T}^{-1}$ 的每一列：

定义中间变量 $\mathbf{g}$ ， $\mathbf{g} = \mathbf{U}\mathbf{a}_c$ ，以将所述公式 $\mathbf{L}\mathbf{U}\mathbf{a}_c = \mathbf{e}_c$ 简化为 $\mathbf{L}\mathbf{g} = \mathbf{e}_c$ 其中， $\mathbf{a}_c$ 为所述矩

阵 $\mathbf{T}^{-1}$ 的第 c 列, $\mathbf{e}_c \in \mathbb{C}^{P \times 1}$, $\mathbf{e}_c$ 中第 c 个元素为 1, 其余元素为 0;

$$\text{对公式 } \mathbf{L}\mathbf{g} = \mathbf{e}_c \text{ 求解, 以得到 } \mathbf{g}, \quad g_l = \begin{cases} e_{c,l} / L_{l,l}, & l=1 \\ \frac{e_{c,l} - L_{l,l-1}g_{l-1}}{L_{l,l}}, & l=2, \dots, P \end{cases},$$

其中, g_l 为 $\mathbf{g}$ 的第 l 个元素, $e_{c,l}$ 为 $\mathbf{e}_c$ 的第 l 个元素, $L_{l,l}$ 为所述下双对角矩阵 $\mathbf{L}$ 的第 l 个对角元,;

5 根据所述 $\mathbf{g}$ 和所述上双对角矩阵 $\mathbf{U}$ 求解所述 $\mathbf{a}_c$,

$$a_{c,n} = \begin{cases} g_n / U_{n,n}, & n=P \\ \frac{(g_n - U_{n,n+1}a_{c,n+1})}{U_{n,n}}, & n=P-1, \dots, 1 \end{cases}, \text{ 其中, } a_{c,n} \text{ 为 } \mathbf{a}_c \text{ 的第 } n \text{ 个元素, } g_n \text{ 为 } \mathbf{g} \text{ 的第 } n \text{ 个}$$

元素, $U_{n,n}$ 为所述上双角矩阵 $\mathbf{U}$ 的第 n 个对角元。

在本发明的一个实施例中, 该方法可包括以下步骤:

(1) 设大规模多天线系统中的基站天线数为 N , 用户数为 K , 每个用户配置一根天线,

10 则大规模多天线系统的上行信道矩阵为 $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N \times K}$, 其中 $\mathbb{C}$ 代表复数域。 K 个用户在 T_N 个时隙内的用户发射信号为 $\mathbf{S} \in \mathbb{C}^{K \times RT_N}$, 其中 R 为用户信号编码的码率, 发射信号 $\mathbf{S}$ 经过信道编码、交织和符号映射后, 得到天线发射信号, 记为 $\mathbf{X} \in \mathbb{C}^{K \times T_N}$, 天线发射信号的功率为 $\mathbb{E}(|x_{ij}|^2) = E_s$ 。天线发射信号 $\mathbf{X}$ 通过用户的天线发射, 经过信道后, 基站的 N 根天线得到

基站接收信号, 记为 $\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{W}$, 其中, $\mathbf{W}$ 表示基站接收信号中的加性高斯白噪声,

15 $\mathbf{W} \in \mathbb{C}^{N \times T_N}$, 矩阵 $\mathbf{W}$ 中的元素为 $w_{ij} \stackrel{i.i.d}{\sim} \mathcal{CN}(0, N_0)$, N_0 为通过谱分析技术估计得到的噪声功率谱密度, 基站接收信号的信噪比为 $\rho = \frac{KE_s}{N_0}$;

(2) 计算上述基站接收信号的匹配滤波向量 $\mathbf{y}_t^{MF}$, $\mathbf{y}_t^{MF} = \mathbf{H}_t^H \mathbf{y}_t$, 其中 $\mathbf{H}_t^H$ 为 T_N 个时隙内时刻 t 的上行信道矩阵 $\mathbf{H}_t$ 的共轭转置, $\mathbf{y}_t$ 为上述基站接收信号 $\mathbf{Y}$ 中的第 t 列, 表示基站在时刻 t 接收到的信号向量;

20 (3) 计算上述大规模多天线系统的上行信道矩阵 $\mathbf{H}_t^H$ 的 Gram 矩阵 $\mathbf{G}_t$,

$$\mathbf{G}_t = \mathbf{H}_t^H \mathbf{H}_t + \frac{1}{\rho} \mathbf{I}_K, \text{ 其中 } \rho \text{ 为基站的接收信号的信噪比, } \rho = \frac{KE_s}{N_0}, \mathbf{I}_K \text{ 为 } K \text{ 阶单位矩阵;}$$

(4) 用 Lanczos 过程, 计算得到与上述 $\mathbf{G}_t$ 相关的列正交矩阵 $\mathbf{Q}$ 和对称三对角矩阵 $\mathbf{T}$, 具体过程如下:

(4-1) 计算在时刻 t 上述基站接收信号 $\mathbf{y}_t$ 的最小均方误差均衡矩阵 $\mathbf{C}_t$,

$\mathbf{C}_t = (\mathbf{H}_t^H \mathbf{H}_t + \frac{1}{\rho} \mathbf{I}_K)^{-1} \mathbf{H}_t^H$, 用该最小均方误差均衡矩阵 $\mathbf{C}_t$ 对 $\mathbf{y}_t$ 进行滤波, 得到时刻 t 的天

5 线发射信号 $\mathbf{x}_t$ 的估计值 $\hat{\mathbf{x}}_t$, $\hat{\mathbf{x}}_t = \mathbf{C}_t \mathbf{y}_t$;

(4-2) 建立一个大规模多天线系统中检测的等效线性方程组模型 $\mathbf{G}_t \hat{\mathbf{x}}_t = \mathbf{y}_t^{MF}$, 采用 Lanczos 过程, 求解等效线性方程组模型, 得到时刻 t 的天线发射信号 $\mathbf{x}_t$ 的估计值 $\hat{\mathbf{x}}_t$, 具体步骤如下;

(4-2-1) 初始化: 设迭代次数阈值 P' , 设估计值 $\hat{\mathbf{x}}_t$ 的初始值为 $\hat{\mathbf{x}}_{t,0} = \mathbf{0}$, 则上述模型

10 $\mathbf{G}_t \hat{\mathbf{x}}_t = \mathbf{y}_t^{MF}$ 的初始余向量为 $\mathbf{r}_0$, $\mathbf{r}_0 = \mathbf{y}_t^{MF}$, 余向量 $\mathbf{r}_0$ 的模为 β , $\beta = \|\mathbf{r}_0\|_2$, 建立一个列正交

矩阵 $\mathbf{Q}$, 初始化时, 列正交矩阵 $\mathbf{Q}$ 的第零列和第一列分别为 $\mathbf{q}_0 = \mathbf{0}$ 和 $\mathbf{q}_1 = \frac{\mathbf{r}_0}{\beta}$, 建立一个对

称三对角矩阵 $\mathbf{T}$, 初始化时, 对称三对角矩阵 $\mathbf{T}$ 的第一个主对角元为 α_1 , $\alpha_1 = \mathbf{q}_1^H \mathbf{G}_t \mathbf{q}_1$, 其

中 $\mathbf{q}_1^H$ 表示 $\mathbf{q}_1$ 的共轭转置, 第零个次对角元为 $\theta_0 = 0$, 第一次迭代中的列正交矩阵 $\mathbf{Q}_1 = [\mathbf{q}_1]$,

第一次迭代中的对称三对角矩阵 $\mathbf{T}_1 = [\alpha_1]$, 设置迭代变量 $p = 1$;

15 (4-2-2) 经过 p 次迭代后, 得到上述模型的余向量 $\mathbf{r}_p$, $\mathbf{r}_p = \mathbf{G}_t \mathbf{q}_p - \alpha_p \mathbf{q}_p - \theta_{p-1} \mathbf{q}_{p-1}$,

并根据该余向量, 计算第 p 次迭代时得到的对称三对角矩阵 $\mathbf{T}_{p+1}$ 的第 $p+1$ 行上的次对角元

$\theta_p = \|\mathbf{r}_p\|_2$, 对 θ_p 进行判断, 若 $\theta_p = 0$, 则判定 Lanczos 过程发生良性中断, 停止迭代, 并

令 $P = p$, $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_p$, $\mathbf{T} = \mathbf{T}_p$, 进行步骤(5), 若 $\theta_p \neq 0$, 则依次进行步骤(4-2-3)-步骤(4-2-6);

(4-2-3) 根据上述 p 次迭代后的模型余向量 $\mathbf{r}_p$, 计算第 p 次迭代时得到的列正交矩阵

20 $\mathbf{Q}_{p+1}$ 的第 $p+1$ 列: $\mathbf{q}_{p+1} = \frac{\mathbf{r}_p}{\|\mathbf{r}_p\|_2}$;

(4-2-4) 根据上述列正交矩阵 $\mathbf{Q}_{p+1}$ 的第 $p+1$ 列 $\mathbf{q}_{p+1}$, 计算对称三对角矩阵 $\mathbf{T}_{p+1}$ 在第

$p+1$ 行上的主对角元: $\alpha_{p+1} = \mathbf{q}_{p+1}^H \mathbf{G}_t \mathbf{q}_{p+1}$, 其中 $\mathbf{q}_{p+1}^H$ 表示 $\mathbf{q}_{p+1}$ 的共轭转置;

(4-2-5) 根据步骤 (4-2-2)、步骤 (4-2-3) 和步骤 (4-2-4) 的计算结果, 分别更新

上述列正交矩阵和对称三对角矩阵为: $\mathbf{Q}_{p+1} = [\mathbf{Q}_p, \mathbf{q}_{p+1}]$, $\mathbf{T}_{p+1} = \begin{bmatrix} & & 0 \\ & \mathbf{T}_p & \vdots \\ & & \theta_p \\ 0 & \cdots & \theta_p & \alpha_{p+1} \end{bmatrix}$;

(4-2-6) 更新迭代变量使 $p = p + 1$, 根据上述迭代阈值 P' 对迭代变量 p 进行判断, 若 $p > P'$, 则停止迭代, 并使 $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_p$, $\mathbf{T} = \mathbf{T}_p$, 进行步骤 (5), 若 $p \leq P'$, 则进行步骤 (4-2-2);

5 (5) 对上述步骤 (4) 得到的对称三对角矩阵 $\mathbf{T}$ 进行 LU 分解, 得到对称三对角矩阵 $\mathbf{T}$ 的下双对角矩阵 $\mathbf{L}$ 和上双角矩阵 $\mathbf{U}$, 具体过程如下:

(5-1) 建立对称三对角矩阵 $\mathbf{T}$ 的下双对角矩阵 $\mathbf{L}$ 和上双角矩阵 $\mathbf{U}$, 对 $\mathbf{L}$ 和 $\mathbf{U}$ 进行初始化, 使得 $\mathbf{L} = \mathbf{I}_p$, $\mathbf{U} = \mathbf{I}_p$, 使 $\mathbf{U}$ 的第一行第一列的元素为 $U_{1,1} = T_{1,1}$, $\mathbf{U}$ 的第一行第二列的元素为 $U_{1,2} = T_{1,2}$, 设置迭代阈值 M , 使 $M = P$, 从迭代变量为 $m = 2$ 开始迭代;

10 (5-2) 根据步骤 (4) 得到的对称三对角矩阵 $\mathbf{T}$, 以及第 $m-1$ 次迭代得到的下双对角矩阵 $\mathbf{L}$ 和上双角矩阵 $\mathbf{U}$, 计算第 m 次迭代得到的下双对角矩阵 $\mathbf{L}$ 的第 m 行第 $m-1$ 列的元素 $L_{m,m-1} = \frac{T_{m,m-1}}{U_{m-1,m-1}}$ 、上双角矩阵 $\mathbf{U}$ 的第 m 行第 m 列的元素 $U_{m,m} = T_{m,m} - L_{m,m-1}U_{m-1,m}$ 和上双角

矩阵 $\mathbf{U}$ 的第 m 行第 $m+1$ 列的元素 $U_{m,m+1} = T_{m,m+1} - L_{m,m-1}U_{m-1,m}$;

(5-3) 使迭代变量 $m = m + 1$, 对迭代变量 m 进行判断, 若 $m < M$, 则进行步骤 (5-2) - 步骤 (5-3), 若 $m \geq M$, 则停止迭代, 进行步骤 (5-4);

(5-4) 根据步骤 (4) 得到的对称三对角矩阵 $\mathbf{T}$, 以及上述第 $M-1$ 次迭代得到的下双对角矩阵 $\mathbf{L}$ 和上双角矩阵 $\mathbf{U}$, 计算得到第 M 次迭代得到的下双对角矩阵 $\mathbf{L}$ 的第 M 行第 $M-1$ 列的元素 $L_{M,M-1} = \frac{T_{M,M-1}}{U_{M-1,M-1}}$ 和上双角矩阵 $\mathbf{U}$ 的第 M 行第 M 列的元素

$$U_{M,M} = T_{M,M} - L_{M,M-1}U_{M-1,M};$$

20 (6) 根据上述步骤 (5) 下双对角矩阵 $\mathbf{L}$ 和上双角矩阵 $\mathbf{U}$, 求解上述天线发射信号 $\mathbf{x}_i$ 的估计值 $\hat{\mathbf{x}}_i$ 在步骤 (4) 的列正交矩阵 $\mathbf{Q}$ 的各列张成的线性子空间中的坐标向量 $\mathbf{z}$, 具体过程如下:

(6-1) 定义一个中间变量 $\mathbf{b}$, $\mathbf{b} = \mathbf{U}\mathbf{z}$, 其中 $\mathbf{U}$ 为上述步骤 (5) 中的上双对角矩阵, $\mathbf{z}$

为上述天线发射信号 $\mathbf{x}_t$ 的估计值 $\hat{\mathbf{x}}_t$ 在步骤 (4) 的列正交矩阵 $\mathbf{Q}$ 的各列张成的线性子空间中的坐标向量;

(6-2) 利用上述步骤 (5) 下双对角矩阵 $\mathbf{L}$, 通过 $\mathbf{L}\mathbf{b} = \beta\mathbf{e}_1$ 求解中间变量 $\mathbf{b}$, β 为上述步骤 (4-2-1) 中的初始余向量 $\mathbf{r}_0$ 的模, $\mathbf{e}_1$ 的第一个元素为 1, 其他元素均为 0, 求解过程

5 为: 对 $\mathbf{b}$ 的第一个元素, 根据下双对角矩阵 $\mathbf{L}$ 的第一个对角元 $L_{1,1}$, 求解 $b_1 = \beta / L_{1,1}$, 对 $\mathbf{b}$ 的第 j 个元素 b_j , $j=2, \dots, P$, 根据 $\mathbf{b}$ 的第 $j-1$ 个元素 b_{j-1} 和下双对角矩阵 $\mathbf{L}$ 的 j 第行上的元素 $L_{j,j-1}$ 和 $L_{j,j}$, 依次求解 $b_j = -\frac{L_{j,j-1}b_{j-1}}{L_{j,j}}$;

(6-3) 根据上述 $\mathbf{b}$ 的第 P 个元素 b_P 和上述上双对角矩阵 $\mathbf{U}$ 的第 P 个对角元 $U_{P,P}$, 求解 $\mathbf{z}$ 的第 P 个元素为 $z_P = b_P / U_{P,P}$, 对 $\mathbf{z}$ 的第 i 个元素 z_i , $i=P-1, \dots, 1$, 根据上述 $\mathbf{b}$ 的第 i 个
10 元素 b_i , $\mathbf{z}$ 的第 $i+1$ 个元素 z_{i+1} 和上双对角矩阵 $\mathbf{U}$ 的第 i 行上的元素对角元 $U_{i,i}$ 和 $U_{i,i+1}$ 依次求解 $\mathbf{z}$ 的第 i 个元素 $z_i = \frac{(b_i - U_{i,i+1}z_{i+1})}{U_{i,i}}$, 其中 P 为上述步骤 (4) 中的迭代阈值;

(7) 将上述列正交矩阵 $\mathbf{Q}$ 的各列按照 $\mathbf{z}$ 的各个元素进行线性组合, 得到上述天线发射信号 $\mathbf{x}_t$ 的估计值 $\hat{\mathbf{x}}_t$, $\hat{\mathbf{x}}_t = \mathbf{Q}\mathbf{z}$;

(8) 根据对数似然比的定义, 分别计算与 $\hat{\mathbf{x}}_t$ 中每一个用户信号的每个比特相对应的对
15 数似然比, 具体过程如下:

(8-1) 利用步骤 (5) 中对称三对角矩阵 $\mathbf{T}$ 的下双对角矩阵 $\mathbf{L}$ 和上双角矩阵 $\mathbf{U}$, 得到对称三对角矩阵 $\mathbf{T}$ 的逆 $\mathbf{T}^{-1}$: $\mathbf{T}^{-1} = [\mathbf{a}_1 \ \dots \ \mathbf{a}_P]$, 其中, 对 $\mathbf{T}^{-1}$ 的第 c 列 $\mathbf{a}_c$, $1 \leq c \leq P$, 通过求解 $\mathbf{L}\mathbf{U}\mathbf{a}_c = \mathbf{e}_c$ 得到, $\mathbf{e}_c \in \mathbb{C}^{P \times 1}$ 且除第 c 个元素为 1 外, 其余元素都为 0, 具体过程如下:

(8-1-1) 定义一个中间变量 $\mathbf{g}$, $\mathbf{g} = \mathbf{U}\mathbf{a}_c$, 其中 $\mathbf{U}$ 为上述步骤 (5) 中的上双对角矩阵,
20 $\mathbf{a}_c$ 为对称三对角矩阵 $\mathbf{T}$ 的逆 $\mathbf{T}^{-1}$ 中的第 c 列;

(8-1-2) 利用上述步骤 (5) 的下双对角矩阵 $\mathbf{L}$, 通过 $\mathbf{L}\mathbf{g} = \mathbf{e}_c$ 求解中间变量 $\mathbf{g}$, 其中 $\mathbf{e}_c \in \mathbb{C}^{P \times 1}$, $\mathbf{e}_c$ 的值除第 c 个元素为 1 外, 其余元素都为 0, 求解过程为: 对 $\mathbf{g}$ 的第一个元素, 根据下双对角矩阵 $\mathbf{L}$ 的第一个对角元 $L_{1,1}$ 和 $\mathbf{e}_c$ 的第一个元素 $e_{c,1}$, $\mathbf{g}$ 的第一个元素为:

$g_1 = e_{c,1} / L_{1,1}$ ，对 $\mathbf{g}$ 的第 l 个元素 g_l ， $l = 2, \dots, P$ ，根据 $\mathbf{g}$ 的第 $l-1$ 个元素 g_{l-1} 、 $\mathbf{e}_c$ 的第 l 个元素 $e_{c,l}$ 和下双对角矩阵 $\mathbf{L}$ 的第 l 行上的元素 $L_{l,l-1}$ 和 $L_{l,l}$ ，依次求解 $g_l = \frac{e_{c,l} - L_{l,l-1}g_{l-1}}{L_{l,l}}$ ；

(8-1-3) 根据上述 $\mathbf{g}$ 的第 P 个元素 g_P 和上述上双对角矩阵 $\mathbf{U}$ 的第 P 个对角元 $U_{P,P}$ ，

求解 $\mathbf{a}_c$ 的第 P 个元素为 $a_{c,P} = g_P / U_{P,P}$ ，对 $\mathbf{a}_c$ 的第 n 个元素 $a_{c,n}$ ， $n = P-1, \dots, 1$ ，根据上述 $\mathbf{g}$

5 的第 n 个元素 g_n ， $\mathbf{a}_c$ 的第 $n+1$ 个元素 $a_{c,n+1}$ 和上双对角矩阵 $\mathbf{U}$ 的第 n 行上的元素对角元 $U_{n,n}$

和 $U_{n,n+1}$ ，依次求解 $\mathbf{a}_c$ 的第 n 个元素 $a_{c,n} = \frac{(g_n - U_{n,n+1}a_{c,n+1})}{U_{n,n}}$ ，其中 P 为上述步骤 (4) 中的迭

代阈值；

(8-2) 根据上述步骤 (4) 的列正交矩阵 $\mathbf{Q}$ 、对称三对角 $\mathbf{T}$ 和上述步骤 (2) 的时刻 t 的上行信道矩阵 $\mathbf{H}_t$ ，计算大规模多天线系统中各用户信号 $\mathbf{x}_t$ 与用户信号估计值 $\hat{\mathbf{x}}_t$ 之间的等

10 效信道增益矩阵 $\mathbf{B}$ ， $\mathbf{B} = \mathbf{Q}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{Q}^H\mathbf{H}_t^H\mathbf{H}_t$ ，并计算大规模多天线系统中多用户信号的等效接

收噪声 $\tilde{\mathbf{w}}_t$ ， $\tilde{\mathbf{w}}_t = \mathbf{Q}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{Q}^H\mathbf{H}_t^H\mathbf{w}_t$ ，计算 $\tilde{\mathbf{w}}_t$ 的协方差矩阵 Θ ， $\Theta = \mathbf{Q}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{Q}^H\mathbf{H}_t^H\mathbf{H}_t\mathbf{Q}(\mathbf{T}^{-1})^H\mathbf{Q}^H$ ，

其中 $\mathbf{T}^{-1}$ 是 $\mathbf{T}$ 的逆；

(8-3) 根据上述等效信道增益矩阵 $\mathbf{B}$ 和等效噪声的协方差矩阵 Θ ，得到大规模多天线系统中第 k 个用户的等效信道增益 μ_k ， μ_k 为上述等效信道增益矩阵 $\mathbf{B}$ 的第 k 个对角元 $B_{k,k}$ ，

15 计算第 k 个用户信号受到其他用户信号的干扰强度 $\ln_k$ ， $\ln_k = \sum_{u, u \neq k} |B_{k,u}|^2 E_s$ ，计算第 k 个

用户信号在被基站接收时基站接收到的噪声的强度 N_k ， $N_k = \Theta_{k,k} N_0$ ，并得到上述干扰强度

与噪声强度之和 v_k^2 ， $v_k^2 = \ln_k + N_k$ ，其中 $1 \leq k \leq K$ ， u 代表除第 k 个用户外的其他用户；

(8-4) 根据对数似然比的定义，计算每个用户信号中每个比特的对数似然比 $L_{k,b}$ ，

$$L_{k,b} = \frac{\mu_k^2}{v_k^2} \left(\min_{a \in \mathcal{X}_b^0} \left| \frac{\hat{x}_{t,k}}{\mu_k} - a \right|^2 - \min_{a' \in \mathcal{X}_b^1} \left| \frac{\hat{x}_{t,k}}{\mu_k} - a' \right|^2 \right)$$
，其中， $L_{k,b}$ 表示第 k 个用户信号 $x_{t,k}$ 中第 b

20 个比特的对数似然比， $\mathcal{X}_b^0$ 和 $\mathcal{X}_b^1$ 分别表示第 b 个比特为 0 和 1 的所有可用符号的集合， a 和

a' 分别表示 $\mathcal{X}_b^0$ 和 $\mathcal{X}_b^1$ 中的符号；

(9) 对步骤 (8) 中得到的对数似然比进行解交织和信道译码，得到 t 时刻各用户发

射的比特序列的检测结果 $\hat{s}_t$ ，实现对大规模多天线系统中多用户信号的检测。

本发明实施例的大规模多天线系统中多用户信号的检测方法，其优点是，复杂度低（约为 $\mathcal{O}(5IK^2)$ ，其中 I 为迭代次数）；误比特率性能好，能在几步迭代以内就逼近最优 MMSE 检测的误比特率性能。本方法通过 Lanczos 迭代算法求解线性方程组，避免了通过直接对大型矩阵求逆的方式获得 MMSE 均衡矩阵，能大大减少检测的计算复杂度；此外，本检测方法能在较低的复杂度内计算出各个信息比特的 LLR 值作为译码器的输入，能显著提升联合检测译码的性能。在用户数 K ($K < N$) 与基站天线数 N 的比值一定时且二者数目都趋于无穷时，这种复杂度的降低尤为明显，同时误比特率性能能够渐进达到最大似然检测的（最优）性能。

本发明附加的方面和优点将在下面的描述中部分给出，部分将从下面的描述中变得明显，或通过本发明的实践了解到。

附图说明

本发明上述的和/或附加的方面和优点从下面结合附图对实施例的描述中将变得明显和容易理解，其中，

图 1 是根据本发明一个实施例的大规模多天线系统中多用户信号的检测方法的流程图；

图 2 是根据本发明一个实施例的 Massive MIMO 多用户上行传输场景示意图；

图 3 是根据本发明一个实施例的数据处理流程框图。

具体实施方式

下面详细描述本发明的实施例，所述实施例的示例在附图中示出，其中自始至终相同或类似的标号表示相同或类似的元件或具有相同或类似功能的元件。下面通过参考附图描述的实施例是示例性的，仅用于解释本发明，而不能理解为对本发明的限制。相反，本发明的实施例包括落入所附加权利要求书的精神和内涵范围内的所有变化、修改和等同物。

在本发明的描述中，需要理解的是，术语“第一”、“第二”等仅用于描述目的，而不能理解为指示或暗示相对重要性。在本发明的描述中，需要说明的是，除非另有明确的规定和限定，术语“相连”、“连接”应做广义理解，例如，可以是固定连接，也可以是可拆卸连接，或一体地连接；可以是机械连接，也可以是电连接；可以是直接相连，也可以通过中间媒介间接相连。对于本领域的普通技术人员而言，可以根据具体情况理解上述术语在本发明中的具体含义。此外，在本发明的描述中，除非另有说明，“多个”的含义是两个或两个以上。

流程图中或在此以其他方式描述的任何过程或方法描述可以被理解为，表示包括一个或更多个用于实现特定逻辑功能或过程的步骤的可执行指令的代码的模块、片段或部分，并且本发明的优选实施方式的范围包括另外的实现，其中可以不按所示出或讨论的顺序，包括根据所涉及的功能按基本同时的方式或按相反的顺序，来执行功能，这应被本发明的
5 实施例所属技术领域的技术人员所理解。

下面参考附图描述根据本发明实施例的大规模多天线系统中多用户信号的检测方法。

图 1 是根据本发明一个实施例的大规模多天线系统中多用户信号的检测方法的流程图。

如图 1 所示，该大规模多天线系统中多用户信号的检测方法可包括以下步骤。

10 S101，建立大规模多天线系统中的多用户信号检测的等效线性方程组模型。

图 2 是根据本发明一个实施例的 Massive MIMO 多用户上行传输场景示意图。如图 2 所示，大规模多天线系统中的基站可包括多个天线，可分别接收不同用户发射的信号。

设大规模多天线系统中的基站天线数为 N ，用户数为 K ，每个用户配置一根天线，则大规模多天线系统的上行信道矩阵为 $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N \times K}$ ，其中 $\mathbb{C}$ 代表复数域。 K 个用户在 T_N 个时隙

15 内的用户发射信号为 $\mathbf{S} \in \mathbb{C}^{K \times RT_N}$ ，其中 R 为用户信号编码的码率，发射信号 $\mathbf{S}$ 经过信道编码、交织和符号映射后，得到天线发射信号，记为 $\mathbf{X} \in \mathbb{C}^{K \times T_N}$ ，天线发射信号的功率为

$\mathbb{E}(|x_{ij}|^2) = E_s$ 。天线发射信号 $\mathbf{X}$ 通过用户的天线发射，经过信道后，基站的 N 根天线得到

基站接收信号，记为 $\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{W}$ ，其中， $\mathbf{W}$ 表示基站接收信号中的加性高斯白噪声，

$\mathbf{W} \in \mathbb{C}^{N \times T_N}$ ，矩阵 $\mathbf{W}$ 中的元素为 $w_{ij} \stackrel{i.i.d}{\sim} \mathcal{CN}(0, N_0)$ ， N_0 为通过谱分析技术估计得到的噪声功

20 率谱密度，基站接收信号的信噪比为 $\rho = \frac{KE_s}{N_0}$ 。

本在本发明的一个实施例中，建立大规模多天线系统中的多用户信号检测的等效线性方程组模型可包括步骤 S201-S203。

S201，通过以下公式获取大规模多天线系统的基站在 t 时刻接收到的信号向量的匹配滤波向量 $\mathbf{y}_t^{MF}$ ：

25 $\mathbf{y}_t^{MF} = \mathbf{H}_t^H \mathbf{y}_t$ ，其中， $\mathbf{H}_t^H$ 为大规模多天线系统的 t 时刻的上行信道矩阵 $\mathbf{H}_t$ 的共轭转置， $\mathbf{y}_t$ 为基站在 t 时刻接收到的信号向量， $t \in 1:T_N$ 。

S202，通过以下公式获取上行信道矩阵 $\mathbf{H}_t^H$ 的 Gram 矩阵 $\mathbf{G}_t$ ：

$\mathbf{G}_t = \mathbf{H}_t^H \mathbf{H}_t + \frac{1}{\rho} \mathbf{I}_K$, 其中, ρ 为基站的接收信号的信噪比, $\mathbf{I}_K$ 为 K 阶单位矩阵。

S203, 基于以下公式建立大规模多天线系统中的多用户信号检测的等效线性方程组模型:

$\mathbf{G}_t \hat{\mathbf{x}}_t = \mathbf{y}_t^{MF}$, 其中, $\hat{\mathbf{x}}_t$ 为 t 时刻的天线发送信号的估计值。

5 S102, 通过 Lanczos 算法对等效线性方程组模型进行求解, 以获取大规模多天线系统的 t 时刻的天线发送信号的估计值, 其中, t 时刻的天线发送信号的估计值包括与 K 个用户信号分别对应的 K 个比特序列, $t \in 1:T_N$, T_N 为时隙数量, K 为正整数。

在本发明的一个实施例中, 通过 Lanczos 算法对等效线性方程组模型进行求解可包括步骤 S1-S3。

10 S1, 根据等效线性方程组模型基于 Lanczos 算法获取与 Gram 矩阵 $\mathbf{G}_t$ 的相关列正交矩阵 $\mathbf{Q}$ 和对称三对角矩阵 $\mathbf{T}$ 。

更具体地, 步骤 S1 可进一步包括 S11 初始化过程和 S12 迭代过程。

其中, 在本发明的一个实施例中, 在初始化过程 S11 中, 确定 $\hat{\mathbf{x}}_t$ 的初始值 $\hat{\mathbf{x}}_{t,0} = \mathbf{0}$, 并根据 $\hat{\mathbf{x}}_t$ 的初始值 $\hat{\mathbf{x}}_{t,0}$ 计算等效线性方程组模型的初始余向量 $\mathbf{r}_0 = \mathbf{y}_t^{MF}$, 根据初始余向量
15 $\mathbf{r}_0$ 确定列正交矩阵 $\mathbf{Q}$ 和对称三对角矩阵 $\mathbf{T}$ 的初始值, 其中, 列正交矩阵 $\mathbf{Q}$ 的初始值中第零列和第一列分别为 $\mathbf{q}_0 = \mathbf{0}$ 和 $\mathbf{q}_1 = \frac{\mathbf{r}_0}{\beta}$, β 为初始余向量 $\mathbf{r}_0$ 的模, $\beta = \|\mathbf{r}_0\|_2$, 对称三对角矩阵 $\mathbf{T}$ 的初始值中第一个主对角元为 $\alpha_1 = \mathbf{q}_1^H \mathbf{G}_t \mathbf{q}_1$, 其中, $\mathbf{q}_1^H$ 表示 $\mathbf{q}_1$ 的共轭转置, 第零个次对角元为 $\theta_0 = 0$ 。

迭代过程 S12 包括步骤 A-H:

- 20 A、计算在第 p 次迭代时等效线性方程组模型的余向量: $\mathbf{r}_p = \mathbf{G}_t \mathbf{q}_p - \alpha_p \mathbf{q}_p - \theta_{p-1} \mathbf{q}_{p-1}$;
- B、计算在第 p 次迭代时对称三对角矩阵 $\mathbf{T}_{p+1}$ 的第 $p+1$ 行上的次对角元: $\theta_p = \|\mathbf{r}_p\|_2$;
- C、判断 θ_p 是否等于 0;
- D、若 $\theta_p = 0$, 则停止迭代, 并令 $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_p$, $\mathbf{T} = \mathbf{T}_p$;
- E、若 $\theta_p \neq 0$, 则执行 F-H;

F、计算在第 p 次迭代时列正交矩阵 $\mathbf{Q}_{p+1}$ 的第 $p+1$ 列为: $\mathbf{q}_{p+1} = \frac{\mathbf{r}_p}{\|\mathbf{r}_p\|_2}$, 并得到列正交

矩阵 $\mathbf{Q}_{p+1} = [\mathbf{Q}_p, \mathbf{q}_{p+1}]$;

G、根据列正交矩阵 $\mathbf{Q}_{p+1}$ 的第 $p+1$ 列 $\mathbf{q}_{p+1}$ 计算在第 p 次迭代时对称三对角矩阵 $\mathbf{T}_{p+1}$ 的第 $p+1$ 行上的主对角元: $\alpha_{p+1} = \mathbf{q}_{p+1}^H \mathbf{G}_t \mathbf{q}_{p+1}$, 其中 $\mathbf{q}_{p+1}^H$ 表示 $\mathbf{q}_{p+1}$ 的共轭转置, 并得到对称三

$$5 \quad \text{对角矩阵 } \mathbf{T}_{p+1} = \begin{bmatrix} & & 0 \\ & \mathbf{T}_p & \vdots \\ & & \theta_p \\ 0 & \cdots & \theta_p & \alpha_{p+1} \end{bmatrix};$$

H、按照预设步长更新迭代变量 p , $p \in (1 \dots P')$, P' 为预设迭代次数; 其中预设步长为预先设定的, 例如可为 1。

I、若更新后的迭代变量大于预设迭代次数 P' , 停止迭代, 并令 $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_p$, $\mathbf{T} = \mathbf{T}_p$, 若更新后的迭代变量不大于预设迭代次数 P' , 并重复迭代过程 A-H, 直至迭代变量大于预设
10 迭代次数 P' 。

例如, 第一次迭代中列正交矩阵 $\mathbf{Q}_1 = [\mathbf{q}_1]$, 第一次迭代中的对称三对角矩阵 $\mathbf{T}_1 = [\alpha_1]$, 设置迭代变量 $p=1$ 。经过 p 次迭代后, 得到等效线性方程组模型的余向量的余向量 $\mathbf{r}_p$, $\mathbf{r}_p = \mathbf{G}_t \mathbf{q}_p - \alpha_p \mathbf{q}_p - \theta_{p-1} \mathbf{q}_{p-1}$, 并可根据该余向量计算第 p 次迭代时得到的对称三对角矩阵 $\mathbf{T}_{p+1}$ 的第 $p+1$ 行上的次对角元 $\theta_p = \|\mathbf{r}_p\|_2$, 对 θ_p 进行判断, 若 $\theta_p = 0$, 则判定 Lanczos 过程
15 发生良性中断, 停止迭代, 并记录迭代次数 $P = p$, 并令 $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_p$, $\mathbf{T} = \mathbf{T}_p$; 若 $\theta_p \neq 0$, 则依次执行 F-H, 执行完步骤 H 后 (对 p 进行更新, 如令 $p = p+1$), 判断更新后的 p 是否大于预设迭代次数 P' , 如果否, 则继续迭代, 如果是, 则停止迭代, 并将得到的 $\mathbf{Q}_p$ 和 $\mathbf{T}_p$ 分别作为与 Gram 矩阵 $\mathbf{G}_t$ 的相关列正交矩阵 $\mathbf{Q}$ 和对称三对角矩阵 $\mathbf{T}$ 。

S2, 根据对称三对角矩阵 $\mathbf{T}$ 获取 t 时刻的天线发送信号的估计值 $\hat{\mathbf{x}}_t$ 在列正交矩阵 $\mathbf{Q}$
20 的各列张成的线性子空间中的坐标向量 $\mathbf{z}$ 。

在本发明的一个实施例中, S2 具体包括: S21、对对称三对角矩阵 $\mathbf{T}$ 进行 LU 分解, 以得到对称三对角矩阵 $\mathbf{T}$ 的下双对角矩阵 $\mathbf{L}$ 和上双角矩阵 $\mathbf{U}$; S22、根据下双对角矩阵 $\mathbf{L}$ 和上双角矩阵 $\mathbf{U}$ 获取 t 时刻的天线发送信号的估计值 $\hat{\mathbf{x}}_t$ 在列正交矩阵 $\mathbf{Q}$ 的各列张成的线

性子空间中的坐标向量 $\mathbf{z}$ 。

在本发明的一个实施例中，S21 具体包括：根据对称三对角矩阵 $\mathbf{T}$ 分别确定上双角矩阵 $\mathbf{U}$ 的第一行第一列的元素 $U_{1,1} = T_{1,1}$ 和第一行第二列的元素 $U_{1,2} = T_{1,2}$ ；根据对称三对角矩阵 $\mathbf{T}$ 、上双角矩阵 $\mathbf{U}$ 的第一行第一列的元素 $U_{1,1}$ 和第一行第二列的元素 $U_{1,2}$ 确定下双对角矩阵 $\mathbf{L}$ 和上双角矩阵 $\mathbf{U}$ 。其中，下双对角矩阵 $\mathbf{L}$ 中对角元素为 1，第 m 行第 $m-1$ 列的元素 $L_{m,m-1} = \frac{T_{m,m-1}}{U_{m-1,m-1}}$ ，其他元素为 0，上双角矩阵 $\mathbf{U}$ 中对角元素 $U_{m,m} = T_{m,m} - L_{m,m-1}U_{m-1,m}$ ，第 $i-1$ 行第 i 列的元素 $U_{m-1,m} = T_{m-1,m} - L_{m-1,m-2}U_{m-2,m-1}$ ，其他元素为 0， $m = 2, \dots, P$ ， $i = 3, \dots, P$ ， P 为在迭代过程 S12 中的迭代次数。

在本发明的一个实施例中，S22 具体包括：

根据上双角矩阵 $\mathbf{U}$ 定义中间变量 $\mathbf{b}$ ，其中， $\mathbf{b} = \mathbf{U}\mathbf{z}$ ；

根据下双对角矩阵 $\mathbf{L}$ 对公式 $\mathbf{L}\mathbf{b} = \beta\mathbf{e}_1$ 求解，以获取中间变量 $\mathbf{b}$ ，

$$b_i = \begin{cases} \beta / L_{i,i}, & i = 1 \\ -\frac{L_{i,i-1}b_{i-1}}{L_{i,i}}, & i = 2, \dots, P \end{cases} \quad \text{其中, } P \text{ 为在迭代过程 S12 中的迭代次数, } \mathbf{e}_1 \text{ 的第一个元素为 1,}$$

其他元素均为 0；

根据中间变量 $\mathbf{b}$ 和上双对角矩阵 $\mathbf{U}$ 获取坐标向量 $\mathbf{z}$ ，其中，

$$z_i = \begin{cases} b_i / U_{i,i}, & i = P \\ \frac{(b_i - U_{i,i+1}z_{i+1})}{U_{i,i}}, & i = P-1, \dots, 1 \end{cases}, \quad z_i \text{ 为坐标向量 } \mathbf{z} \text{ 的第 } i \text{ 个元素, 其中, } P \text{ 为在迭代过程}$$

S12 中的迭代次数。

S3，根据列正交矩阵 $\mathbf{Q}$ 和坐标向量 $\mathbf{z}$ 计算 t 时刻的天线发送信号的估计值 $\hat{\mathbf{x}}_t$ 。

在本发明的一个实施例中，S3 包括：通过以下公式将列正交矩阵 $\mathbf{Q}$ 的各列按照坐标向量 $\mathbf{z}$ 的各个元素进行线性组合，以得到 t 时刻的天线发射信号的估计值 $\hat{\mathbf{x}}_t$ ： $\hat{\mathbf{x}}_t = \mathbf{Q}\mathbf{z}$ 。

S103，分别获取与 K 个用户信号分别对应的 K 个比特序列中每个比特的对数似然比，以得到与 K 个用户信号分别对应的 K 个对数似然比序列。

具体地，分别获取与 K 个用户信号分别对应的 K 个比特序列中每个比特的对数似然比可包括步骤 S301-S303。

S301，根据列正交矩阵 $\mathbf{Q}$ 、对称三对角 $\mathbf{T}$ 和上行信道矩阵 $\mathbf{H}_t$ 计算大规模多天线系统中天线发射信号与天线发射信号的估计值 $\hat{\mathbf{x}}_t$ 之间的等效信道增益矩阵 $\mathbf{B}$ 和 K 个用户信号的等

效接收噪声 $\tilde{\mathbf{w}}_t$ ，其中， $\mathbf{B} = \mathbf{Q}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{Q}^H\mathbf{H}_t^H\mathbf{H}_t$ ， $\tilde{\mathbf{w}}_t = \mathbf{Q}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{Q}^H\mathbf{H}_t^H\mathbf{w}_t$ ， $\mathbf{T}^{-1}$ 为对称三对角 $\mathbf{T}$ 的逆，并计算等效接收噪声 $\tilde{\mathbf{w}}_t$ 的协方差矩阵 $\mathbf{\Theta}$ ，其中， $\mathbf{\Theta} = \mathbf{Q}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{Q}^H\mathbf{H}_t^H\mathbf{H}_t\mathbf{Q}(\mathbf{T}^{-1})^H\mathbf{Q}^H$ 。

其中，通过以下步骤对公式 $\mathbf{L}\mathbf{U}\mathbf{a}_c = \mathbf{e}_c, 1 \leq c \leq P$ 求解以获取对称三对角矩阵 $\mathbf{T}$ 的逆矩阵 $\mathbf{T}^{-1}$ 的每一列：

- 5 定义中间变量 $\mathbf{g}$ ， $\mathbf{g} = \mathbf{U}\mathbf{a}_c$ ，以将公式 $\mathbf{L}\mathbf{U}\mathbf{a}_c = \mathbf{e}_c$ 简化为 $\mathbf{L}\mathbf{g} = \mathbf{e}_c$ 其中， $\mathbf{a}_c$ 为矩阵 $\mathbf{T}^{-1}$ 的第 c 列， $\mathbf{e}_c \in \mathbb{C}^{P \times 1}$ ， $\mathbf{e}_c$ 中第 c 个元素为 1，其余元素为 0；

$$\text{对公式 } \mathbf{L}\mathbf{g} = \mathbf{e}_c \text{ 求解，以得到 } \mathbf{g}, g_l = \begin{cases} e_{c,l} / L_{l,l}, & l = 1 \\ \frac{e_{c,l} - L_{l,l-1}g_{l-1}}{L_{l,l}}, & l = 2, \dots, P \end{cases},$$

其中， g_l 为 $\mathbf{g}$ 的第 l 个元素， $e_{c,l}$ 为 $\mathbf{e}_c$ 的第 l 个元素， $L_{l,l}$ 为下双对角矩阵 $\mathbf{L}$ 的第 l 个对角元，；

$$10 \quad \text{根据 } \mathbf{g} \text{ 和上双对角矩阵 } \mathbf{U} \text{ 求解 } \mathbf{a}_c, a_{c,n} = \begin{cases} g_n / U_{n,n}, & n = P \\ \frac{(g_n - U_{n,n+1}a_{c,n+1})}{U_{n,n}}, & n = P-1, \dots, 1 \end{cases}, \text{ 其中, } a_{c,n}$$

为 $\mathbf{a}_c$ 的第 n 个元素， g_n 为 $\mathbf{g}$ 的第 n 个元素， $U_{n,n}$ 为上双角矩阵 $\mathbf{U}$ 的第 n 个对角元。

- S302，根据等效信道增益矩阵 $\mathbf{B}$ 分别获取 K 个用户信号中每个用户信号收到其他用户信号的干扰强度，以得到与 K 个用户信号分别对应的 K 个干扰强度，并根据协方差矩阵 $\mathbf{\Theta}$ 分别获取 K 个用户信号中每个用户信号在被基站接收时基站接收到的噪声强度，以得到与
15 K 个用户信号分别对应的 K 个噪声强度。

S303，根据等效信道增益矩阵 $\mathbf{B}$ 、 K 个干扰强度和 K 个噪声强度基于以下公式计算与 K 个用户信号分别对应的 K 个比特序列中每个比特的对数似然比：

$$L_{k,b} = \frac{\mu_k^2}{v_k^2} \left(\min_{a \in \mathcal{X}_b^0} \left| \frac{\hat{x}_{t,k}}{\mu_k} - a \right|^2 - \min_{a' \in \mathcal{X}_b^1} \left| \frac{\hat{x}_{t,k}}{\mu_k} - a' \right|^2 \right), \quad 1 \leq k \leq K, \quad 1 \leq b \leq B,$$

- 其中， $L_{k,b}$ 为第 k 个用户信号 $x_{t,k}$ 对应的比特序列中第 b 个比特的对数似然比， B 为每
20 个比特序列中包含的比特数量， $\mu_k = \mathbf{B}_{k,k}$ 为第 k 个用户的等效信道增益矩阵， $\hat{x}_{t,k}$ 为第 k 个用户信号的估计值， $\mathcal{X}_b^0$ 为第 b 个比特为 0 的所有可用符号的集合， $\mathcal{X}_b^1$ 为第 b 个比特为 1 的所有可用符号的集合， a 和 a' 分别为 $\mathcal{X}_b^0$ 和 $\mathcal{X}_b^1$ 中的符号， $v_k^2 = \mathbf{I}n_k + N_k$ ，其中，

$\ln_k = \sum_{u, u \neq k} |B_{k,u}|^2 E_s$ 为与第 k 个用户信号对应的干扰强度, $N_k = \Theta_{k,k} N_0$ 为与第 k 个用户信号对应的噪声强度, N_0 为噪声功率谱密度。

S104, 对 K 个对数似然比进行解交织和信道译码, 以得到 t 时刻 K 个用户发射的比特序列的检测结果。

5 与上述步骤相对应的, 本发明实施例在实现过程中, 数据处理流程可如图 3 所示, 主要包括 Gram 矩阵计算、计算匹配滤波信息过程、Lanczos 过程、LU 分解过程、坐标向量 z 获取过程、天线发射信号估计值获取过程、似然比 (LLR) 计算过程以及最终译码过程。

根据本发明实施例的大规模多天线系统中多用户信号的检测方法, 其优点是, 复杂度低 (约为 $\mathcal{O}(5IK^2)$, 其中 I 为迭代次数); 误比特率性能好, 能在几步迭代以内就逼近最优

10 MMSE 检测的误比特率性能。本方法通过 Lanczos 迭代算法求解线性方程组, 避免了通过直接对大型矩阵求逆的方式获得 MMSE 均衡矩阵, 能大大减少检测的计算复杂度; 此外, 本检测方法能在较低的复杂度内计算出各个信息比特的 LLR 值作为译码器的输入, 能显著提升联合检测译码的性能。在用户数 K ($K < N$) 与基站天线数 N 的比值一定时且二者数目都趋于无穷时, 这种复杂度的降低尤为明显, 同时误比特率性能能够渐进达到最大似然检测的 (最优) 性能。

应当理解, 本发明的各部分可以用硬件、软件、固件或它们的组合来实现。在上述实施方式中, 多个步骤或方法可以用存储在存储器中且由合适的指令执行系统执行的软件或固件来实现。例如, 如果用硬件来实现, 和在另一实施方式中一样, 可用本领域公知的下列技术中的任一项或他们的组合来实现: 具有用于对数据信号实现逻辑功能的逻辑门电路
20 的离散逻辑电路, 具有合适的组合逻辑门电路的专用集成电路, 可编程门阵列 (PGA), 现场可编程门阵列 (FPGA) 等。

在本说明书的描述中, 参考术语“一个实施例”、“一些实施例”、“示例”、“具体示例”、或“一些示例”等的描述意指结合该实施例或示例描述的具体特征、结构、材料或者特点包含于本发明的至少一个实施例或示例中。在本说明书中, 对上述术语的示意性表述不一定
25 指的是相同的实施例或示例。而且, 描述的具体特征、结构、材料或者特点可以在任何的一个或多个实施例或示例中以合适的方式结合。

尽管已经示出和描述了本发明的实施例, 本领域的普通技术人员可以理解: 在不脱离本发明的原理和宗旨的情况下可以对这些实施例进行多种变化、修改、替换和变型, 本发明的范围由权利要求及其等同物限定。

权利要求书

1、一种大规模多天线系统中多用户信号的检测方法，其特征在于，包括以下步骤：
建立所述大规模多天线系统中的多用户信号检测的等效线性方程组模型；

5 通过 Lanczos 算法对所述等效线性方程组模型进行求解，以获取所述大规模多天线系统的 t 时刻的天线发送信号的估计值，其中，所述 t 时刻的天线发送信号的估计值包括与 K 个用户信号分别对应的 K 个比特序列， $t \in 1:T_N$ ， T_N 为时隙数量， K 为正整数；

分别获取与所述 K 个用户信号分别对应的 K 个比特序列中每个比特的对数似然比，以得到与所述 K 个用户信号分别对应的 K 个对数似然比序列；

10 对所述 K 个对数似然比进行解交织和信道译码，以得到 t 时刻 K 个用户发射的比特序列的检测结果。

2、如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，建立所述大规模多天线系统中的多用户信号检测的等效线性方程组模型包括：

15 通过以下公式获取所述大规模多天线系统的基站在所述 t 时刻接收到的信号向量的匹配滤波向量 $\mathbf{y}_t^{MF}$ ：

$\mathbf{y}_t^{MF} = \mathbf{H}_t^H \mathbf{y}_t$ ，其中， $\mathbf{H}_t^H$ 为所述大规模多天线系统的 t 时刻的上行信道矩阵 $\mathbf{H}_t$ 的共轭转置， $\mathbf{y}_t$ 为所述基站在 t 时刻接收到的信号向量；

通过以下公式获取所述上行信道矩阵 $\mathbf{H}_t^H$ 的 Gram 矩阵 $\mathbf{G}_t$ ：

$\mathbf{G}_t = \mathbf{H}_t^H \mathbf{H}_t + \frac{1}{\rho} \mathbf{I}_K$ ，其中， ρ 为所述基站的接收信号的信噪比， $\mathbf{I}_K$ 为 K 阶单位矩阵；

20 基于以下公式建立所述大规模多天线系统中的多用户信号检测的等效线性方程组模型：

$\mathbf{G}_t \hat{\mathbf{x}}_t = \mathbf{y}_t^{MF}$ ，其中， $\hat{\mathbf{x}}_t$ 为 t 时刻的天线发送信号的估计值。

3、如权利要求 2 所述的方法，其特征在于，通过 Lanczos 算法对所述等效线性方程组模型进行求解包括：

25 S1、根据所述等效线性方程组模型基于所述 Lanczos 算法获取与所述 Gram 矩阵 $\mathbf{G}_t$ 的相关列正交矩阵 $\mathbf{Q}$ 和对称三对角矩阵 $\mathbf{T}$ ；

S2、根据所述对称三对角矩阵 $\mathbf{T}$ 获取所述 t 时刻的天线发送信号的估计值 $\hat{\mathbf{x}}_t$ 在所述列正交矩阵 $\mathbf{Q}$ 的各列张成的线性子空间中的坐标向量 $\mathbf{z}$ ；

S3、根据所述列正交矩阵 $\mathbf{Q}$ 和所述坐标向量 $\mathbf{z}$ 计算所述 t 时刻的天线发送信号的估计值 $\hat{\mathbf{x}}_t$ 。

4、如权利要求 3 所述的方法，其特征在于，所述 S1 具体包括：

S11、初始化过程：确定所述 $\hat{\mathbf{x}}_t$ 的初始值 $\hat{\mathbf{x}}_{t,0} = \mathbf{0}$ ，并根据所述 $\hat{\mathbf{x}}_t$ 的初始值 $\hat{\mathbf{x}}_{t,0}$ 计算所

5 述等效线性方程组模型的初始余向量 $\mathbf{r}_0 = \mathbf{y}_t^{MF}$ ，根据所述初始余向量 $\mathbf{r}_0$ 确定所述列正交矩阵 $\mathbf{Q}$ 和所述对称三对角矩阵 $\mathbf{T}$ 的初始值，其中，所述列正交矩阵 $\mathbf{Q}$ 的初始值中第零列和第一列分别为 $\mathbf{q}_0 = \mathbf{0}$ 和 $\mathbf{q}_1 = \frac{\mathbf{r}_0}{\beta}$ ， β 为所述初始余向量 $\mathbf{r}_0$ 的模， $\beta = \|\mathbf{r}_0\|_2$ ，所述对称三对角矩阵 $\mathbf{T}$ 的初始值中第一个主对角元为 $\alpha_1 = \mathbf{q}_1^H \mathbf{G}_t \mathbf{q}_1$ ，其中， $\mathbf{q}_1^H$ 表示 $\mathbf{q}_1$ 的共轭转置，第零个次对角元为 $\theta_0 = 0$ ；

10 S12、迭代过程：

A、计算在第 p 次迭代时所述等效线性方程组模型的余向量： $\mathbf{r}_p = \mathbf{G}_t \mathbf{q}_p - \alpha_p \mathbf{q}_p - \theta_{p-1} \mathbf{q}_{p-1}$ ；

B、计算在第 p 次迭代时对称三对角矩阵 $\mathbf{T}_{p+1}$ 的第 $p+1$ 行上的次对角元： $\theta_p = \|\mathbf{r}_p\|_2$ ；

C、判断 θ_p 是否等于 0；

D、若 $\theta_p = 0$ ，则停止迭代，并令 $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_p$ ， $\mathbf{T} = \mathbf{T}_p$ ；

15 E、若 $\theta_p \neq 0$ ，则执行 F-H；

F、计算在第 p 次迭代时列正交矩阵 $\mathbf{Q}_{p+1}$ 的第 $p+1$ 列为： $\mathbf{q}_{p+1} = \frac{\mathbf{r}_p}{\|\mathbf{r}_p\|_2}$ ，并得到列正交

矩阵 $\mathbf{Q}_{p+1} = [\mathbf{Q}_p, \mathbf{q}_{p+1}]$ ；

G、根据所述列正交矩阵 $\mathbf{Q}_{p+1}$ 的第 $p+1$ 列 $\mathbf{q}_{p+1}$ 计算在第 p 次迭代时对称三对角矩阵 $\mathbf{T}_{p+1}$ 的第 $p+1$ 行上的主对角元： $\alpha_{p+1} = \mathbf{q}_{p+1}^H \mathbf{G}_t \mathbf{q}_{p+1}$ ，其中 $\mathbf{q}_{p+1}^H$ 表示 $\mathbf{q}_{p+1}$ 的共轭转置，并得到对称

20 三对角矩阵 $\mathbf{T}_{p+1} = \begin{bmatrix} & & 0 \\ & \mathbf{T}_p & \vdots \\ & & \theta_p \\ 0 & \cdots & \theta_p & \alpha_{p+1} \end{bmatrix}$ ；

H、按照预设步长更新迭代变量 p ， $p \in (1 \dots P')$ ， P' 为预设迭代次数；

I、若更新后的迭代变量大于预设迭代次数 P' ，停止迭代，并令 $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_p$ ， $\mathbf{T} = \mathbf{T}_p$ ，若

更新后的迭代变量不大于预设迭代次数 P' ，并重复迭代过程 A-H，直至迭代变量大于预设迭代次数 P' 。

5、如权利要求 4 所述的方法，其特征在于，所述 S2 具体包括：

S21、对所述对称三对角矩阵 T 进行 LU 分解，以得到所述对称三对角矩阵 T 的下双对角矩阵 L 和上双角矩阵 U ；

S22、根据所述下双对角矩阵 L 和所述上双角矩阵 U 获取所述 t 时刻的天线发送信号的估计值 $\hat{\mathbf{x}}_t$ 在所述列正交矩阵 Q 的各列张成的线性子空间中的坐标向量 $\mathbf{z}$ 。

6、如权利要求 5 所述的方法，其特征在于，所述 S21 具体包括：

根据所述对称三对角矩阵 T 分别确定所述上双角矩阵 U 的第一行第一列的元素 $U_{1,1} = T_{1,1}$ 和第一行第二列的元素 $U_{1,2} = T_{1,2}$ ；

根据所述对称三对角矩阵 T 、所述上双角矩阵 U 的第一行第一列的元素 $U_{1,1}$ 和第一行第二列的元素 $U_{1,2}$ 确定所述下双对角矩阵 L 和所述上双角矩阵 U ，其中，

所述下双对角矩阵 L 中对角元素为 1，第 m 行第 $m-1$ 列的元素 $L_{m,m-1} = \frac{T_{m,m-1}}{U_{m-1,m-1}}$ ，其他元素为 0，所述上双角矩阵 U 中对角元素 $U_{m,m} = T_{m,m} - L_{m,m-1}U_{m-1,m}$ ，第 $i-1$ 行第 i 列的元素 $U_{m-1,m} = T_{m-1,m} - L_{m-1,m-2}U_{m-2,m-1}$ ，其他元素为 0， $m = 2, \dots, P$ ， $i = 3, \dots, P$ ， P 为在所述迭代过程 S12 中的迭代次数。

7、如权利要求 5 所述的方法，其特征在于，所述 S22 具体包括：

根据所述上双角矩阵 U 定义中间变量 $\mathbf{b}$ ，其中， $\mathbf{b} = \mathbf{U}\mathbf{z}$ ；

根据所述下双对角矩阵 L 对公式 $\mathbf{Lb} = \beta \mathbf{e}_1$ 求解，以获取所述中间变量 $\mathbf{b}$ ，

$$b_i = \begin{cases} \beta / L_{i,i}, & i = 1 \\ -\frac{L_{i,i-1}b_{i-1}}{L_{i,i}}, & i = 2, \dots, P \end{cases} \quad \text{其中，} P \text{ 为在所述迭代过程 S12 中的迭代次数，} \mathbf{e}_1 \text{ 的第一个元素为 1，其他元素均为 0；}$$

根据所述中间变量 $\mathbf{b}$ 和所述上双角矩阵 U 获取所述坐标向量 $\mathbf{z}$ ，其中，

$$z_i = \begin{cases} b_i / U_{i,i}, & i = P \\ \frac{(b_i - U_{i,i+1}z_{i+1})}{U_{i,i}}, & i = P-1, \dots, 1 \end{cases}, \quad z_i \text{ 为所述坐标向量 } \mathbf{z} \text{ 的第 } i \text{ 个元素，其中，} P \text{ 为在所述}$$

迭代过程 S12 中的迭代次数。

8、如权利要求 3 所述的方法，其特征在于，所述 S3 包括：

通过以下公式将所述列正交矩阵 $\mathbf{Q}$ 的各列按照所述坐标向量 $\mathbf{z}$ 的各个元素进行线性组合，以得到所述 t 时刻的天线发射信号的估计值 $\hat{\mathbf{x}}_t$ ：

$$\hat{\mathbf{x}}_t = \mathbf{Q}\mathbf{z}。$$

9、如权利要求 5 所述的方法，其特征在于，分别获取与所述 K 个用户信号分别对应的 K 个比特序列中每个比特的对数似然比包括：

根据所述列正交矩阵 $\mathbf{Q}$ 、所述对称三对角 $\mathbf{T}$ 和所述上行信道矩阵 $\mathbf{H}_t$ 计算所述大规模多天线系统中天线发射信号与天线发射信号的估计值 $\hat{\mathbf{x}}_t$ 之间的等效信道增益矩阵 $\mathbf{B}$ 和所述 K 个用户信号的等效接收噪声 $\tilde{\mathbf{w}}_t$ ，其中， $\mathbf{B} = \mathbf{Q}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{Q}^H\mathbf{H}_t^H\mathbf{H}_t$ ， $\tilde{\mathbf{w}}_t = \mathbf{Q}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{Q}^H\mathbf{H}_t^H\mathbf{w}_t$ ， $\mathbf{T}^{-1}$ 为所述对称三对角 $\mathbf{T}$ 的逆，并计算所述等效接收噪声 $\tilde{\mathbf{w}}_t$ 的协方差矩阵 Θ ，其中，

$$\Theta = \mathbf{Q}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{Q}^H\mathbf{H}_t^H\mathbf{H}_t\mathbf{Q}(\mathbf{T}^{-1})^H\mathbf{Q}^H；$$

根据所述等效信道增益矩阵 $\mathbf{B}$ 分别获取所述 K 个用户信号中每个用户信号收到其他用户信号的干扰强度，以得到与所述 K 个用户信号分别对应的 K 个干扰强度，并根据所述协方差矩阵 Θ 分别获取所述 K 个用户信号中每个用户信号在被基站接收时基站接收到的噪声强度，以得到与所述 K 个用户信号分别对应的 K 个噪声强度；

15 根据所述等效信道增益矩阵 $\mathbf{B}$ 、所述 K 个干扰强度和 K 个噪声强度基于以下公式计算所述与所述 K 个用户信号分别对应的 K 个比特序列中每个比特的对数似然比：

$$L_{k,b} = \frac{\mu_k^2}{v_k^2} \left(\min_{a \in \mathcal{X}_b^0} \left| \frac{\hat{x}_{t,k}}{\mu_k} - a \right|^2 - \min_{a' \in \mathcal{X}_b^1} \left| \frac{\hat{x}_{t,k}}{\mu_k} - a' \right|^2 \right), \quad 1 \leq k \leq K, \quad 1 \leq b \leq B,$$

其中， $L_{k,b}$ 为第 k 个用户信号 $x_{t,k}$ 对应的比特序列中第 b 个比特的对数似然比， B 为每个比特序列中包含的比特数量， $\mu_k = \mathbf{B}_{k,k}$ 为第 k 个用户的等效信道增益矩阵， $\hat{x}_{t,k}$ 为第 k 个用户信号的估计值， $\mathcal{X}_b^0$ 为第 b 个比特为 0 的所有可用符号的集合， $\mathcal{X}_b^1$ 为第 b 个比特为 1 的所有可用符号的集合， a 和 a' 分别为 $\mathcal{X}_b^0$ 和 $\mathcal{X}_b^1$ 中的符号， $v_k^2 = \mathbf{I}n_k + N_k$ ，其中， $\mathbf{I}n_k = \sum_{u,u \neq k} |\mathbf{B}_{k,u}|^2 E_s$ 为与第 k 个用户信号对应的干扰强度， $N_k = \Theta_{k,k} N_0$ 为与第 k 个用户信号对应的噪声强度， N_0 为通过谱分析技术估计得到的噪声功率谱密度。

10、如权利要求 9 所述的方法，其特征在于，其中，通过以下步骤对公式
25 $\mathbf{LUa}_c = \mathbf{e}_c, 1 \leq c \leq P$ 求解以获取所述对称三对角矩阵 $\mathbf{T}$ 的逆矩阵 $\mathbf{T}^{-1}$ 的每一列：

定义中间变量 $\mathbf{g}$, $\mathbf{g} = \mathbf{U}\mathbf{a}_c$, 以将所述公式 $\mathbf{L}\mathbf{U}\mathbf{a}_c = \mathbf{e}_c$ 简化为 $\mathbf{L}\mathbf{g} = \mathbf{e}_c$ 其中, $\mathbf{a}_c$ 为所述矩阵 $\mathbf{T}^{-1}$ 的第 c 列, $\mathbf{e}_c \in \mathbb{C}^{P \times 1}$, $\mathbf{e}_c$ 中第 c 个元素为 1, 其余元素为 0;

$$\text{对公式 } \mathbf{L}\mathbf{g} = \mathbf{e}_c \text{ 求解, 以得到 } \mathbf{g}, \quad g_l = \begin{cases} e_{c,l} / L_{l,l}, & l=1 \\ \frac{e_{c,l} - L_{l,l-1}g_{l-1}}{L_{l,l}}, & l=2, \dots, P \end{cases},$$

其中, g_l 为 $\mathbf{g}$ 的第 l 个元素, $e_{c,l}$ 为 $\mathbf{e}_c$ 的第 l 个元素, $L_{l,l}$ 为所述下双对角矩阵 $\mathbf{L}$ 的第 l

5 个对角元,;

根据所述 $\mathbf{g}$ 和所述上双对角矩阵 $\mathbf{U}$ 求解所述 $\mathbf{a}_c$,

$$a_{c,n} = \begin{cases} g_n / U_{n,n}, & n=P \\ \frac{(g_n - U_{n,n+1}a_{c,n+1})}{U_{n,n}}, & n=P-1, \dots, 1 \end{cases}, \text{ 其中, } a_{c,n} \text{ 为 } \mathbf{a}_c \text{ 的第 } n \text{ 个元素, } g_n \text{ 为 } \mathbf{g} \text{ 的第 } n \text{ 个}$$

元素, $U_{n,n}$ 为所述上双角矩阵 $\mathbf{U}$ 的第 n 个对角元。

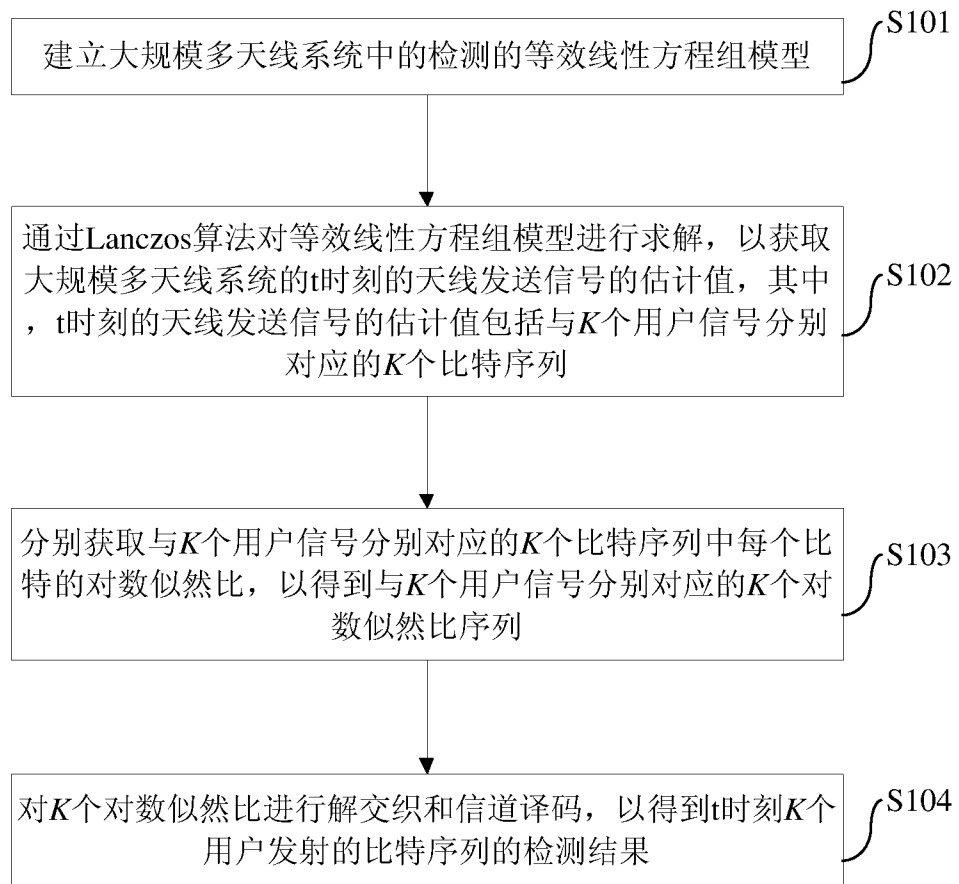


图 1

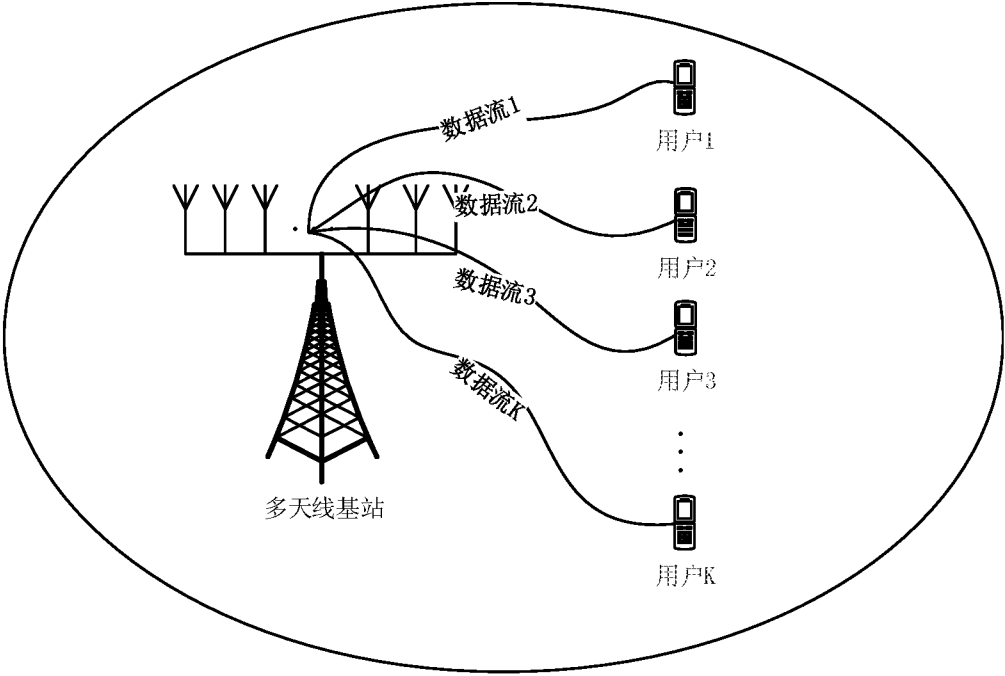


图 2

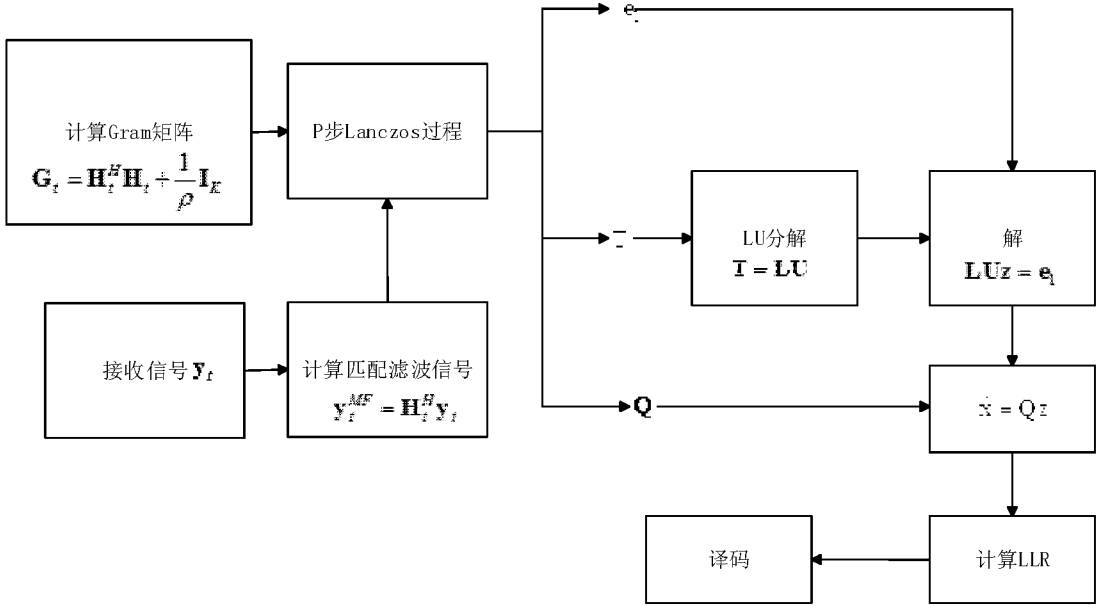


图 3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2015/073967

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H04L 1/00 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H04L

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CPRSABS, CNTXT, VEN, CNKI: lanczos, multi, multiple, antennae, users, signal, detect+, equation, estimat+, log likelihood ratio, solution interleav+, cod+

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 103297111 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 11 September 2013 (11.09.2013) the whole document	1-10
A	CN 103152142 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 12 June 2013 (12.06.2013) the whole document	1-10
A	CN 103873120 A (UNIVERSITY CHINA SCIENCE & TECHNOLOGY) 18 June 2014 (18.06.2014) the whole document	1-10
A	US 8897118 B1 (APPLIED MICRO CIRCUITS CORPORATION) 25 November 2014 (25.11.2014) the whole document	1-10

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date	“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	“&” document member of the same patent family
“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 14 October 2015	Date of mailing of the international search report 06 November 2015
Name and mailing address of the ISA/CN State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No. (86-10) 62019451	Authorized officer LV, Xiaoqian Telephone No. (86-10) 62089460

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2015/073967

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 103297111 A	11 September 2013	None	
CN 103152142 A	12 June 2013	None	
CN 103873120 A	18 June 2014	None	
US 8897118 B1	25 November 2014	None	

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2015/073967

A. 主题的分类

H04L 1/00 (2006.01) i

按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号)

H04L

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用))

CPRSABS, CNTXT, VEN, CNKI: 多天线, 多用户, 信号, 检测, 方程, 估计, 估值, 对数似然比, 解交织, 译码, lanczos, multi, multiple, antennae, users, signal, detect+, equation, estimat+, log likelihood ratio, solution interleav+, cod+

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 103297111 A (清华大学) 2013年 9月 11日 (2013 - 09 - 11) 全文	1-10
A	CN 103152142 A (清华大学) 2013年 6月 12日 (2013 - 06 - 12) 全文	1-10
A	CN 103873120 A (中国科学技术大学) 2014年 6月 18日 (2014 - 06 - 18) 全文	1-10
A	US 8897118 B1 (应用微电路公司) 2014年 11月 25日 (2014 - 11 - 25) 全文	1-10

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2015年 10月 14日

国际检索报告邮寄日期

2015年 11月 6日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中华人民共和国国家知识产权局 (ISA/CN)
北京市海淀区蓟门桥西土城路6号
100088 中国

传真号 (86-10) 62019451

授权官员

吕小倩

电话号码 (86-10) 62089460

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2015/073967

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	103297111	A	2013年 9月 11日	无	
CN	103152142	A	2013年 6月 12日	无	
CN	103873120	A	2014年 6月 18日	无	
US	8897118	B1	2014年 11月 25日	无	