



(10) 授权公告号 CN 116868518 B

(45) 授权公告日 2024. 09. 27

(21) 申请号 202280015597.X

(22) 申请日 2022.01.26

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 116868518 A

(43) 申请公布日 2023.10.10

(66) 本国优先权数据
PCT/CN2021/077059 2021.02.20 CN

(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2023.08.17

(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/EP2022/051724 2022.01.26

(87) PCT国际申请的公布数据
W02022/175035 EN 2022.08.25

(73) 专利权人 英国电讯有限公司

地址 英国伦敦

(72) 发明人 戴凌龙 刘坤瓚 张子健
R·麦肯齐 郝墨

(74) 专利代理机构 北京三友知识产权代理有限公司 11127

专利代理师 师玮 赵鹏

(51) Int. Cl.
H04B 7/026 (2006.01)
H04B 7/06 (2006.01)

(56) 对比文件
CN 111464223 A, 2020.07.28
CN 111698046 A, 2020.09.22

审查员 林桂荣

权利要求书4页 说明书11页 附图6页

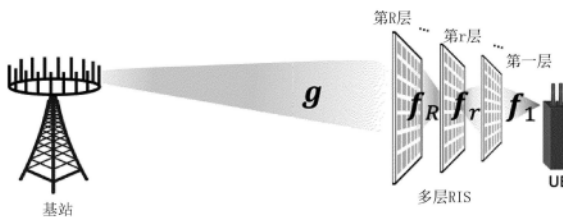
(54) 发明名称

包括多层透射可重新配置智能表面的无线电信网络

(57) 摘要

本发明提供了一种控制无线电信网络中的无线信号传输的方法,所述无线电信网络包括:发射机;多层透射可重新配置智能表面RIS,其包括第一透射RIS层和最后透射RIS层;以及接收机,所述方法包括以下步骤:确定要由发射机应用的波束成形向量、要由第一透射RIS层应用的第一相移矩阵、要由最后透射RIS层应用的最后相移矩阵以及要由接收机应用的组合向量;并且,在无线信号的从发射机到接收机的传输中,无线信号穿过第一透射RIS层和最后透射RIS层,使得发射机使用所确定的波束成形向量,使得第一透射RIS层使用所确定的第一相移矩阵,使得最后透射RIS层使用所确定的最后相移矩阵,并且使得接收机使用所确定的组合向量。本发明还提供一种控制无线电信网络中的无线信号传输的设备和包括该设备的系统,该无线电信网络包括被配置为将组合向量应用于无线信号的接收

机,该设备包括:发射机;以及多层透射可重新配置智能表面RIS,其包括第一透射RIS层和最后透射RIS层,其中,发射机被配置为向接收机发射无线信号,无线信号穿过第一透射RIS层和最后透射RIS层,发射机被配置为向无线信号应用波束成形向量,第一透射RIS被配置为向无线信号应用第一相移矩阵,最后透射RIS被配置为将最后相移矩阵应用于无线信号。



1. 一种控制无线电信网络中的无线信号传输的方法,所述无线电信网络包括发射机、多层透射可重新配置智能表面RIS以及接收机,该多层透射RIS包括第一透射RIS层和最后透射RIS层,所述方法包括以下步骤:

确定要由所述发射机应用的波束成形向量、要由所述第一透射RIS层应用的第一相移矩阵、要由所述最后透射RIS层应用的最后相移矩阵以及要由所述接收机应用的组合向量;并且,在无线信号从所述发射机到所述接收机的传输中,所述无线信号穿过所述第一透射RIS层和所述最后透射RIS层,

使所述发射机使用所确定的波束成形向量,

使所述第一透射RIS层使用所确定的第一相移矩阵,

使所述最后透射RIS层使用所确定的最后相移矩阵,以及

使所述接收机使用所确定的组合向量。

2. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述波束成形向量、所述第一相移矩阵、所述最后相移矩阵和所述组合向量被确定为无线通信性能优化问题的解。

3. 根据权利要求2所述的方法,其中,在一系列迭代中对所述无线通信性能优化问题求解,直到满足收敛标准。

4. 根据权利要求3所述的方法,其中,所述收敛标准是基于所述一系列迭代中的当前迭代的当前无线通信性能的,并且所述当前无线通信性能是基于以下项确定的:

所述一系列迭代中的所述当前迭代的波束成形向量,其是基于所述一系列迭代中的先前迭代的第一相移矩阵、所述一系列迭代中的先前迭代的最后相移矩阵以及所述一系列迭代中的先前迭代的组合向量的;

所述一系列迭代中的当前迭代的第一相移矩阵,其是基于所述一系列迭代中的先前迭代的波束成形向量、所述一系列迭代中的先前迭代的最后相移矩阵以及所述一系列迭代中的先前迭代的组合向量的;

所述一系列迭代中的当前迭代的最后相移矩阵,其是基于所述一系列迭代中的先前迭代的波束成形向量、所述一系列迭代中的先前迭代的第一相移矩阵以及所述一系列迭代中的先前迭代的组合向量的;以及

所述一系列迭代中的当前迭代的组合向量,其是基于所述一系列迭代中的先前迭代的波束成形向量、所述一系列迭代中的先前迭代的第一相移矩阵以及所述一系列迭代中的先前迭代的最后相移矩阵的。

5. 根据权利要求4所述的方法,其中,所述一系列迭代中的当前迭代的组合向量被确定为:

$$\mathbf{v} = \boldsymbol{\psi}_{\max} \left(\mathbf{g}^H \left(\prod_{r=R}^1 \boldsymbol{\Theta}_r \mathbf{f}_r \right) \mathbf{w} \mathbf{w}^H \left(\prod_{r=R}^1 \boldsymbol{\Theta}_r \mathbf{f}_r \right)^H \mathbf{g} \right)$$

其中:

- r 是1到 R 的集合中的元素,其中, R 是所述多层透射RIS中的透射RIS层的计数,
- $\boldsymbol{\psi}_{\max}$ 是用于计算对应于 $(\mathbf{g}^H (\prod_{r=R}^1 \boldsymbol{\Theta}_r \mathbf{f}_r) \mathbf{w} \mathbf{w}^H (\prod_{r=R}^1 \boldsymbol{\Theta}_r \mathbf{f}_r)^H \mathbf{g})$ 的最大本征值的本征向量的矩阵算子,
- $\mathbf{g}$ 是从所述最后透射RIS层到所述接收机的频域信道矩阵,

• Θ_r 是所述一系列迭代中的先前迭代的第 r 透射 RIS 层的相移矩阵, 包括当 r 等于 1 时, 所述一系列迭代中的先前迭代的第一透射 RIS 层的第一相移矩阵, 以及当 r 等于 R 时, 所述一系列迭代中的先前迭代的最后透射 RIS 层的最后相移矩阵,

• f_r 是当 r 等于 1 时从所述发射机到所述第一透射 RIS 层的频域信道矩阵, 并且是当 r 大于 1 时从第 $(r-1)$ 透射 RIS 层到第 r 透射 RIS 层的频域信道矩阵, 并且

• w 是所述一系列迭代中的先前迭代的波束成形向量。

6. 根据权利要求 4 或 5 所述的方法, 其中, 所述一系列迭代中的当前迭代的第一透射 RIS 层的第一相移矩阵被确定为:

$$\theta_1 = \exp \left(j \arg \left(\text{diag}(\mathbf{f}_1 \mathbf{w})^H \left(\prod_{r=R}^2 \Theta_r \mathbf{f}_r \right)^H \mathbf{g} \mathbf{v} \right) \right)$$

其中:

- r 是 1 到 R 的集合中的元素, 其中, R 是所述多层透射 RIS 中的透射 RIS 层的计数,
- f_1 是从所述发射机到所述第一透射 RIS 层的频域信道矩阵,
- w 是所述一系列迭代中的先前迭代的波束成形向量,
- Θ_r 是所述一系列迭代中的先前迭代的第 r 透射 RIS 层的相移矩阵, 包括当 r 等于 R 时, 所述一系列迭代中的先前迭代的最后透射 RIS 层的最后相移矩阵,
- f_r 是从第 $(r-1)$ 透射 RIS 层到第 r 透射 RIS 层的频域信道矩阵,
- g 是从所述最后透射 RIS 层到所述接收机的频域信道矩阵, 并且
- v 是所述一系列迭代中的先前迭代的组合向量。

7. 根据权利要求 4 或 5 所述的方法, 其中, 所述一系列迭代中的当前迭代的最后透射 RIS 层的最后相移矩阵被确定为:

$$\theta_R = \exp \left(j \arg \left(\text{diag} \left(\mathbf{f}_R \left(\prod_{r=R-1}^1 \Theta_r \mathbf{f}_r \right) \mathbf{w} \right)^H \mathbf{g} \mathbf{v} \right) \right)$$

其中:

- r 是 1 到 R 的集合中的元素, 其中, R 是所述多层透射 RIS 中的透射 RIS 层的计数,
- Θ_r 是所述一系列迭代中的先前迭代的第 r 透射 RIS 层的相移矩阵, 包括当 r 等于 1 时, 所述一系列迭代中的先前迭代的第一透射 RIS 层的第一相移矩阵,
- f_r 是当 r 等于 1 时从所述发射机到所述第一透射 RIS 层的频域信道矩阵, 并且是当 r 大于 1 时从第 $(r-1)$ 透射 RIS 层到第 r 透射 RIS 层的频域信道矩阵,
- w 是所述一系列迭代中的先前迭代的波束成形向量,
- g 是从所述最后透射 RIS 层到所述接收机的频域信道矩阵, 并且
- v 是所述一系列迭代中的先前迭代的组合向量。

8. 根据权利要求 4 或 5 所述的方法, 其中, 所述一系列迭代中的当前迭代的波束成形向量被确定为:

$$\mathbf{w} = \sqrt{P_{\max}} \frac{(\prod_{r=R}^1 \Theta_r \mathbf{f}_r)^H \mathbf{g} \mathbf{v}}{\|(\prod_{r=R}^1 \Theta_r \mathbf{f}_r)^H \mathbf{g} \mathbf{v}\|_2}$$

其中:

- r 是 1 到 R 的集合中的元素, 其中, R 是所述多层透射 RIS 中的透射 RIS 层的计数,

• Θ_r 是所述一系列迭代中的先前迭代的第 r 透射 RIS 层的相移矩阵, 包括当 r 等于 1 时, 所述一系列迭代中的先前迭代的第一透射 RIS 层的第一相移矩阵, 以及当 r 等于 R 时, 所述一系列迭代中的先前迭代的最后透射 RIS 层的最后相移矩阵,

- f_r 是当 r 等于 1 时从所述发射机到所述第一透射 RIS 层的频域信道矩阵, 并且是当 r 大于 1 时从第 $(r-1)$ 透射 RIS 层到第 r 透射 RIS 层的频域信道矩阵,
- g 是从所述最后透射 RIS 层到所述接收机的频域信道矩阵,
- v 是所述一系列迭代中的先前迭代的组合向量, 并且,
- $P_{\max}$ 是最大发射功率。

9. 根据权利要求 4 或 5 所述的方法, 其中, 所述多层透射 RIS 包括一个或更多个中间透射 RIS 层, 并且所述无线信号从所述发射机到所述接收机的传输穿过所述第一透射 RIS 层、每个中间透射 RIS 层和所述最后透射 RIS 层, 并且该方法还包括以下步骤:

确定要由所述一个或更多个中间透射 RIS 层中的各个中间透射 RIS 层施加的、针对各个相应的中间透射 RIS 层的中间相移矩阵; 以及

使所述第一中间透射 RIS 层在所述无线信号的从所述发射机到所述接收机的传输中使用所确定的第一中间相移矩阵,

其中, 所述当前无线通信性能是基于以下项确定的:

所述一系列迭代中的当前迭代的波束成形向量, 其还是基于所述一系列迭代中的先前迭代的各个中间相移矩阵的,

所述一系列迭代中的当前迭代的第一相移矩阵, 其还是基于所述一系列迭代中的先前迭代的各个中间相移矩阵的,

所述一系列迭代中的当前迭代的各个中间相移矩阵, 各个中间相移矩阵是基于所述一系列迭代中的先前迭代的波束成形向量、所述一系列迭代中的先前迭代的第一相移矩阵、所述一系列迭代中的先前迭代的最后相移矩阵以及所述一系列迭代中的先前迭代的组合向量的,

所述一系列迭代中的当前迭代的最后相移矩阵, 其还是基于所述一系列迭代中的先前迭代的各个中间相移矩阵的, 以及

所述一系列迭代中的当前迭代的组合向量, 其还是基于所述一系列迭代中的先前迭代中的各个中间相移矩阵的。

10. 根据权利要求 9 所述的方法, 其中, 所述一系列迭代中的当前迭代的各个中间相移矩阵被确定为:

$$\theta_l = \exp \left(j \arg \left(\text{diag} \left(f_l \left(\prod_{r=l-1}^1 \Theta_r f_r \right) w \right)^H \left(\prod_{r=R}^{l+1} \Theta_r f_r \right)^H g v \right) \right)$$

其中:

- r 是 1 到 R 的集合中的元素, 其中, R 是所述多层透射 RIS 中的透射 RIS 层的计数,
- l 是 2 至 $R-1$ 的集合中的元素,
- f_l 是从第 $(l-1)$ 透射 RIS 层到第 l 透射 RIS 层的频域信道矩阵,
- Θ_r 是所述一系列迭代中的先前迭代的第 r 透射 RIS 层的相移矩阵, 包括当 r 等于 1 时, 所述一系列迭代中的先前迭代的第一透射 RIS 层的第一相移矩阵, 以及当 r 等于 R 时, 所述一

系列迭代中的先前迭代的最后透射RIS层的最后相移矩阵,

- f_r 是当 r 等于 1 时从所述发射机到所述第一透射RIS层的频域信道矩阵,并且是当 r 大于 1 时从第 $(r-1)$ 透射RIS层到第 r 透射RIS层的频域信道矩阵,
- w 是所述一系列迭代中的先前迭代的波束成形向量,
- g 是从所述最后透射RIS层到所述接收机的频域信道矩阵,并且
- v 是所述一系列迭代中的先前迭代的组合向量。

11. 根据权利要求 2 所述的方法,其中,所述无线通信性能问题是信噪比 SNR 优化问题。

12. 一种计算机可读载体介质,所述计算机可读载体介质包含具有指令的计算机程序,当所述计算机程序由计算机执行时,所述指令使所述计算机执行根据权利要求 1 至 11 中任一项所述的方法。

13. 一种控制无线网络中的无线信号传输的设备,所述无线网络包括接收机,所述接收机被配置为将组合向量应用于所述无线信号,所述设备包括:

发射机;以及

多层透射可重新配置智能表面 RIS,所述多层透射 RIS 包括第一透射 RIS 层和最后透射 RIS 层,

其中,所述发射机被配置为向所述接收机发射所述无线信号,所述无线信号穿过所述第一透射 RIS 层和所述最后透射 RIS 层,所述发射机被配置为向所述无线信号应用波束成形向量,所述第一透射 RIS 层被配置为向所述无线信号应用第一相移矩阵,并且所述最后透射 RIS 层被配置为向所述无线信号应用最后相移矩阵。

14. 根据权利要求 13 所述的设备,其中,所述发射机和所述多层透射 RIS 被封装在具有电磁屏蔽的壳体中。

15. 根据权利要求 13 或 14 所述的设备,所述设备还包括一个或更多个处理模块,所述一个或更多个处理模块被配置为执行根据权利要求 1 至 11 中任一项所述的方法。

16. 一种无线网络中的系统,所述系统包括根据权利要求 13 或权利要求 14 所述的设备,所述系统还包括所述接收机。

17. 根据权利要求 16 所述的系统,所述系统还包括一个或更多个处理模块,所述一个或更多个处理模块被配置为执行根据权利要求 1 至 11 中任一项所述的方法。

18. 根据权利要求 17 所述的系统,其中,所述一个或更多个处理模块被布置在包括以下项的组中的一者或更多者上:所述设备;所述接收机;以及外部节点。

包括多层透射可重新配置智能表面的无线网络

技术领域

[0001] 本发明涉及具有可重新配置的智能表面的无线网络。

背景技术

[0002] 在无线电信中,在发射机与接收机之间传输的无线信号通常由于来自其它无线信号的干扰和/或其它物理现象(例如衰落和阻塞)而降级。这通常是通过改进传输特性(例如,更高功率的传输或中继器)或传输处理技术(例如,更鲁棒的调制方案)来解决的。无线电信中出现的概念是可重新配置的传播环境或“智能无线电环境”的概念,其可以改善传输质量。这可以通过使用通常被称为可重新配置智能表面(RIS)的电磁材料的表面来实现,该表面可以被操作以对入射无线信号施加改变,诸如相位、幅度、频率和极化的改变,以便改善发射机与接收机之间的传输质量。

[0003] RIS的一个用途是帮助发射机与接收机之间的波束成形。在无线网络(即,不包括RIS的无线网络)中进行波束成形的传统方法是使用基于相控阵的混合预编码器。然而,与不实现波束成形的无线网络相比,已知设备成本和资源消耗(包括能量资源 and 处理资源)很高。已经表明,RIS可以被配置成辅助发射机波束成形,例如在Yu Lu和Linglong Dai的电气和电子工程师协会(IEEE)文章“Reconfigurable Intelligent Surface Based Hybrid Precoding for THz Communications”中。由于RIS几乎是无源的并且易于部署,所以该系统是成本有效且资源高效的波束成形解决方案。

[0004] RIS的另选名称包括大智能表面、大智能元表面、可编程元表面、可重新配置元表面、智能反射阵列、智能反射表面、软件定义表面和无源智能表面。术语“可重新配置”通常用于表示无论入射角如何都可以配置反射角。虽然大多数RIS被实现为反射表面,但是RIS也可以是透射表面,其中,入射的无线信号被发送通过该表面。然而,由于当无线信号通过RIS时经历的传播损耗,这些通常不被认为是可行的技术,特别是对于电信而言。

发明内容

[0005] 根据本发明的第一方面,提供了一种控制无线网络中的无线信号传输的方法,所述无线网络包括发射机、包括第一透射可重新配置智能表面RIS层和最后透射RIS层的多层透射RIS、以及接收机,所述方法包括以下步骤:确定要由所述发射机应用的波束成形向量、要由所述第一透射RIS层应用的第一相移矩阵、要由所述最后透射RIS层应用的最后相移矩阵、以及要由所述接收机应用的组合向量;并且在无线信号从发射机到接收机的传输中,无线信号穿过第一透射RIS层和最后透射RIS层,使得发射机使用所确定的波束成形向量,使得第一透射RIS层使用所确定的第一相移矩阵,使得最后透射RIS层使用所确定的最后相移矩阵,并且使得接收机使用所确定的组合向量。

[0006] 波束成形向量、第一相移矩阵、第二相移矩阵和组合向量可以被确定为无线通信性能优化问题的解决方案。无线通信性能优化问题可以在直到满足收敛标准的一系列迭代中解决。收敛标准可以是基于所述一系列迭代中的当前迭代的当前无线通信性能的,并且

当前无线通信性能是基于以下项确定的:所述一系列迭代中的当前迭代的波束成形向量,其基于所述一系列迭代中的先前迭代的第一相移矩阵、所述一系列迭代中的先前迭代的最后相移矩阵以及所述一系列迭代中的先前迭代的组合向量的;所述一系列迭代中的当前迭代的第一相移矩阵,其基于所述一系列迭代中的先前迭代的波束成形向量、所述一系列迭代中的先前迭代的最后相移矩阵以及所述一系列迭代中的先前迭代的组合向量;所述一系列迭代中的当前迭代的最后相移矩阵,其基于所述一系列迭代中的先前迭代的波束成形向量、所述一系列迭代中的先前迭代的第一相移矩阵以及所述一系列迭代中的先前迭代的组合向量;以及所述一系列迭代中的当前迭代的组合向量,其基于所述一系列迭代中的先前迭代的波束成形向量、所述一系列迭代中的先前迭代的第一相移矩阵以及所述一系列迭代中的先前迭代的最后相移矩阵。所述先前迭代可以是前一次迭代。

[0007] 所述一系列迭代中的当前迭代的组合向量可以被确定为:

$$[0008] \quad \mathbf{v} = \boldsymbol{\psi}_{\max} \left(\mathbf{g}^H \left(\prod_{r=R}^1 \boldsymbol{\Theta}_r \mathbf{f}_r \right) \mathbf{w} \mathbf{w}^H \left(\prod_{r=R}^1 \boldsymbol{\Theta}_r \mathbf{f}_r \right)^H \mathbf{g} \right)$$

[0009] 其中:

[0010] • r 是1到 R 的集合中的元素,其中, R 是多层透射RIS的透射RIS层的计数,

[0011] • $\boldsymbol{\psi}_{\max}$ 是用于计算对应于 $(\mathbf{g}^H (\prod_{r=R}^1 \boldsymbol{\Theta}_r \mathbf{f}_r) \mathbf{w} \mathbf{w}^H (\prod_{r=R}^1 \boldsymbol{\Theta}_r \mathbf{f}_r)^H \mathbf{g})$ 的最大本征值的本征向量的矩阵算子,

[0012] • $\mathbf{g}$ 是从最后透射RIS层到接收机的频域信道矩阵,

[0013] • $\boldsymbol{\Theta}_r$ 是所述一系列迭代中的先前迭代的第 r 透射RIS层的相移矩阵,包括当 r 等于1时,所述一系列迭代中的先前迭代的第一透射RIS层的第一相移矩阵,以及当 r 等于 R 时,所述一系列迭代中的先前迭代的最后透射RIS层的最后相移矩阵,

[0014] • $\mathbf{f}_r$ 是当 r 等于1时从发射机到第一透射RIS层的频域信道矩阵,并且是当 r 大于1时从第 $(r-1)$ 透射RIS层到第 r 透射RIS层的频域信道矩阵,并且

[0015] • $\mathbf{w}$ 是所述一系列迭代中的先前迭代的波束成形向量。

[0016] 所述一系列迭代中的当前迭代的第一透射RIS层的第一相移矩阵可以被确定为:

$$[0017] \quad \boldsymbol{\theta}_1 = \exp \left(j \arg \left(\text{diag}(\mathbf{f}_1 \mathbf{w})^H \left(\prod_{r=R}^2 \boldsymbol{\Theta}_r \mathbf{f}_r \right)^H \mathbf{g} \mathbf{v} \right) \right)$$

[0018] 其中:

[0019] • r 是1到 R 的集合中的元素,其中, R 是多层透射RIS的透射RIS层的计数,

[0020] • $\mathbf{f}_1$ 是从发射机到第一透射RIS层的频域信道矩阵,

[0021] • $\mathbf{w}$ 是所述一系列迭代中的先前迭代的波束成形向量,

[0022] • $\boldsymbol{\Theta}_r$ 是所述一系列迭代中的先前迭代的第 r 透射RIS层的相移矩阵,包括当 r 等于 R 时,所述一系列迭代中的先前迭代的最后透射RIS层的最后相移矩阵,

[0023] • $\mathbf{f}_r$ 是从第 $(r-1)$ 透射RIS层到第 r 透射RIS层的频域信道矩阵,

[0024] • $\mathbf{g}$ 是从最后透射RIS层到接收机的频域信道矩阵,并且

[0025] • $\mathbf{v}$ 是所述一系列迭代中的先前迭代的组合向量。

[0026] 所述一系列迭代中的当前迭代的最后透射RIS层的最后相移矩阵可以确定为:

$$[0027] \quad \theta_R = \exp \left(\text{jarg} \left(\text{diag} \left(f_R \left(\prod_{r=R-1}^1 \Theta_r f_r \right) w \right)^H g v \right) \right)$$

[0028] 其中:

[0029] • r 是1到 R 的集合中的元素,其中, R 是多层透射RIS的透射RIS层的计数,

[0030] • Θ_r 是所述一系列迭代中的先前迭代的第 r 透射RIS层的相移矩阵,包括当 r 等于1时,所述一系列迭代中的先前迭代的第一透射RIS层的第一相移矩阵,

[0031] • f_r 是当 r 等于1时从发射机到第一透射RIS层的频域信道矩阵,并且是当 r 大于1时从第 $(r-1)$ 透射RIS层到第 r 透射RIS层的频域信道矩阵,

[0032] • w 是所述一系列迭代中的先前迭代的波束成形向量,

[0033] • g 是从最后透射RIS层到接收机的频域信道矩阵,并且

[0034] • v 是所述一系列迭代中的先前迭代的组合向量。

[0035] 所述一系列迭代中的当前迭代的波束成形向量可以被确定为:

$$[0036] \quad w = \sqrt{P_{\max}} \frac{(\prod_{r=R}^1 \Theta_r f_r)^H g v}{\|(\prod_{r=R}^1 \Theta_r f_r)^H g v\|_2}$$

[0037] 其中:

[0038] • r 是1到 R 的集合中的元素,其中, R 是多层透射RIS的透射RIS层的计数,

[0039] • Θ_r 是所述一系列迭代中的先前迭代的第 r 透射RIS层的相移矩阵,包括当 r 等于1时,所述一系列迭代中的先前迭代的第一透射RIS层的第一相移矩阵,以及当 r 等于 R 时,所述一系列迭代中的先前迭代的最后透射RIS层的最后相移矩阵,

[0040] • f_r 是当 r 等于1时从发射机到第一透射RIS层的频域信道矩阵,并且是当 r 大于1时从第 $(r-1)$ 透射RIS层到第 r 透射RIS层的频域信道矩阵,

[0041] • g 是从最后透射RIS层到接收机的频域信道矩阵,并且

[0042] • v 是所述一系列迭代中的先前迭代的组合向量。

[0043] 多层透射RIS可以包括一个或更多个中间透射RIS层,并且从发射机到接收机的无线信号的传输穿过第一透射RIS层、每个中间透射RIS层和最后透射RIS层,该方法还包括以下步骤:确定要由所述一个或更多个中间透射RIS层中的每一个中间透射RIS层应用的每个相应的中间透射RIS层的中间相移矩阵;以及使所述第一中间透射RIS层在从所述发射机到所述接收机的所述无线信号的传输中使用所确定的第一中间相移矩阵,其中,所述当前无线通信性能是基于以下项确定的:所述一系列迭代中的当前迭代的波束成形向量,其还基于所述一系列迭代中的先前迭代的每个中间相移矩阵;所述一系列迭代中的当前迭代的第一相移矩阵,其还基于所述一系列迭代中的先前迭代的每个中间相移矩阵;所述一系列迭代的当前迭代的每个中间相移矩阵,每个中间相移矩阵基于所述一系列迭代中的先前迭代的波束成形向量、所述一系列迭代的先前迭代的第一相移矩阵、所述一系列迭代的先前迭代的最后相移矩阵、所述一系列迭代的先前迭代的组合向量,并且如果存在超过一个中间透射RIS层,则基于所述一系列迭代中的先前迭代的每个其他中间相移矩阵;所述一系列迭代中的当前迭代的最后相移矩阵,其还基于所述一系列迭代中的先前迭代的每个中间相移矩阵;以及所述一系列迭代中的当前迭代的组合向量,其还基于所述一系列迭代中的先前迭代的每个中间相移矩阵。

[0044] 用于所述一系列迭代中的当前迭代的每个中间相移矩阵可以被确定为:

$$[0045] \quad \theta_l = \exp \left(j \arg \left(\text{diag} \left(f_l \left(\prod_{r=l-1}^1 \Theta_r f_r \right) w \right)^H \left(\prod_{r=R}^{l+1} \Theta_r f_r \right)^H g v \right) \right)$$

[0046] 其中:

[0047] • r 是1到 R 的集合中的元素,其中, R 是多层透射RIS中透射RIS层的计数,

[0048] • l 是2至 $R-1$ 的集合中的元素,

[0049] • f_l 是从第 $(l-1)$ 透射RIS层到第 l 透射RIS层的频域信道矩阵,

[0050] • Θ_r 是所述一系列迭代中的先前迭代的第 r 透射RIS层的相移矩阵,包括当 r 等于1时,所述一系列迭代中的先前迭代的第一透射RIS层的第一相移矩阵,以及当 r 等于 R 时,所述一系列迭代中的先前迭代的最后透射RIS层的最后相移矩阵,

[0051] • f_r 是当 r 等于1时从发射机到第一透射RIS层的频域信道矩阵,并且是当 r 大于1时从第 $(r-1)$ 透射RIS层到第 r 透射RIS层的频域信道矩阵,

[0052] • w 是所述一系列迭代中的先前迭代的波束成形向量,

[0053] • g 是从最后透射RIS层到接收机的频域信道矩阵,并且

[0054] • v 是所述一系列迭代中的先前迭代的组合向量。

[0055] 无线通信性能问题可以是信噪比SNR优化问题。

[0056] 根据本发明的第二方面,提供了一种包含指令的计算机程序,当所述程序由计算机执行时,所述指令使所述计算机执行本发明的第一方面的步骤。计算机程序可以存储在计算机可读载体介质上。

[0057] 根据本发明的第三方面,提供了一种用于控制无线网络中的无线信号传输的设备,所述无线网络包括被配置为向所述无线信号应用组合向量的接收机,所述设备包括:发射机;以及多层透射可重新配置智能表面RIS,其包括第一透射RIS层和最后透射RIS层,其中,所述发射机被配置为向所述接收机发射所述无线信号,所述无线信号穿过所述第一透射RIS层和所述最后透射RIS层,所述发射机被配置为向所述无线信号应用波束成形向量,所述第一透射RIS被配置为向所述无线信号应用第一相移矩阵,所述最后透射RIS被配置为向无线信号应用最后相移矩阵。

[0058] 发射机和多层RIS可以封装在具有电磁屏蔽的壳体中。

[0059] 该设备还可以包括被配置为执行本发明的第一方面的步骤的一个或更多个处理模块。

[0060] 根据本发明的第四方面,提供了一种包括根据本发明第三方面的设备的无线网络中的系统,该系统还包括接收机。

[0061] 该系统还可以包括被配置为执行本发明的第一方面的步骤的一个或更多个处理模块。所述一个或更多个处理模块可以被布置在包括以下各项的组中的一个或多个上:所述设备;所述接收机;以及外部节点。

附图说明

[0062] 为了更好地理解本发明,现在将参照附图仅以示例的方式描述本发明的实施方式,在附图中:

- [0063] 图1是本发明实施方式的示意图,例示了多层透射可重新配置智能表面 (RIS) 的无线通信性能模型;
- [0064] 图2是具有双层透射RIS的蜂窝电信网络的第一实施方式的示意图;
- [0065] 图3是本发明的方法的第一实施方式的流程图;
- [0066] 图4a是图2的蜂窝电信网络的仿真设置的示意图;
- [0067] 图4b是具有单层RIS的另选网络的仿真设置的示意图;
- [0068] 图4c是没有RIS的另选网络的仿真设置的示意图;
- [0069] 图5是例示发射功率对SNR的曲线图;
- [0070] 图6a是单层透射RIS的功率分布图;以及
- [0071] 图6b是图2的双层透射RIS的功率分布图。

具体实施方式

[0072] 本发明的实施方式提供了一种用于在具有可重新配置智能表面 (RIS) 的无线电信网络中进行波束成形的系统和方法。将参考图1描述系统的概况及其无线通信性能模型。图1示出了UE、具有R个透射层的多层透射RIS以及基站。由r索引的多层透射RIS的每个透射层具有 N_r 个元素,并且为了简单起见,我们假设每个透射层具有相同数量的元素(使得对于r的所有值, N_r 等于N)。基站具有M个天线,而UE具有K个天线。

[0073] 令 $\mathbf{f}_1 \in \mathbb{C}^{N \times K}$ 表示从UE到多层RIS的第一层的频域信道矩阵, $\mathbf{f}_r \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 表示从多层透射RIS的第(r-1)层到多层透射RIS的第r层的频域信道矩阵(所有 $r \in \{2, 3, \dots, R\}$),并且 $\mathbf{g} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ 表示从多层透射RIS的第R层到基站的频域信道矩阵。将 $\Theta_r = \text{diag}(\theta_r) = \text{diag}(\theta_{r,1}, \dots, \theta_{r,N})$ (所有 $r \in \{1, 2, \dots, R\}$)表示为多层透射RIS的第r层的相移矩阵,其中,对于所有的 $n \in \{1, 2, \dots, N\}$, $|\theta_{r,n}| = 1$ 。在所述BS处接收的信号向量可以被表示为:

$$[0074] \quad \mathbf{y} = \mathbf{g}^H (\prod_{r=R}^1 \Theta_r \mathbf{f}_r) \mathbf{w} s + \mathbf{n}, \quad (1-1)$$

[0075] 其中, $\mathbf{w}$ 是具有功率约束 $\|\mathbf{w}\|_2^2 \leq P_{\max}$ 的波束成形向量,并且s是发射的符号。在基站的解码中引入的加性高斯白噪声(AWGN)满足 $\mathbf{n} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2 \mathbf{I}_M)$,其中, σ^2 是噪声功率,并且 $\mathbf{I}_M$ 是大小为M的单位矩阵。所述设备的通信性能可以通过解码信噪比(SNR)而评估为:

$$[0076] \quad \text{SNR} = \frac{|\mathbf{v}^H \mathbf{g}^H (\prod_{r=R}^1 \Theta_r \mathbf{f}_r) \mathbf{w}|^2}{\|\mathbf{v}^H\|_2^2 \sigma^2}, \quad (1-2)$$

[0077] 其中, $\mathbf{v}$ 表示基站处的组合向量,而 $\mathbf{g}^H (\prod_{r=R}^1 \Theta_r \mathbf{f}_r)$ 表示UE与基站之间的等效信道。在此上下文中,“等效”信道是在传输信号到达基站时基于所发射的信号所经历的所有信道矩阵而应用于所发射的信号总信道矩阵。假设信道状态信息(CSI)是完全已知的,则UE处的波束成形向量 $\mathbf{w}$ 、基站处的组合向量 $\mathbf{v}$ 以及多层透射RIS的相移矩阵 $\Theta_1, \dots, \Theta_R$ 应当被联合优化以最大化SNR。

[0078] 基于该模型,SNR优化问题可以用公式表示为:

$$[0079] \quad \max_{\mathbf{v}, \Theta_r, \mathbf{w}} \text{SNR} = \frac{|\mathbf{v}^H \mathbf{g}^H (\prod_{r=R}^1 \Theta_r \mathbf{f}_r) \mathbf{w}|^2}{\|\mathbf{v}^H\|_2^2 \sigma^2}, \quad (1-3)$$

$$[0080] \quad \text{s. t. } \|\mathbf{w}\|_2^2 \leq P_{\max}$$

[0081] $|\theta_{r,n}| = 1, \forall r, n$

[0082] 下面讨论的本发明的方法的第一实施方式描述了用于获得对该SNR优化问题的所有变量的最优解的迭代算法。在讨论该方法之前,将参考图2描述本发明的蜂窝电信网络的实施方式。

[0083] 蜂窝电信网络包括设备10和基站20。设备10包括用户设备(UE)11和多层RIS12,它们都封装在壳体19内,并且还包括处理器17。在该实施方式中,UE 11和多层RIS12的每一层经由有线通信链路连接到处理器17。多层RIS12包括第一透射RIS13(其是多层RIS12的第一层)和第二透射RIS15(其是多层RIS12的第二层)。在该实施方式中,UE 11和第一透射RIS13分隔开大约0.05m的距离,第一透射RIS13和第二透射RIS15分隔开大约0.05m的距离,并且第二透射RIS15和基站20分隔开大约20m的距离。

[0084] 壳体19包括第一细长支承构件19a、第二细长支承构件19b、第三细长支承构件19c和第四细长支承构件19d以及第一壁19e、第二壁19f、第三壁19g和第四壁19h,使得壳体19具有端部开口的矩形立方体形状(开口端是矩形立方体形状的未被壁19e、19f、19g、19h限定的面)。第一壁19e、第二壁19f、第三壁19g和第四壁19h由射频吸收材料构成。应当选择这种射频吸收材料以保护内部信道(即, f_1 至 f_R)的稳定性,例如通过吸收来自外部源的将引起干扰的任何射频。此外,该吸收材料应避免不希望的衍射或反射。

[0085] UE 11包括布置为均匀线性阵列(ULA)的第一收发器11a和第二收发器11b。基站20包括也被安排为ULA的第一收发机21a、第二收发机21b、第三收发机21c、第四收发机21d、第五收发机21e和第六收发机21f。UE 11和基站20可以使用蜂窝电信协议相互通信,例如由第三代合作伙伴计划(3GPP)定义的第五代(5G)协议。从UE 11到基站20的上行链路无线信号可以发射穿过第一透射RIS13、然后穿过第二透射RIS15,然后到达基站20。

[0086] 第一透射RIS13包括多个元件14,每个元件可由处理器17控制以对穿过该元件14的无线信号施加特定的相移。类似地,第二透射RIS15包括多个元件16,每个元件可由处理器17控制以对通过该元件16的无线信号施加特定相移。在该实施方式中,第一透射RIS13的多个元件14中的元件的计数等于第二透射RIS15的多个元件16中的元件的计数。图2示出了均具有正方形形状的第一透射RIS13和第二透射RIS15,但是本领域技术人员将理解这是非必要的。

[0087] 现在将参考图3的流程图来描述本发明的方法的第一实施方式。如上所述,该实施方式提供迭代算法以获得SNR优化问题的所有变量的最优解。这是通过将耦合的变量(波束成形向量 w 、组合向量 v 以及相移矩阵 Θ_r)解耦,并且交替地优化每个变量来实现(并且其他变量是固定的)。将针对具有 R 个层(包括第一层、最后层以及可选地介于第一层与最后层之间的一个或更多个中间层)的多层RIS来描述该算法,该算法可以被应用于上述蜂窝网络的第一实施方式的双层RIS。

[0088] 在第一步骤S101中,处理器17确定多个输入参数的值,包括信道矩阵 $f_1 \cdots f_R$ 和 g 以及最大发射功率 $P_{\max}$,它们在本实施方式的单次执行中可以被认为是固定的输入参数。由于UE 11与多层RIS的第一层(即,上述的第一实施方式中的第一透射RIS 13)之间的空间以及多层RIS的每一层之间的空间是固定的,并且基本上被设备的壳体19屏蔽了电磁场(不同于由UE 11产生的电磁场),因此信道矩阵 $f_1 \cdots f_R$ 被认为是近场静态信道,其因此在安装之后不改变。因此, $f_1 \cdots f_R$ 可以在设备10的安装期间被测量并记录。信道矩阵 g 是可以随时间和/或

位置改变的远场信道。这可以通过传统的信道估计和信道反馈机制来测量。在该实施方式中,最大发射功率 $P_{\max}$ 的值被存储在UE 11中,并且可以由处理器17取回。

[0089] 在步骤S103中,处理器17为多个可变输入参数设置初始值。在该实施方式中,处理器17将 w 和 v 设置为1,并且随机地生成 $\Theta_1 \cdots \Theta_R$ 的初始值。处理器17然后进入迭代循环。在步骤S105中,处理器17基于以下等式1-5更新其针对组合向量 v 的值及其针对所有其它可变参数的当前值(是在第一次迭代时在步骤S103中确定的初始值,或在后续迭代时在迭代循环的先前迭代中确定的值)。对于组合向量 v ,SNR优化问题可以重新制定为:

$$[0090] \quad \max_v \text{SNR} = \frac{v^H g^H (\prod_{r=R}^1 \Theta_r f_r) w w^H (\prod_{r=R}^1 \Theta_r f_r)^H g v}{\|v^H\|_2^2 \sigma^2} := \frac{v^H A v}{\|v^H\|_2^2 \sigma^2} \quad (1-4)$$

[0091] 其中, $A = g^H (\prod_{r=R}^1 \Theta_r f_r) w w^H (\prod_{r=R}^1 \Theta_r f_r)^H g$ 是正定矩阵。因此,SNR的最大值是A的最大本征值,并且相应的 v 写为

$$[0092] \quad v = \psi_{\max}(g^H (\prod_{r=R}^1 \Theta_r f_r) w w^H (\prod_{r=R}^1 \Theta_r f_r)^H g) \quad (1-5)$$

[0093] 其中:

- [0094] • r 是1到R的集合中的元素,其中,R是多层RIS中的透射RIS层的计数,
- [0095] • $\psi_{\max}(\cdot)$ 是计算对应于矩阵A的最大本征值的本征向量的矩阵算子,
- [0096] • g 是从最后透射RIS层到基站的频域信道矩阵,
- [0097] • Θ_r 是第 r 透射RIS层的相移矩阵(是在第一次迭代时在步骤S103中确定的初始值,或者是在后续迭代时在迭代循环的先前迭代中确定的值),
- [0098] • f_r 是当 r 等于1时从UE 11到第一透射RIS层的频域信道矩阵,并且是当 r 大于1时从第 $(r-1)$ 透射RIS层到第 r 透射RIS层的频域信道,并且
- [0099] • w 是波束成形向量(是在第一迭代时在步骤S103中确定的初始值,或者是在后续迭代中在迭代循环的先前迭代中确定的值)。

[0100] 在步骤S107中,处理器17基于下面的等式1-7和其针对所有其它可变参数的当前值(在第一次迭代时是在步骤S103中确定的初始值,或者是在后续迭代时是在迭代循环的先前迭代中确定的值),更新其对于多层RIS的第一透射RIS层的相移矩阵 Θ_1 的值。对于 Θ_1 ,SNR优化问题可以重新制定为:

$$[0101] \quad \text{SNR} = \frac{|v^H g^H (\prod_{r=R}^1 \Theta_r f_r) w|^2}{\|v^H\|_2^2 \sigma^2} = \frac{|v^H g^H (\prod_{r=R}^1 \Theta_r f_r) \text{diag}(f_1 w) \theta_1|^2}{\|v^H\|_2^2 \sigma^2} \quad (1-6)$$

[0102] 因为 θ_1 是其分量都具有范数1的向量,所以 θ_1 的最优值是

$$[0103] \quad \theta_1 = \exp(j \arg(\text{diag}(f_1 w)^H (\prod_{r=R}^1 \Theta_r f_r)^H g v)) \quad (1-7)$$

[0104] 其中:

- [0105] • r 是1到R的集合中的元素,其中,R是多层RIS中的透射RIS层的计数,
- [0106] • f_1 是从UE 11到第一透射RIS层的频域信道矩阵,
- [0107] • w 是波束成形向量(是在第一迭代时在步骤S103中确定的初始值,或者是在后续迭代中的迭代循环的先前迭代中确定的值),
- [0108] • Θ_r 是第 r 透射RIS层的相移矩阵(是在第一次迭代时在步骤S103中确定的初始值,或者是在后续迭代中的迭代循环的先前迭代中确定的值),
- [0109] • f_r 是从第 $(r-1)$ 透射RIS层到第 r 透射RIS层的频域信道矩阵,

[0110] • g 是从最后透射RIS层到基站的频域信道矩阵,并且

[0111] • v 是组合向量(是在第一迭代时在步骤S103中确定的初始值,或在后续迭代中的迭代循环的先前迭代中确定的值)。

[0112] 如果多层RIS仅包括双层,则处理跳至步骤S111。如果多层RIS由三层或更多层组成,则在步骤S109中,处理器17更新其针对 θ_l 的值(其中, $l=2, \dots, R-1$), θ_l 是基于下面的等式1-9的多层RIS的每个中间透射层的相移矩阵及其所有其它可变参数的当前值(是在第一次迭代时在步骤S103中确定的初始值,或在后续迭代中的迭代循环的先前迭代中确定的值)。对于 θ_l ,SNR优化问题可以重新制定为:

$$[0113] \quad \text{SNR} = \frac{|v^H g^H (\prod_{r=R}^1 \Theta_r f_r) w|^2}{\|v^H\|_2^2 \sigma^2} = \frac{|v^H g^H (\prod_{r=R}^{l+1} \Theta_r f_r) \text{diag}(f_l (\prod_{r=l-1}^1 \Theta_r f_r) w) \theta_l|^2}{\|v^H\|_2^2 \sigma^2} \quad (1-8)$$

[0114] 因为 θ_l 是分量都具有范数1的向量,所以 θ_l 的最优值是

$$[0115] \quad \theta_l = \exp \left(j \arg \left(\text{diag}(f_l (\prod_{r=l-1}^1 \Theta_r f_r) w)^H (\prod_{r=R}^{l+1} \Theta_r f_r)^H g v \right) \right) \quad (1-9)$$

[0116] 其中:

[0117] • r 是1到 R 的集合中的元素,其中, R 是多层RIS中的透射RIS层的计数,

[0118] • l 是2至 $R-1$ 的集合中的元素,

[0119] • f_l 是从第 $(l-1)$ 透射RIS层到第 l 透射RIS层的频域信道矩阵,

[0120] • Θ_r 是第 r 透射RIS层的相移矩阵(是在第一次迭代时在步骤S103中确定的初始值,或者是在后续迭代中的迭代循环的先前迭代中确定的值),

[0121] • f_r 是当 r 等于1时从UE 11到第一透射RIS层的频域信道矩阵,并且是当 r 大于1时从第 $(r-1)$ 透射RIS层到第 r 透射RIS层的频域信道矩阵,

[0122] • w 是波束成形向量(是在第一迭代上在步骤S103中确定的初始值,或者是在后续迭代中的迭代循环的先前迭代中确定的值),

[0123] • g 是从最后透射RIS层到基站20的频域信道矩阵,并且

[0124] • v 是组合向量(是在第一迭代上在步骤S103中确定的初始值,或在后续迭代中的迭代循环的先前迭代中确定的值)。

[0125] 在步骤S111中,处理器17基于下面的等式1-11和其针对所有其它可变参数的当前值(在第一次迭代时是在步骤S103中确定的初始值,或者是在后续迭代中的迭代循环的前一次迭代中确定的值),更新其对于多层RIS的最后透射层的相移矩阵 θ_R 的值。对于 θ_R ,SNR优化问题可以重新制定为:

$$[0126] \quad \text{SNR} = \frac{|v^H g^H (\prod_{r=R}^1 \Theta_r f_r) w|^2}{\|v^H\|_2^2 \sigma^2} = \frac{|v^H g^H \text{diag}(f_R (\prod_{r=R-1}^1 \Theta_r f_r) w) \theta_R|^2}{\|v^H\|_2^2 \sigma^2} \quad (1-10)$$

[0127] 因为 θ_R 是分量都具有范数1的向量,所以 θ_R 的最优值是

$$[0128] \quad \theta_R = \exp(j \arg(\text{diag}(f_R (\prod_{r=R-1}^1 \Theta_r f_r) w)^H g v)) \quad (1-11)$$

[0129] 其中:

[0130] • r 是1到 R 的集合中的元素,其中, R 是多层RIS中的透射RIS层的计数,

[0131] • Θ_r 是第 r 个RIS层的相移矩阵(是在第一次迭代时在步骤S103中确定的初始值,或者是在后续迭代中的迭代循环的先前迭代中确定的值),

[0132] • f_r 是当 r 等于 1 时从 UE 11 到第一透射 RIS 层的频域信道矩阵, 并且是当 r 大于 1 时从第 $(r-1)$ 透射 RIS 层到第 r 透射 RIS 层的频域信道矩阵,

[0133] • w 是波束成形向量 (在第一迭代上是在步骤 S103 中确定的初始值, 或在后续迭代中的迭代循环的先前迭代中确定的值),

[0134] • g 是从最后透射 RIS 层到基站 20 的频域信道矩阵, 并且

[0135] • v 是组合向量 (是在第一迭代上在步骤 S103 中确定的初始值, 或在后续迭代中的迭代循环的先前迭代中确定的值)。

[0136] 在步骤 S113 中, 处理器 17 基于下面的等式 1-13 来更新其针对波束成形向量 w 的值以及其针对所有其它可变参数的当前值 (在第一次迭代时是在步骤 S103 中确定的初始值, 或者在后续迭代中的迭代循环的前一次迭代中确定的值)。归一化的 w (即 $\frac{w}{\|w\|_2}$) 的最优解为:

$$[0137] \quad \frac{w}{\|w\|_2} = \frac{(\prod_{r=R}^1 \Theta_r f_r)^H g v}{\|(\prod_{r=R}^1 \Theta_r f_r)^H g v\|_2} \quad (1-12)$$

[0138] 考虑约束 $\|w\|_2^2 \leq P_{\max}$, w 的最优解为

$$[0139] \quad w = \sqrt{P_{\max}} \frac{(\prod_{r=R}^1 \Theta_r f_r)^H g v}{\|(\prod_{r=R}^1 \Theta_r f_r)^H g v\|_2} \quad (1-13)$$

[0140] 其中:

[0141] • r 是 1 到 R 的集合中的元素, 其中, R 是多层 RIS 中的透射 RIS 层的计数,

[0142] • Θ_r 是第 r 透射 RIS 层的相移矩阵 (是在第一次迭代时在步骤 S103 中确定的初始值, 或者是在后续迭代中的迭代循环的先前迭代中确定的值),

[0143] • f_r 是当 r 等于 1 时从 UE 11 到第一透射 RIS 层的频域信道矩阵, 并且是当 r 大于 1 时从第 $(r-1)$ 透射 RIS 层到第 r 透射 RIS 层的频域信道矩阵,

[0144] • g 是从最后透射 RIS 层到基站 20 的频域信道矩阵, 并且

[0145] • v 是组合向量 (是在第一迭代上在步骤 S103 中确定的初始值, 或在后续迭代中的迭代循环的先前迭代中确定的值)。

[0146] 在步骤 S115 中, 处理器 17 使用针对当前迭代在以上步骤 S105 到 S113 中确定的 w 、 v 和 Θ_r 的值来估计从设备 10 到基站 20 的传输的 SNR。该 SNR 估计与迭代标识符一起被存储在存储器中。在步骤 S117 中, 处理器 17 评估 SNR 估计以确定是否满足收敛条件。在该实施方式中, 收敛条件是当前迭代的估计 SNR 与先前迭代的估计 SNR 之间的差小于或等于 1%。如果没有满足收敛条件 (例如当算法只有一次迭代时), 则过程循环回到步骤 S105 以执行进一步的迭代。一旦满足收敛条件, 则处理器 17 将 w 、 v 和 Θ_r 的最终值确定为在算法的最终迭代中产生的值。然后, 处理进行到步骤 S119, 在步骤 S119 中, 处理器 17 使 UE 11 在从设备 10 到基站 20 的无线信号传输中使用波束成形向量 w , 使多层 RIS 的每一层使用其相应的相移矩阵 Θ_r (即, 使第一透射 RIS 13 使用 Θ_1 , 并使第二透射 RIS 15 使用 Θ_2) 向传递通过该层的无线信号应用相移, 并且使得基站 20 使用组合向量 v 来接收从设备 10 发送到基站 20 的无线信号。

[0147] 在该实施方式中, 处理器 17 实现了用于 UE 和多层 RIS 的每一层的处理器模块, 其中, 处理模块被配置为在无线信号穿过多层 RIS 的层时将波束成形向量应用于 UE 的发射无

线信号或将相应的相移矩阵应用于无线信号。基站20还可以包括用于将组合向量应用于接收到的无线信号的处理模块。用于应用相移矩阵的处理模块可以基于现场可编程门阵列(FPGA)架构,其方式类似于Che Lui等人的“Programmable artificial intelligence machine for wave sensing and communications”中所描述的方式。

[0148] 随后,可以再次触发该过程(利用新的输入值,特别是对于 g),以确定 w 、 v 和 Θ_r 的新值。触发可以出现在来自基站或UE的指示 g 已被更新的信号中。

[0149] 总之,迭代算法可定义为:

[0150]	迭代算法
	输入:
	信道矩阵 $f_1, \dots, f_R$ 和 g ;
	最大发射功率 $P_{\max}$.
	输出:
	SNR的最大值.
	1: 初始化 $w, v, \Theta_1, \dots, \Theta_R$;
	2: while SNR不收敛 do
	3: 按照 (1-5) 更新 v ;
	4: 按照 (1-7) 更新 Θ_1 ;
	5: if $R > 2$, 按照 (1-9) 更新 $\Theta_2, \dots, \Theta_{R-1}$;
	6: 按照 (1-11) 更新 Θ_R ;
	7: 按照 (1-13) 更新 w ;
	8: end while
	9: return SNR

[0151] 当被应用于图2中的具有双层RIS的蜂窝网络时,上述方法的执行可以通过仿真来评估,如图4a、图4b、图4c和图5所示。

[0152] 图4a示出了图2的蜂窝电信网络1的仿真,其中,UE包括ULA中的两个天线,多层透射RIS包括双层,每层具有64个元件,并且基站包括ULA中的6个天线。UE与多层RIS的第一层相隔0.05m,多层RIS的第一层与多层RIS的第二层相隔0.05m,多层RIS的第二层与基站相隔20m(使得UE与基站相隔20.1m)。UE以1.5GHz的频率发射。当无线信号穿过多层RIS的每一层时的损耗因子是0.8。

[0153] 图4b为了比较的目的示出了另选的蜂窝电信网络的仿真,其中,UE在ULA中包括两个天线,RIS是具有256个元件的单层RIS,并且基站在ULA中包括6个天线。UE与单层RIS相隔0.05m,单层RIS与基站相隔20.05m(使得UE与基站仍然相隔20.1m)。UE以1.5GHz的频率发射。该仿真可用于单层透射RIS(其中当无线信号通过单层透射RIS时的损耗因子为0.8)或单层反射RIS,因为信道模型是相同的。

[0154] 为了比较的目的,图4c示出了另一另选蜂窝电信网络的仿真,其中,UE在ULA中包括两个天线,并且基站在ULA中包括6个天线。在该另选网络中没有RIS。UE和基站仍然相隔20.1m。

[0155] 图5是示出对于由如下这些仿真所覆盖的四种情况的解码SNR相对于功率约束 $P_{\max}$ 的图:1)不具有RIS的备选网络;2)具有单层透射RIS的备选网络;3)具有单层反射RIS的备选网络;以及4)本发明的具有双层透射RIS的网络的第一实施方式。可以看出,本发明实施

方式的蜂窝网络具有最佳的无线通信性能,其SNR改进比次最佳执行情况(具有单层反射RIS的备选网络)的SNR高约4dB。具有单层透射RIS方案的备选网络的SNR比具有单层反射RIS的备选网络的SNR低约2dB,并且不具有RIS的备选网络是性能最差的方案。这些仿真结果说明了由本发明的上述实施方式提供的无线通信性能相对于传统的基于RIS的网络的改进。此外,这些仿真是基于与单层反射RIS和单层透射RIS相比具有一半元件数量的双层RIS,说明了本发明的成本效率和功率效率益处(因为RIS的材料成本和功率要求与元件数量成比例)。

[0156] 双层透射RIS相对于单层RIS结构的益处也可以通过回顾每个架构的功率分布来理解。图6a包括单层透射RIS的功率分布图,并且图6b包括双层透射RIS的第一层的第一功率分布图和双层透射RIS的第二层的第二功率分布图。通过比较图6a和图6b可以看出,与双层透射RIS相比,单层透射RIS的RIS元件利用率相对较低。换句话说,与双层透射RIS的两个层的元件的比例相比,仅使用单层透射RIS的元件的一小部分。从图6b还可以看出,双层透射RIS的第二层上的功率分布与第一层相比相对平滑。

[0157] 在上述实施方式中,处理器通过有线连接与UE和多层RIS的每一层通信。然而,这不是必需的,并且处理器可以经由无线连接与UE和多层RIS的每一层通信。本发明的方法的步骤由单个处理器执行也是非必要的。也就是说,可以由UE、由基站、由外部节点、或以分布式方式,利用各种元件之间的适当的有线或无线通信链路来执行处理。

[0158] 本领域技术人员还将理解,本发明可以应用于下行链路通信(即,从基站到UE),其中,UE通过多层RIS的每一层接收下行链路通信。此外,本发明不限于蜂窝电信示例,使得它可以应用于其它形式的无线电信网络中的发射机与接收机之间的无线信号,如无线局域网或无线广域网的发射机与接收机之间的无线信号。然而,当应用于从低功率和/或低成本设备(例如UE)发射的无线信号时,本发明具有特别的益处,其中,常规波束成形技术成本过高和/或资源密集。此外,本领域技术人员将理解,本发明可以应用于从单个发射机到多个接收机的传输。

[0159] 在上述实施方式中,UE在ULA中具有两个天线,基站在ULA中具有六个天线。本领域技术人员将理解这是非必要的并且不同的天线配置是可能的。也就是说,UE与多层RIS的第一透射RIS层之间的信道矩阵是足够静态的,使得可以在安装时测量和记录信道矩阵,并且此后在算法中使用。此外,最后透射RIS层与基站之间的信道矩阵是足够远的场,使得它不受天线配置的改变的影响,并且在任何情况下都由信道估计过程来测量。

[0160] 本领域技术人员还将理解,本发明不限于优化SNR性能,并且可以使用其它无线通信性能度量,诸如等待时间或吞吐量。

[0161] 在上述实施方式中,多层透射RIS的每一层具有相同数量的元件。本领域技术人员将理解,本发明不限于这种方式,并且可以应用于其中一个或多个层具有不同数量的元件的多层RIS。这将仅仅导致矩阵尺寸的改变,并且潜在地导致设备壳体形状的改变(例如,从立方体形状到喇叭形结构)。

[0162] 本领域技术人员将理解,在所要求保护的本发明的范围内,特征的任何组合都是可能的。

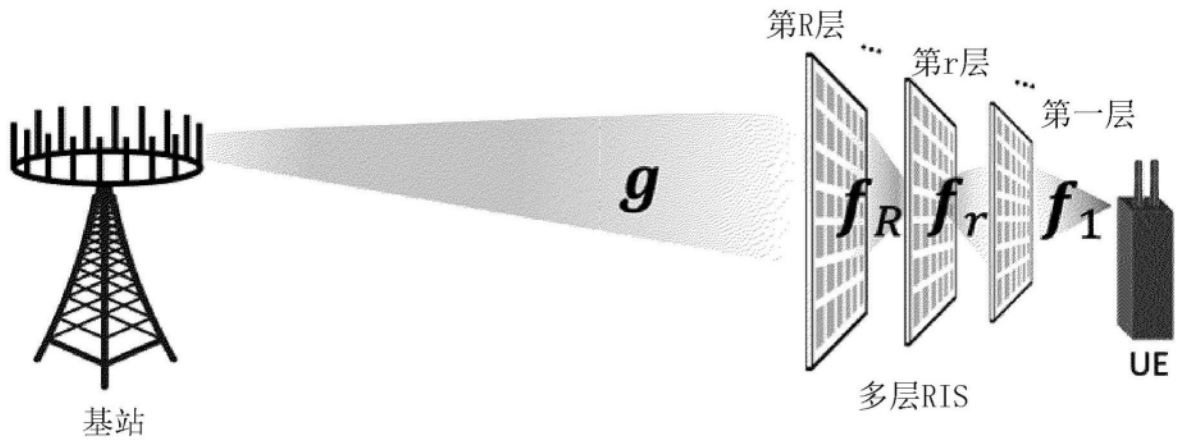


图1

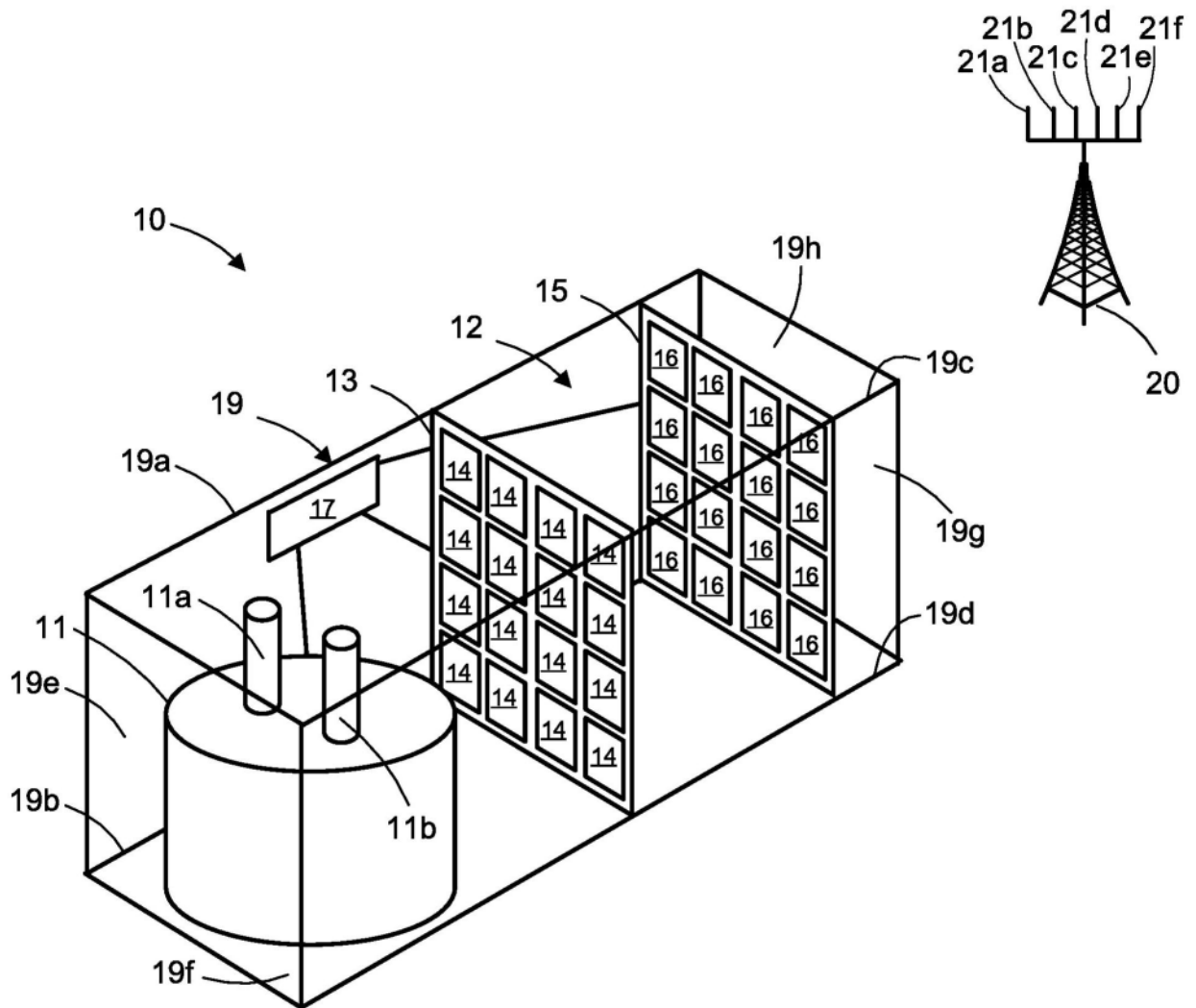


图2

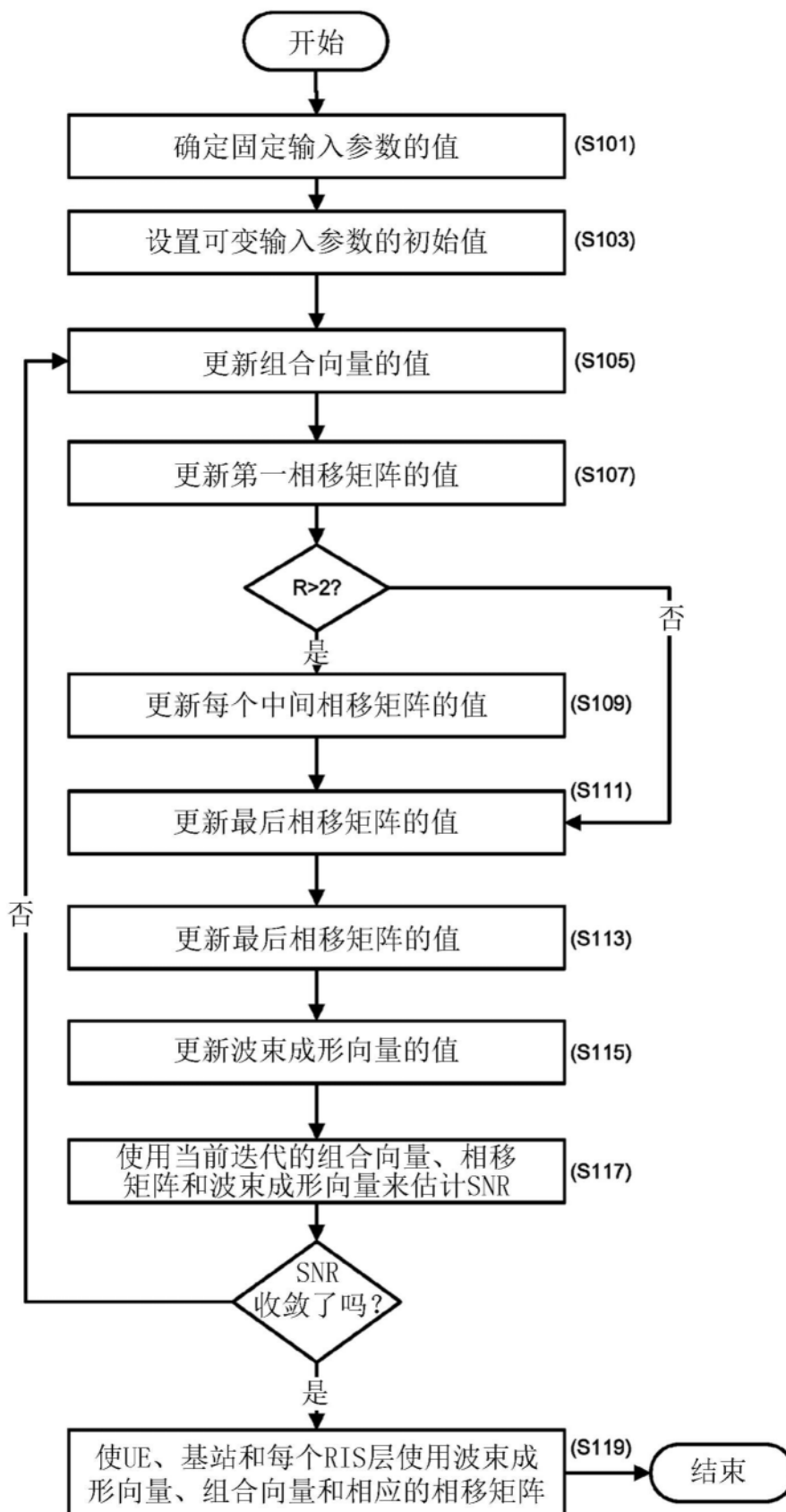


图3

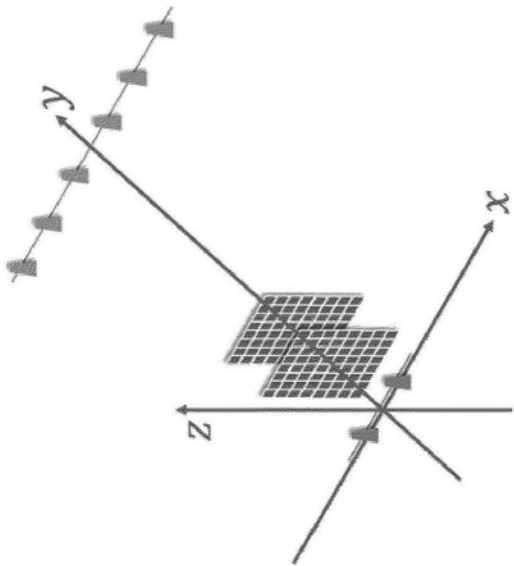


图4a

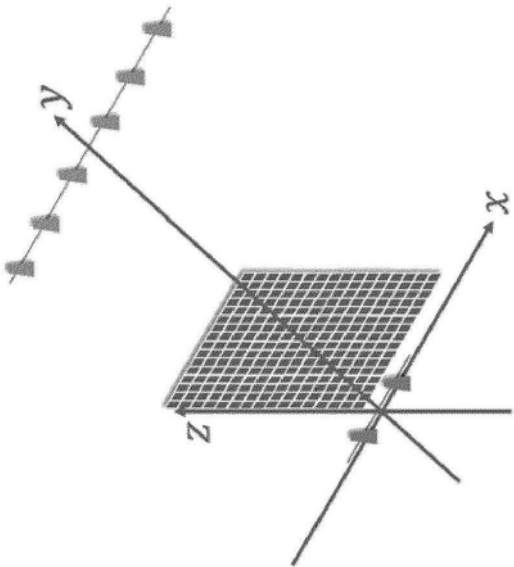


图4b

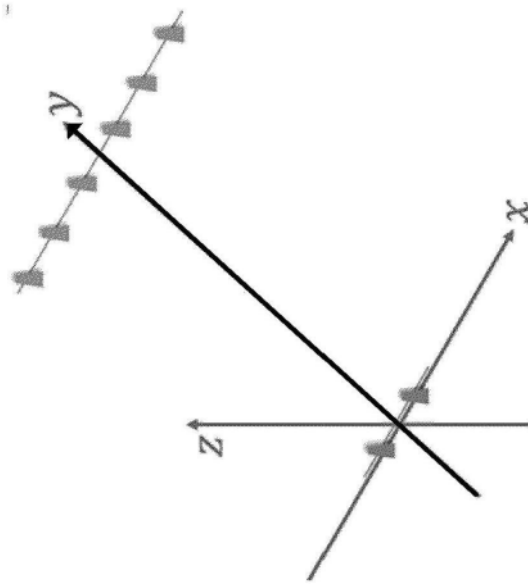


图4c

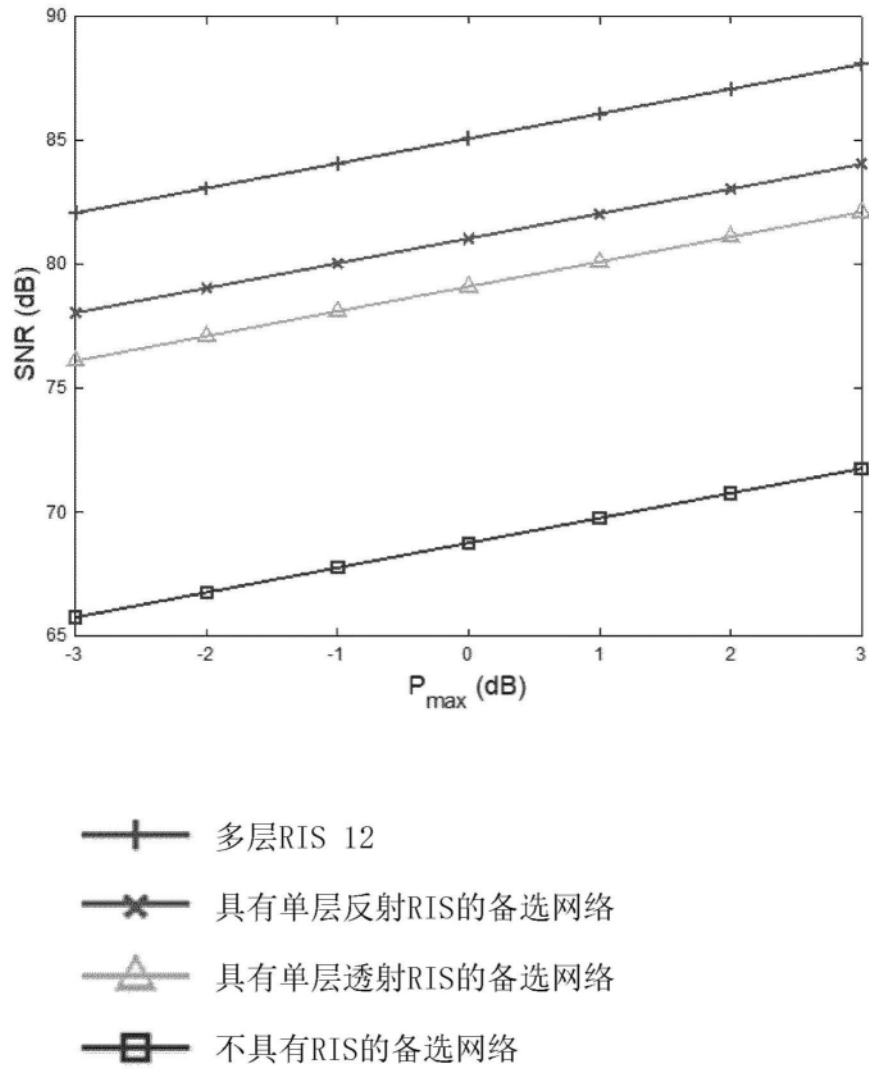


图5

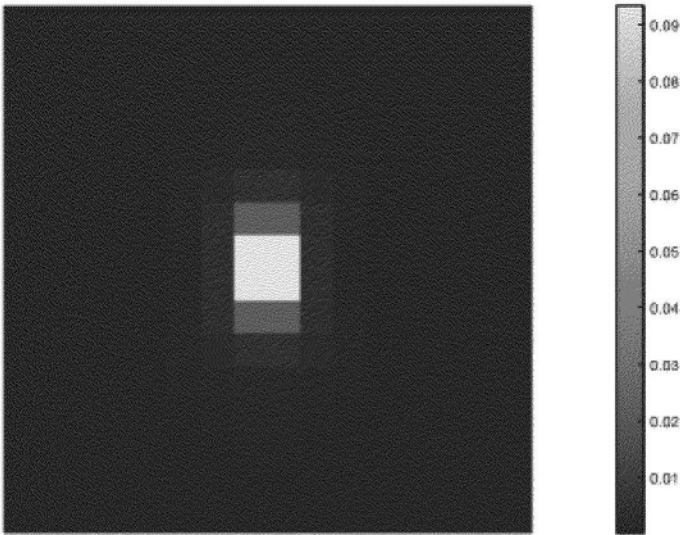


图6a

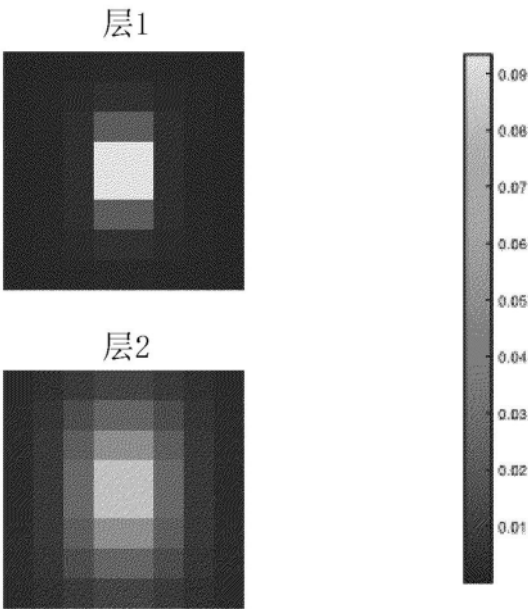


图6b