

(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
2020 年 12 月 17 日 (17.12.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/248443 A1

(51) 国际专利分类号:
H04B 7/06 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2019/110029

(22) 国际申请日: 2019 年 10 月 9 日 (09.10.2019)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201910514808.4 2019 年 6 月 14 日 (14.06.2019) CN
201910864046.0 2019 年 9 月 12 日 (12.09.2019) CN

(71) 申请人: 清华大学 (TSINGHUA UNIVERSITY)
[CN/CN]; 中国北京市海淀区清华大学,
Beijing 100084 (CN)。

(72) 发明人: 刘羽 (LIU, Yu); 中国北京市海淀区清华大学, Beijing 100084 (CN)。周世东 (ZHOU, ShiDong); 中国北京市海淀区清华大学, Beijing 100084 (CN)。

(74) 代理人: 西安智大知识产权代理有限公司 (XI'AN CYDA INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY); 中国陕西省西安市雁塔区

科技路 195 号世纪颐园 A707, 段俊涛,
Shaanxi 710075 (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, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, 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)。

(54) **Title:** TWO-DIMENSIONAL PHASED ANTENNA ARRAY-BASED RAPID AND ACCURATE BEAM TRACKING METHOD

(54) 发明名称: 一种基于二维相控天线阵列的快速精确波束跟踪方法

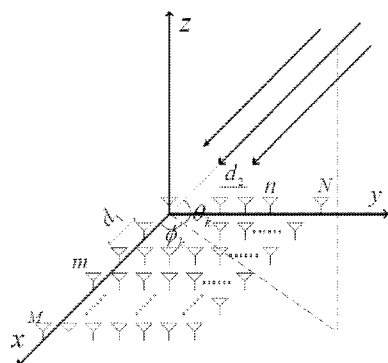


图 1

(57) **Abstract:** The present invention provides a two-dimensional phased antenna array-based rapid and accurate beam tracking method. The method is suitable for millimeter wave mobile communication. By dividing a time-varying channel into three situations, i.e., a quasi-static scene, a dynamic type I, and a dynamic type II, the method uses the optimized detection direction and tracks channel parameters under each situation according to a random Newton's method. The advantage of the method is that it can achieve the minimum pilot overhead of the joint tracking of the two-dimensional beam direction and the channel coefficient. For the quasi-static scene and the dynamic type I, the performance of the method can approach the Cramer-Rao lower bound of the tracking error. For the dynamic type II, the method can achieve higher tracking accuracy and faster tracking speed.

(57) **摘要:** 本发明提出了一种基于二维相控天线阵列的快速精确波束跟踪方法, 本方法适用于毫米波移动通信。通过将时变信道划分为准静态场景、动态I型和动态II型三种情形, 该方法采用优化后的探测方向, 根据随机牛顿法跟踪每种情形下的信道参量。该方法的优点在于: 能实现二维波束方向和信道系数联合跟踪的最小导频开销; 针对准静态场景和动态I型, 该方法的性能可以逼近跟踪误差的克拉美罗下界; 针对动态II型, 该方法能实现更高的跟踪精度和更快的跟踪速度。

根据细则4.17的声明：

- 关于发明人身份(细则4.17(i))
- 关于申请人有权申请并被授予专利(细则4.17(ii))
- 关于申请人有权要求在先申请的优先权(细则4.17(iii))
- 发明人资格(细则4.17(iv))

本国际公布：

- 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

一种基于二维相控天线阵列的快速精确波束跟踪方法

技术领域

本发明属于通信技术领域，涉及毫米波移动通信，特别涉及一种基于二维相控天线阵列的快速精确波束跟踪方法。

背景技术

巨大的带宽优势使得毫米波通信具有广阔的应用前景。由于波长较短，毫米波通信系统常常配备大规模的天线以实现高阵列增益，这使得毫米波波束很窄，轻微的对不准就可能造成巨大的能量损失。在信道变化很慢的静态场景或准静态场景下，波束对准可以通过导频训练的方式来实现，这会占用巨大的导频资源。然而，在信道快速变化的场景下，无法直接通过导频训练的方式实现对准。因此，移动场景下用尽可能少的导频开销实现精确的波束跟踪是必要的。

同时，随着天线数目的增多和载频的提高，毫米波通信中采用全数字波束成形架构的硬件开销和能量损耗都巨大无比。一种经济可行的解决方式是采用模拟波束成形架构。当采用模拟波束成形架构时，接收机每次只能获得一个特定方向的观测，所选取的探测波束成形矢量会对系统性能产生很大的影响。因此，如何选取探测波束成形矢量，从而实现对波束的精确跟踪，是快速移动场景下毫米波通信的重要问题。

针对移动场景下的毫米波波束跟踪问题，已存在一系列的研究算法。通过利用毫米波信道的稀疏特性，一种基于压缩感知的算法被提出。然而，这种算法主要针对静态或准静态场景设计，在快速移动的场景中算法性能较差。IEEE 802.11ad 中提出了一种简单的动态跟踪算法，它基于接收到的信号强度，在当前波束和相邻波束间切换。有人把卡尔曼滤波的思想应用到了波束跟踪问题中，以波束方向和信道系数作为系统状态，应用扩展卡尔曼滤波的方法进行跟踪。然而，这些方法都没有对探测波束成形矢量进行优化，在模拟波束成形架构中，

跟踪的性能跟选取的探测波束成形矢量密切相关，没有优化探测波束成形矢量使得这些算法的跟踪精度都不够高。基于一维天线阵列，一种信道系数和波束方向联合跟踪的算法被提出，并且对探测波束成形矢量进行了优化。然而，该算法只能支持一维波束方向的跟踪，在诸如无人机通信的很多场景下，波束方向可能从不同的水平和垂直方向到达，因此，需要对二维的波束方向同时进行跟踪。

发明内容

为了克服上述现有技术的缺点，本发明的目的在于提供一种基于二维相控天线阵列的快速精确波束跟踪方法，其采用的导频开销要尽可能小，要对探测波束成形矢量进行优化，以实现尽可能高的跟踪精度和尽可能快的跟踪速度。

为了实现上述目的，本发明采用的技术方案是：

一种基于二维相控天线阵列的快速精确波束跟踪方法，其特征在于，周期式交替地工作在探测和通信模式，在一个探测通信周期内的探测时段，波束依次指向若干个探测方向，通信阶段波束指向当时估计出的波束方向。

波束跟踪方法包括如下步骤：

步骤 A，根据信道的时变特性，将信道划分为三种类型：1) 准静态场景；2) 动态 I 型；3) 动态 II 型。确定待跟踪的信道属于哪种类型；

步骤 B，在每个探测通信周期的探测时段，基于步骤 A 中确定的信道类型，依照对应于三种类型的波束跟踪方法，确定依次探测的方向，根据探测结果及历史上记录的信息，获得信道系数和波束方向的估值；

步骤 C，将波束指向步骤 B 中获得的波束方向估值进行通信。

步骤 A 中，准静态场景是指信道系数和波束方向都变化很慢的情况：

$\beta_k \approx \beta_{k-1}$, $\mathbf{x}_k \approx \mathbf{x}_{k-1}$ 。其中 β_k 指第 k 个探测通信周期的信道系数， $\mathbf{x}_k$ 指第 k 个探测通信周期的方向参数矢量：

$$\mathbf{x}_k = [x_{k,1}, x_{k,2}]^T = \left[\frac{Md_1 \cos(\theta_k) \cos(\phi_k)}{\lambda}, \frac{Nd_2 \cos(\theta_k) \sin(\phi_k)}{\lambda} \right]^T, \quad x_{k,1}, x_{k,2} \text{ 分别为}$$

二维方向参数矢量 $\mathbf{x}_k$ 两个维度的值, θ_k, ϕ_k 分别指第 k 个探测通信周期到达波束方向的俯仰角和方位角。 M, N 为二维面阵天线的两个方向维度的天线数目, d_1, d_2 为面阵天线两个方向维度上的相邻天线间距, λ 为毫米波波长。

步骤 A 中, 动态 I 型是指信道系数快速变化, 波束方向变化很慢的情况:

$$\beta_k \neq \beta_{k-1}, \mathbf{x}_k \approx \mathbf{x}_{k-1}。$$

步骤 A 中, 动态 II 型是指信道系数和波束方向都快速变化的情况:

$$\beta_k \neq \beta_{k-1}, \mathbf{x}_k \neq \mathbf{x}_{k-1}。$$

步骤 B 中, 针对准静态场景的跟踪步骤如下:

步骤 11, 获得在真实波束主瓣范围的初始方向估计以及信道系数的初始估计。采用的初始估测方法可包括但不限于波束扫描: 在 1 个探测通信周期内, 发送 $M \times N$ 个导频, 利用这些导频, 进行 $M \times N$ 个不同方向的探测。根据正交匹配跟踪 (Orthogonal Matching Pursuit, OMP) 算法, 获得信道系数和波束方向的初始估计;

步骤 12, 在每个探测通信周期的探测时段, 依次发送 3 个导频, 进行 3 次不同方向的探测。探测的方向为上一次估测的方向加上三组固定偏移量 $\Delta_{S,1}, \Delta_{S,2}, \Delta_{S,3}$, 这三组偏移量位于二维平面的一个环上: $0.4 \leq |\Delta_{S,i}| \leq 0.6, i = 1, 2, 3$ 。三组偏移量可依据要跟踪的目标进行优化, 优化目标包括但不限于信道矢量的均方误差, 方向参数矢量的均方误差。

步骤 13, 基于探测结果及历史上记录的信息, 利用随机迭代法更新估测值。采用的随机迭代法可包括但不限于随机牛顿法。

步骤 B 中, 针对动态 I 型, 只跟踪波束方向。

步骤 B 中, 针对动态 I 型的跟踪步骤如下:

步骤 21, 获得在真实波束主瓣范围的初始方向估计。采用的初始估测方法可包括但不限于波束扫描: 在前 L 个探测通信周期内, 每个探测通信周期发送 $M \times N$ 个导频, 利用这些导频, 每个探测通信周期进行 $M \times N$ 个不同方

向的探测。 L 的选取要保证在第 L 个探测通信周期接收到的 $M \times N$ 个不同探测方向的最大信号能量大于某个阈值。然后利用第 L 个探测通信周期的探测结果,获得波束方向的初始估计。

步骤22,在每个探测通信周期的探测时段,依次发送3个导频,进行3次不同方向的探测。探测的方向为上一次估测的方向加上三组固定偏移量 $\Delta_{DI,1}, \Delta_{DI,2}, \Delta_{DI,3}$,这三组偏移量位于二维平面的一个环上 $0.5 \leq |\Delta_{DI,i}| \leq 0.7, i=1,2,3$ 。三组偏移量可依据要跟踪的目标进行优化,优化目标包括但不限于方向参数矢量的均方误差。

步骤23,基于探测结果及历史上记录的信息,利用随机迭代法更新估测值。采用的随机迭代法可包括但不限于随机牛顿法。

步骤B中,针对动态II型的跟踪步骤如下:

步骤31,获得在真实波束主瓣范围的初始方向估计以及信道系数的初始估计。采用的初始估测方法可包括但不限于波束扫描:在1个探测通信周期内,依次发送 $M \times N$ 个导频,利用这些导频,进行 $M \times N$ 个不同方向的探测。根据OMP算法,获得信道系数和波束方向的初始估计。

步骤32,在每个探测通信周期的探测时段,依次发送3个导频,进行3次不同方向的探测。探测的方向为上一次估测的方向加上三组固定偏移量 $\Delta_{DII,1}, \Delta_{DII,2}, \Delta_{DII,3}$,这三组偏移量位于二维平面的一个环上: $0.4 \leq |\Delta_{DII,i}| \leq 0.6, i=1,2,3$ 。三组偏移量可依据要跟踪的目标进行优化,优化目标包括但不限于信道矢量的均方误差,方向参数矢量的均方误差。

步骤33,基于探测结果及历史上记录的信息,利用随机迭代法更新估测值。采用的随机迭代法可包括但不限于随机牛顿法。

与现有技术相比,本发明的有益效果是:

- (1)实现了二维信道系数和波束方向联合跟踪的最小导频开销。
- (2)在静态场景和动态I型中,该方法能渐近达到二维波束跟踪误差的克拉

美罗下界（CRLB）。

(3)在动态 II 型中，相比已有技术，该跟踪方法能实现更高的跟踪精度和更快的跟踪速度。

附图说明

图 1 为根据本发明一个实施例的二维相控天线阵列结构示意图。

图 2 为根据本发明一个实施例的准静态场景下波束跟踪方法的帧结构。

图 3 为根据本发明一个实施例的准静态场景下波束跟踪探测方向的最优偏移示例图。

图 4 为根据本发明一个实施例的准静态场景下波束跟踪方法性能仿真图。

图 5 为根据本发明一个实施例的动态 I 型波束跟踪方法的帧结构。

图 6 为根据本发明一个实施例的动态 I 型波束跟踪探测方向的最优偏移示例图。

图 7 为根据本发明一个实施例的动态 I 型波束跟踪方法性能仿真图。

图 8 为根据本发明一个实施例的动态 II 型波束跟踪方法性能仿真图。

具体实施方式

下面详细描述本发明的实施例，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。

本方法研究接收端的跟踪问题，发射端的跟踪可以通过信道互易性实现。

考虑如图 1 所示的二维相控阵列天线接收机：平面天线阵列由 $M \times N$ 个分布在矩形区域内的阵子构成， x （ y ）轴方向相邻阵子之间的距离为 d_1 （ d_2 ）。接收机采用模拟波束成形架构，每一个阵子通过单独的移相器连接到同一个射频链路上。本实施例中，信道在探测通信周期内保持不变。在每个探测通信周期的探测时段，发射机发射 q 个相同的已知导频 s_p ，用以估测信道系数和到达的波束方向。

毫米波散射效应较弱，信道中仅仅存在一条直射径和少量的反射径。由于角度扩展很小，多径之间的相互干扰相当微弱。因此，可以独立地跟踪多径中的每一径。本实施例重点研究一径的跟踪方法，其它多径可以通过相同的方法独立跟踪。在第 k 个探测通信周期，要研究的该径到达波束方向为 (θ_k, ϕ_k) ，其中 θ_k 为到达波束方向的俯仰角， ϕ_k 为到达波束方向的方位角。这一径的信道矢量可以表示为

$$\mathbf{h}_k = \beta_k \mathbf{a}(\mathbf{x}_k), \quad (1)$$

其中 $\beta_k = \beta_k^{\text{re}} + j\beta_k^{\text{im}}$ 为复信道系数，

$\mathbf{x}_k = [x_{k,1}, x_{k,2}]^T = \left[\frac{Md_1 \cos(\theta_k) \cos(\phi_k)}{\lambda}, \frac{Nd_2 \cos(\theta_k) \sin(\phi_k)}{\lambda} \right]^T$ 为由 (θ_k, ϕ_k) 决定的方向参数矢量， $\mathbf{a}(\mathbf{x}_k)$ 为导向矢量

$$\mathbf{a}(\mathbf{x}_k) = [a_{11}(\mathbf{x}_k) \cdots a_{1N}(\mathbf{x}_k) a_{21}(\mathbf{x}_k) \cdots a_{MN}(\mathbf{x}_k)]^T, \quad (2)$$

其中 $a_{mn}(\mathbf{x}_k) = e^{j2\pi \left(\frac{m-1}{M} x_{k,1} + \frac{n-1}{N} x_{k,2} \right)}$ ， λ 为毫米波波长。

在第 k 个探测通信周期的探测时段，用 $\mathbf{w}_{k,i}$ ($i = 1, \dots, q$) 表示接收第 i 个导频符号所用的探测波束成形矢量，考虑 $\mathbf{w}_{k,i}$ 也具有导向矢量的形式，

$$\mathbf{w}_{k,i} = \frac{1}{\sqrt{MN}} \mathbf{a}(\gamma_{k,i}), \quad (3)$$

其中 $\gamma_{k,i}$ 表示对应于 $\mathbf{w}_{k,i}$ 的探测方向矢量，通过改变 $\gamma_{k,i}$ 可以调整接收机的探测方向。在移相和合并后，接收机最终获得的基带输出信号为

$$y_{k,i} = \mathbf{w}_{k,i}^H \mathbf{h}_k s_p + z_{k,i} = s_p \beta_k \mathbf{w}_{k,i}^H \mathbf{a}(\mathbf{x}_k) + z_{k,i}, \quad (4)$$

其中 $z_{k,i} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_z^2)$ 为复循环高斯随机变量。定义 $\boldsymbol{\psi}_k \triangleq [\beta_k^{\text{re}}, \beta_k^{\text{im}}, x_{k,1}, x_{k,2}]^T$ 为第 k 个探测通信周期的信道参数矢量， $\mathbf{W}_k \triangleq [\mathbf{w}_{k,1} \cdots \mathbf{w}_{k,q}]^T$ 为探测波束成形矩阵， $\mathbf{z}_k \triangleq [z_{k,1} \cdots z_{k,q}]^T$ 为噪声矢量，则可将 (4) 中接收机获得的基带输出信号重写为

$$\mathbf{y}_k = s_p \beta_k \mathbf{W}_k^H \mathbf{a}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{z}_k. \quad (5)$$

在准静态场景、动态 I 型和动态 II 型场景下，要保证利用每个探测通信周期的探测结果获得信道参数矢量的唯一估计，所需的最小导频开销均为每探测通信周期 3 个导频，因此 $q = 3$ 。

接下来给出不同信道变化场景下的波束跟踪方法。

1) 准静态场景

该场景下，信道系数和波束方向都变化很慢，可近似为 $\beta_k = \beta, \mathbf{x}_k = \mathbf{x}$ ，因此 $\boldsymbol{\psi}_k = \boldsymbol{\psi} \triangleq [\beta^{\text{re}}, \beta^{\text{im}}, x_1, x_2]^T$ 。此时观测矢量 $\mathbf{y}_k$ 的条件概率密度函数为

$$p_S(\mathbf{y}_k | \boldsymbol{\psi}, \mathbf{W}_k) = \frac{1}{\pi^3 \sigma_z^6} e^{-\frac{\|\mathbf{y}_k - s_p \beta \mathbf{W}_k^H \mathbf{a}(\mathbf{x})\|_2^2}{\sigma_z^2}}. \quad (6)$$

用 $\boldsymbol{\varsigma}_S = (\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \dots, \hat{\boldsymbol{\psi}}_1, \hat{\boldsymbol{\psi}}_2, \dots)$ 表示一种信道系数和波束方向的跟踪策略，考虑特定的因果跟踪策略集合 Ξ_S ：第 k 个探测通信周期的探测波束成形矩阵 $\mathbf{W}_k$ 和系统估计 $\hat{\boldsymbol{\psi}}_k$ 均由以前使用的探测波束成形矩阵 $\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \dots, \mathbf{W}_{k-1}$ 和历史观测 $\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_k$ 决定。因此，在第 k 个探测通信周期，信道系数和波束方向的跟踪问题可以公式化为：

$$\min_{\boldsymbol{\varsigma}_S \in \Xi_S} \frac{1}{MN} \mathbb{E} \left[\|\hat{\mathbf{h}}_k - \mathbf{h}\|_2^2 \right] \quad (7)$$

$$\text{s.t. } \mathbb{E}[\hat{\mathbf{h}}_k] = \mathbf{h}, \quad (8)$$

$$\mathbf{w}_{k,i} = \frac{1}{\sqrt{MN}} \mathbf{a}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \boldsymbol{\Delta}_{S,i}), \quad (9)$$

其中约束 (8) $\text{s.t. } \mathbb{E}[\hat{\mathbf{h}}_k] = \mathbf{h}$ ，(8) 确保 $\hat{\mathbf{h}}_k \triangleq \hat{\beta}_k \mathbf{a}(\hat{\mathbf{x}}_k)$ 是信道矢量 $\mathbf{h} \triangleq \beta \mathbf{a}(\mathbf{x})$ 的无偏估计，约束 (9) 确保每个探测通信周期的探测方向为上一次估测的方向加上三组固定偏移量。

在准静态场景下，本实施例设计一种两阶段的跟踪方案：波束和信道联合跟踪 (Joint Beam and Channel Tracking, JBCT)，具体如下：

(i) 粗波束扫描。如图 2 所示, 在一个探测通信周期内, 接收机依次接收 $M \times N$ 个导频, 对应于观测 $\tilde{y}_{mn}$ 的探测波束成形矢量为

$$\tilde{\mathbf{w}}_{mn} = \frac{1}{\sqrt{MN}} \mathbf{a} \left(\left[(2m-1-M) \frac{d_1}{\lambda}, (2n-1-N) \frac{d_2}{\lambda} \right]^T \right), m=1, \dots, M, \quad n=1, \dots, N; \text{ 信道系数和波}$$

束方向的初始估计如下所示:

$$\hat{\mathbf{x}}_0 = \arg \max_{\hat{\mathbf{x}} \in \mathcal{L}} \left| \mathbf{a}(\hat{\mathbf{x}})^H \tilde{\mathbf{W}} \tilde{\mathbf{y}} \right|, \quad \hat{\beta}_0 = \left[\tilde{\mathbf{W}}^H \mathbf{a}(\hat{\mathbf{x}}_0) \right]^+ \tilde{\mathbf{y}}, \quad (10)$$

其中 $\mathbf{x} = \left\{ \left[\frac{(2m-1-M_0)Md_1}{\lambda M_0}, \frac{(2n-1-N_0)Nd_2}{\lambda N_0} \right]^T \middle| \begin{matrix} m=1, \dots, M_0 \\ n=1, \dots, N_0 \end{matrix} \right\}$, 采用的码本尺寸为

$$M_0 \times N_0 (M_0 \geq M, N_0 \geq N), \quad \tilde{\mathbf{y}} = [\tilde{y}_{11} \dots \tilde{y}_{1N} \tilde{y}_{21} \dots \tilde{y}_{MN}]^T, \quad \tilde{\mathbf{W}} = [\tilde{\mathbf{w}}_{11} \dots \tilde{\mathbf{w}}_{1N} \tilde{\mathbf{w}}_{21} \dots \tilde{\mathbf{w}}_{MN}]^T,$$

$$\mathbf{X}^+ = (\mathbf{X}^H \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^H.$$

(ii) 信道系数和波束方向联合跟踪。在第 k 个探测通信周期的探测时段, 接收机依次接收 3 个导频, 所采用的 3 个探测波束成形矢量如下所示:

$$\mathbf{w}_{k,i} = \frac{1}{\sqrt{MN}} \mathbf{a}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \tilde{\Delta}_{S,i}^*), \quad i=1,2,3, \quad (11)$$

其中 $\hat{\mathbf{x}}_k = [\hat{x}_{k,1}, \hat{x}_{k,2}]^T$, $\tilde{\Delta}_{S,i}^*$ 是准静态场景下天线数目趋于无穷时渐近最优的探测方向偏移, 由图 3 和表 1 给出:

表 1 准静态场景下渐近最优的探测偏移

$\tilde{\Delta}_{S,1}^*$	$\tilde{\Delta}_{S,2}^*$	$\tilde{\Delta}_{S,3}^*$
$[-0.0963, 0.5098]^T$	$[-0.2906, -0.2906]^T$	$[-0.5098, -0.0963]^T$

信道参数矢量估测 $\hat{\boldsymbol{\psi}}_k = [\hat{\beta}_k^e, \hat{\beta}_k^{\text{im}}, \hat{x}_{k,1}, \hat{x}_{k,2}]^T$ 由随机牛顿法更新:

$$\hat{\Psi}_k = \hat{\Psi}_{k-1} + \frac{2}{\sigma^2} b_{S,k} \mathbf{I}_S(\hat{\Psi}_{k-1}, \mathbf{W}_k)^{-1} \begin{bmatrix} \text{Re}\{s_p^H \mathbf{e}_k^H (\mathbf{y}_k - \hat{\mathbf{y}}_k)\} \\ \text{Im}\{s_p^H \mathbf{e}_k^H (\mathbf{y}_k - \hat{\mathbf{y}}_k)\} \\ \text{Re}\{s_p^H \tilde{\mathbf{e}}_{k1}^H (\mathbf{y}_k - \hat{\mathbf{y}}_k)\} \\ \text{Re}\{s_p^H \tilde{\mathbf{e}}_{k2}^H (\mathbf{y}_k - \hat{\mathbf{y}}_k)\} \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中 $\mathbf{e}_k = \mathbf{W}_k^H \mathbf{a}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})$, $\hat{\mathbf{y}}_k = s_p \hat{\beta}_{k-1} \mathbf{W}_k^H \mathbf{a}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})$, $\tilde{\mathbf{e}}_{k1} = \hat{\beta}_{k-1} \mathbf{W}_k^H \frac{\partial \mathbf{a}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})}{\partial x_1}$, $\tilde{\mathbf{e}}_{k2} = \hat{\beta}_{k-1} \mathbf{W}_k^H \frac{\partial \mathbf{a}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})}{\partial x_2}$,

$b_{S,k} = \frac{1}{k}$ 是跟踪步长。Fisher 信息矩阵 $\mathbf{I}_S(\hat{\Psi}_{k-1}, \mathbf{W}_k)$ 定义如下

$$\mathbf{I}_S(\hat{\Psi}_{k-1}, \mathbf{W}_k) \triangleq \frac{2|s_p|^2}{\sigma_z^2} \text{Re}\{\mathbf{V}_k^H \mathbf{W}_k \mathbf{W}_k^H \mathbf{V}_k\}. \quad (13)$$

$$\mathbf{V}_k \triangleq \left[\mathbf{a}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}), j\mathbf{a}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}), \hat{\beta}_{k-1} \frac{\partial \mathbf{a}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})}{\partial x_1}, \hat{\beta}_{k-1} \frac{\partial \mathbf{a}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})}{\partial x_2} \right]. \quad (14)$$

设置系统参数为：天线数目 $M = N = 8$ ，天线间距 $d_1 = d_2 = \frac{\lambda}{2}$ ，粗波束扫描

的码本尺寸 $M_0 = 2M, N_0 = 2N$ ，导频符号 $s_p = 1$ ，发射信噪比 $\frac{|s_p|^2}{\sigma_z^2} = 5\text{dB}$ 。

波束方向服从均匀分布： $\theta \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right], \phi \in (-\pi, \pi]$ ，信道系数服从莱斯分布，莱斯因子为 15dB。进行 1000 次系统仿真后取平均得到的结果如图 4 所示，可以看出，所提出的跟踪方法能够渐近到达信道矢量均方误差的最小 CRLB，跟踪精度远高于已有算法。

2) 动态 I 型

该场景下，信道系数快速变化，但波束方向都变化很慢，可近似为 $\mathbf{x}_k = \mathbf{x}$ 。

本实施例中 β_k 服从 Rayleigh 分布，且 $\mathbb{E}[|\beta_k|^2] = \sigma_\beta^2$ 。此时观测矢量 $\mathbf{y}_k$ 的条件概率密度函数为

$$p_{DI}(\mathbf{y}_k | \mathbf{x}, \mathbf{W}_k) = \frac{1}{\pi^3 |\Sigma_y(\mathbf{x})|} e^{-\mathbf{y}_k^H \Sigma_y^{-1}(\mathbf{x}) \mathbf{y}_k}, \quad (15)$$

其中 $\Sigma_y(\mathbf{x})$ 为观测矢量 $\mathbf{y}_k$ 的协方差矩阵:

$$\Sigma_y(\mathbf{x}) = \mathbb{E}[\mathbf{y}_k \mathbf{y}_k^H] = |s_p|^2 \sigma_\beta^2 \mathbf{W}_k^H \mathbf{a}(\mathbf{x}) (\mathbf{W}_k^H \mathbf{a}(\mathbf{x}))^H + \sigma_z^2 \mathbf{J}_3, \quad (16)$$

$\mathbf{J}_3$ 为 3 阶的单位阵, $\Sigma_y(\mathbf{x})$ 的行列式为

$$|\Sigma_y(\mathbf{x})| = \sigma_z^4 \left(\sigma_z^2 + |s_p|^2 \sigma_\beta^2 |\mathbf{W}_k^H \mathbf{a}(\mathbf{x})|^2 \right). \quad (17)$$

用 $\boldsymbol{\varsigma}_{DI} = (\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \dots, \hat{\mathbf{x}}_1, \hat{\mathbf{x}}_2, \dots)$ 表示一种波束方向的跟踪策略, 本发明考虑特定的因果跟踪策略集合 Ξ_{DI} : 第 k 个探测通信周期的探测波束成形矩阵 $\mathbf{W}_k$ 和系统估计 $\hat{\mathbf{x}}_k$ 均由以前使用的探测波束成形矩阵 $\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \dots, \mathbf{W}_{k-1}$ 和历史观测 $\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_k$ 决定。因此, 在第 k 个探测通信周期, 波束方向的跟踪问题可以公式化为:

$$\min_{\boldsymbol{\varsigma}_{DI} \in \Xi_{DI}} \mathbb{E}[\|\hat{\mathbf{x}}_k - \mathbf{x}\|_2^2] \quad (18)$$

$$\text{s.t. } \mathbb{E}[\hat{\mathbf{x}}_k] = \mathbf{x}, \quad (19)$$

$$\mathbf{w}_{k,i} = \frac{1}{\sqrt{MN}} \mathbf{a}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \Delta_{DI,i}), \quad (20)$$

其中约束 (19) 确保 $\hat{\mathbf{x}}_k$ 是方向参数矢量 $\mathbf{x}$ 的无偏估计, 约束 (20) 确保每个探测通信周期的探测方向为上一次估测的方向加上三组固定偏移量

针对动态 I 型, 本实施例设计一种两阶段的跟踪方案: 递归的波束跟踪 (Recursive Beam Tracking, RBT), 具体如下:

(i) 粗波束扫描。如图 5 所示, 在前 L 个探测通信周期内, 接收机每个探测通信周期接收 $M \times N$ 个导频, 对应于观测 $\tilde{y}_{l,mn}$ 的探测波束成形矢量为

$$\tilde{\mathbf{w}}_{l,mn} = \frac{1}{\sqrt{MN}} \mathbf{a} \left(\left[(2m-1-M) \frac{d_1}{\lambda}, (2n-1-N) \frac{d_2}{\lambda} \right]^T \right), l=1, \dots, L; m=1, \dots, M; n=1, \dots, N.$$

该阶段的总探测通信周期数 L 由下式决定

$$L = \arg \min_l \left\{ \max_{m,n} |\tilde{y}_{l,mn}| \geq \alpha \sqrt{MN} |s_p \sigma_\beta| \right\}. \quad (21)$$

信道系数和波束方向的初始估计如下所示：

$$\hat{\mathbf{x}}_0 = \arg \max_{\hat{\mathbf{x}} \in \chi} \left| a(\hat{\mathbf{x}})^H \tilde{\mathbf{W}} \tilde{\mathbf{y}}_L \right|, \quad \hat{\beta}_0 = \left[\tilde{\mathbf{W}}^H a(\hat{\mathbf{x}}_0) \right]^+ \tilde{\mathbf{y}}_L, \quad (22)$$

其中 $\chi = \left\{ \left[\frac{(2m-1-M_0)Md_1}{\lambda M_0}, \frac{(2m-1-N_0)Nd_2}{\lambda N_0} \right]^T \middle| \begin{matrix} m=1, \dots, M_0 \\ n=1, \dots, N_0 \end{matrix} \right\}$ ，采用的码本尺寸为

$$M_0 \times N_0 (M_0 \geq M, N_0 \geq N), \quad \tilde{\mathbf{y}}_L = [\tilde{y}_{L,11} \cdots \tilde{y}_{L,1N} \tilde{y}_{L,21} \cdots \tilde{y}_{L,MN}]^T,$$

$$\tilde{\mathbf{W}} = [\tilde{\mathbf{w}}_{11} \cdots \tilde{\mathbf{w}}_{1N} \tilde{\mathbf{w}}_{21} \cdots \tilde{\mathbf{w}}_{MN}]^T, \quad \mathbf{X}^+ = (\mathbf{X}^H \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^H.$$

(ii) 波束方向跟踪。在第 k 个探测通信周期的探测时段，接收机接收 3 个导频，所采用的 3 个探测波束成形矢量如下所示：

$$\mathbf{w}_{k,i} = \frac{1}{\sqrt{MN}} \mathbf{a}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \tilde{\Delta}_{DI,i}^*), \quad i=1,2,3, \quad (23)$$

其中 $\hat{\mathbf{x}}_k = [\hat{x}_{k,1}, \hat{x}_{k,2}]^T$, $\tilde{\Delta}_{DI,i}^*$ 是动态 I 型时天线数目趋于无穷时渐近最优的探测方向偏移，由图 6 和表 2 给出：

表 2 动态 I 型渐近最优的探测方向偏移

$\tilde{\Delta}_{DI,1}^*$	$\tilde{\Delta}_{DI,2}^*$	$\tilde{\Delta}_{DI,3}^*$
$[0.5486, 0.2451]^T$	$[-0.5462, 0.2482]^T$	$[-0.0012, -0.6837]^T$

方向参数矢量估测 $\hat{\mathbf{x}}_k = [\hat{x}_{k,1}, \hat{x}_{k,2}]^T$ 由随机牛顿法更新：

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_{k-1} + b_{DI,k} \mathbf{I}_{DI}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}, \mathbf{W}_k)^{-1} \frac{\partial \log p_{DI}(\mathbf{y}_k | \hat{\mathbf{x}}_{k-1}, \mathbf{W}_k)}{\partial \hat{\mathbf{x}}_{k-1}}, \quad (24)$$

其中 $b_{DI,k} = \frac{1}{k}$ 是跟踪步长。Fisher 信息矩阵 $\mathbf{I}_{DI}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}, \mathbf{W}_k)$ 的第 p 行，第 s 列 ($p=1,2; s=1,2$) 的元素由下式给出

$$[\mathbf{I}_{DI}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}, \mathbf{W}_k)]_{p,s} = \frac{\sigma_z^6 |s_p|^6 \sigma_\beta^6}{\Sigma_y(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})} \operatorname{Re} \left\{ -2 |\mathbf{g}_k|^2 \tilde{g}_{k,p} \tilde{g}_{k,s} + \frac{\sigma_z^2}{|s_p|^2 \sigma_\beta^2} \operatorname{Tr} \{ \mathbf{G}_{k,p} \mathbf{G}_{k,s} \} + \mathbf{g}_k^H (\mathbf{G}_{k,p} \mathbf{G}_{k,s} + \mathbf{G}_{k,s} \mathbf{G}_{k,p}) \mathbf{g}_k \right\}, \quad (25)$$

其中

$$\begin{cases} \mathbf{g}_k = \mathbf{W}_k^H \mathbf{a}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}) \\ \tilde{g}_{k,p} = \frac{\partial |\mathbf{g}_k|^2}{\partial \hat{x}_{k-1,p}}, p=1,2. \\ \mathbf{G}_{k,p} = \frac{\partial \mathbf{g}_k \mathbf{g}_k^H}{\partial \hat{x}_{k-1,p}} \end{cases} \quad (26)$$

设置系统参数为：天线数目 $M = N = 8$ ，天线间距 $d_1 = d_2 = \frac{\lambda}{2}$ ，粗波束扫描的码本尺寸 $M_0 = 2M, N_0 = 2N$ ，导频符号 $s_p = 1$ ，发射信噪比 $\frac{|s_p|^2 \sigma_\beta^2}{\sigma_z^2} = 5\text{dB}$ 。波束方向服从均匀分布： $\theta \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right], \phi \in (-\pi, \pi]$ 。进行 1000 次系统仿真后取平均得到的结果如图 7 所示，可以看出，所提出的跟踪方法能够渐近到达方向参数矢量均方误差的最小 CRLB，跟踪精度远高于已有算法。

3) 动态 II 型

该场景下，信道系数和波束方向都变化很快，此时观测矢量 $\mathbf{y}_k$ 的条件概率密度函数为

$$p_{DII}(\mathbf{y}_k | \boldsymbol{\Psi}_k, \mathbf{W}_k) = \frac{1}{\pi^q \sigma^{2q}} e^{-\frac{\|\mathbf{y}_k - s_p \beta_k \mathbf{W}_k^H \mathbf{a}(\mathbf{x}_k)\|_2^2}{\sigma_z^2}}. \quad (27)$$

用 $\boldsymbol{\varsigma}_{DII} = (\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \dots, \hat{\boldsymbol{\Psi}}_1, \hat{\boldsymbol{\Psi}}_2, \dots)$ 表示一种信道系数和波束方向的跟踪策略，本发明考虑特定的因果跟踪策略集合 Ξ_{DII} ：第 k 个探测通信周期的探测波束成形矩阵 $\mathbf{W}_k$ 和系统估计 $\hat{\boldsymbol{\Psi}}_k$ 均由以前使用的探测波束成形矩阵 $\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \dots, \mathbf{W}_{k-1}$ 和历史观测 $\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_k$ 决定。因此，在第 k 个探测通信周期，信道系数和波束方向的跟踪问题可以公式化为：

$$\min_{\boldsymbol{\varsigma}_{DII} \in \Xi_{DII}} \frac{1}{MN} \mathbb{E} \left[\left\| \hat{\mathbf{h}}_k - \mathbf{h}_k \right\|_2^2 \right] \quad (28)$$

$$\text{s.t. } \mathbb{E}[\hat{\mathbf{h}}_k] = \mathbf{h}_k, \quad (29)$$

$$\mathbf{w}_{k,i} = \frac{1}{\sqrt{MN}} \mathbf{a}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{\Delta}_{DII,i}), \quad (30)$$

其中约束 (29) 确保 $\hat{\mathbf{h}}_k = \hat{\beta}_k \mathbf{a}(\hat{\mathbf{x}}_k)$ 是信道矢量 $\mathbf{h}_k \triangleq \beta_k \mathbf{a}(\mathbf{x}_k)$ 的无偏估计, 约束 (30) 确保每个探测通信周期的探测方向为上一次估测的方向加上三组固定偏移量。

针对动态 II 型, 本实施例设计一种两阶段的跟踪方案: 波束和信道联合跟踪 (Joint Beam and Channel Tracking, JBCT), 具体如下:

(i) 粗波束扫描。如图 2 所示, 接收机在 1 个探测通信周期内接收 $M \times N$ 个导频, 对应于观测 $\tilde{y}_{mn}$ 的探测波束成形矢量为

$$\tilde{\mathbf{w}}_{mn} = \frac{1}{\sqrt{MN}} \mathbf{a} \left(\left[(2m-1-M) \frac{d_1}{\lambda}, (2n-1-N) \frac{d_2}{\lambda} \right]^T \right), m=1, \dots, M, n=1, \dots, N; \text{ 信道系数和波}$$

束方向的初始估计如下所示:

$$\hat{\mathbf{x}}_0 = \arg \max_{\hat{\mathbf{x}} \in \chi} \left| a(\hat{\mathbf{x}})^H \tilde{\mathbf{W}} \tilde{\mathbf{y}} \right|, \hat{\beta}_0 = \left[\tilde{\mathbf{W}}^H a(\hat{\mathbf{x}}_0) \right]^+ \tilde{\mathbf{y}}, \quad (31)$$

其中 $\chi = \left\{ \left[\frac{(2m-1-M_0)Md_1}{\lambda M_0}, \frac{(2n-1-N_0)Nd_2}{\lambda N_0} \right]^T \middle| \begin{matrix} m=1, \dots, M_0 \\ n=1, \dots, N_0 \end{matrix} \right\}$, 采用的码本尺寸为

$$M_0 \times N_0 (M_0 \geq M, N_0 \geq N), \quad \tilde{\mathbf{y}} = [\tilde{y}_{11} \dots \tilde{y}_{1N} \tilde{y}_{21} \dots \tilde{y}_{MN}]^T, \quad \tilde{\mathbf{W}} = [\tilde{\mathbf{w}}_{11} \dots \tilde{\mathbf{w}}_{1N} \tilde{\mathbf{w}}_{21} \dots \tilde{\mathbf{w}}_{MN}]^T,$$

$$\mathbf{X}^+ = (\mathbf{X}^H \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^H.$$

(ii) 信道系数和波束方向联合跟踪。在第 k 个探测通信周期的探测阶段, 接收机接收 3 个导频, 所采用的 3 个探测波束成形矢量如下所示:

$$\mathbf{w}_{k,i} = \frac{1}{\sqrt{MN}} \mathbf{a}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \tilde{\mathbf{\Delta}}_{DII,i}^*), i=1,2,3, \quad (32)$$

其中 $\hat{\mathbf{x}}_k = [\hat{x}_{k,1}, \hat{x}_{k,2}]^T$, $\tilde{\mathbf{\Delta}}_{DII,i}^* = \tilde{\mathbf{\Delta}}_{S,i}^*$ 由图 3 和表 1 给出。信道参数矢量估测

$\hat{\Psi}_k = [\hat{\beta}_k^{\text{re}}, \hat{\beta}_k^{\text{im}}, \hat{x}_{k,1}, \hat{x}_{k,2}]^T$ 由随机牛顿法更新:

$$\hat{\Psi}_k = \hat{\Psi}_{k-1} + \frac{2}{\sigma^2} b_{DII,k} \mathbf{I}_{DII}(\hat{\Psi}_{k-1}, \mathbf{W}_k)^{-1} \begin{bmatrix} \text{Re}\{s_p^H \mathbf{e}_k^H (\mathbf{y}_k - \hat{\mathbf{y}}_k)\} \\ \text{Im}\{s_p^H \mathbf{e}_k^H (\mathbf{y}_k - \hat{\mathbf{y}}_k)\} \\ \text{Re}\{s_p^H \tilde{\mathbf{e}}_{k1}^H (\mathbf{y}_k - \hat{\mathbf{y}}_k)\} \\ \text{Re}\{s_p^H \tilde{\mathbf{e}}_{k2}^H (\mathbf{y}_k - \hat{\mathbf{y}}_k)\} \end{bmatrix} \quad (33)$$

其中 $\mathbf{e}_k = \mathbf{W}_k^H \mathbf{a}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})$, $\mathbf{y}_k = s_p \hat{\beta}_{k-1} \mathbf{W}_k^H \mathbf{a}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})$, $\tilde{\mathbf{e}}_{k1} = \hat{\beta}_{k-1} \mathbf{W}_k^H \frac{\partial \mathbf{a}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})}{\partial x_1}$, $\tilde{\mathbf{e}}_{k2} = \hat{\beta}_{k-1} \mathbf{W}_k^H \frac{\partial \mathbf{a}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})}{\partial x_2}$,

$b_{DII,k} = 0.7$ 是跟踪步长。Fisher 信息矩阵 $\mathbf{I}_{DII}(\hat{\Psi}_{k-1}, \mathbf{W}_k)$ 定义如下

$$\mathbf{I}_{DII}(\hat{\Psi}_{k-1}, \mathbf{W}_k) \triangleq \frac{2|s_p|^2}{\sigma_z^2} \text{Re}\{\mathbf{V}_k^H \mathbf{W}_k \mathbf{W}_k^H \mathbf{V}_k\} \quad (34)$$

$$\mathbf{V}_k \triangleq \left[\mathbf{a}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}), j\mathbf{a}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}), \hat{\beta}_{k-1} \frac{\partial \mathbf{a}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})}{\partial x_1}, \hat{\beta}_{k-1} \frac{\partial \mathbf{a}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})}{\partial x_2} \right] \quad (35)$$

设置系统参数为: 天线数目 $M = N = 8$, 天线间距 $d_1 = d_2 = \frac{\lambda}{2}$, 粗波束扫

描的码本尺寸 $M_0 = 2M, N_0 = 2N$, 导频符号 $s_p = 1$, 发射信噪比 $\frac{|s_p|^2}{\sigma_z^2} = 5\text{dB}$ 。

到达的波束方向服从随机游走: $\theta_k = \theta_{k-1} + \Delta_\theta, \phi_k = \phi_{k-1} + \Delta_\phi; \Delta_\theta, \Delta_\phi \sim \mathcal{CN}(0, \delta_A^2)$,

初始波束方向服从均匀分布: $\theta_0 \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right], \phi_0 \in (-\pi, \pi]$, 信道系数服从高斯-马尔可夫分布: $\beta_k = \rho\beta_{k-1} + \mu_k; \rho = 0.995, \mu_k \sim \mathcal{CN}(0, 1 - \rho^2)$, 初始信道系数 β_0 服从莱斯分布, 莱斯因子为 15dB。进行 1000 次系统仿真后取平均得到的结果如图 8 所示, 可以看出, 所提出的跟踪方法能够实现更高的跟踪精度。如果设置一个可容忍的跟踪误差, 如 $e_t = 0.15$, 则所提出的方法能实现更快的跟踪速度。

权 利 要 求 书

1、一种基于二维相控天线阵列的快速精确波束跟踪方法，适用于毫米波移动通信，其特征在于，周期式交替地工作在探测和通信模式，在一个探测通信周期内的探测时段，波束依次指向若干个探测方向，通信时段波束指向当时估计出的波束方向。

2、根据权利要求 1 所述基于二维相控天线阵列的快速精确波束跟踪方法，其特征在于，包括如下步骤：

步骤 A，根据信道的时变特性，将信道划分为三种类型：1) 准静态场景；2) 动态 I 型；3) 动态 II 型，首先确定待跟踪的信道属于哪种类型；

步骤 B，在每个探测通信周期的探测时段，基于步骤 A 中确定的信道类型，依照对应类型的波束跟踪方法，确定依次探测的方向，根据探测结果及历史上记录的信息，获得信道系数和波束方向的估值；

步骤 C，将波束指向步骤 B 中获得的波束方向估值进行通信。

3、根据权利要求 2 所述基于二维相控天线阵列的快速精确波束跟踪方法，其特征在于，所述步骤 A 中，准静态场景是指信道系数和波束方向都变化很慢的情况：

$\beta_k \approx \beta_{k-1}$, $\mathbf{x}_k \approx \mathbf{x}_{k-1}$ ，其中 β_k 指第 k 个探测通信周期的信道系数， $\mathbf{x}_k$ 指第 k 个探测通信周期的方向参数矢量：

$$\mathbf{x}_k = [x_{k,1}, x_{k,2}]^T = \left[\frac{Md_1 \cos(\theta_k) \cos(\phi_k)}{\lambda}, \frac{Nd_2 \cos(\theta_k) \sin(\phi_k)}{\lambda} \right]^T, x_{k,1}, x_{k,2} \text{ 分别为二维}$$

方向参数矢量 $\mathbf{x}_k$ 两个维度的值， θ_k ， ϕ_k 分别指第 k 个探测通信周期到达波束方向的俯仰角和方位角， M, N 分别为二维面阵天线两个方向维度上的天线数目， d_1, d_2 分别为面阵天线两个方向维度上的相邻天线间距， λ 为毫米波波长；

动态 I 型是指信道系数快速变化，波束方向变化很慢的情况： $\beta_k \neq \beta_{k-1}$, $\mathbf{x}_k \approx \mathbf{x}_{k-1}$ ；

动态 II 型是指信道系数和波束方向都快速变化的情况： $\beta_k \neq \beta_{k-1}$, $\mathbf{x}_k \neq \mathbf{x}_{k-1}$ 。

4、根据权利要求 2 所述基于二维相控天线阵列的快速精确波束跟踪方法，其特征在于，所述步骤 B 中，针对准静态场景的跟踪步骤如下：

步骤 11，获得在真实波束主瓣范围的初始方向估计以及信道系数的初始估计；

步骤 12，在每个探测通信周期的探测时段，依次发送 3 个导频，进行 3 次不同方向的探测，探测的方向为上一次估测的方向加上三组固定偏移量 $\Delta_{S,1}, \Delta_{S,2}, \Delta_{S,3}$ ；

步骤 13，基于探测结果及历史上记录的信息，利用随机迭代法更新估测值；

针对动态 I 型，只跟踪波束方向，跟踪步骤如下：

步骤 21，获得在真实波束主瓣范围的初始方向估计；

步骤 22，在每个探测通信周期的探测时段，依次发送 3 个导频，进行 3 次不同方向的探测，探测的方向为上一次估测的方向加上三组固定偏移量 $\Delta_{DI,1}, \Delta_{DI,2}, \Delta_{DI,3}$ ；

步骤 23，基于探测结果及历史上记录的信息，利用随机迭代法更新估测值；

针对动态 II 型的跟踪步骤如下：

步骤 31，获得在真实波束主瓣范围的初始方向估计以及信道系数的初始估计；

步骤 32，在每个探测通信周期的探测时段，依次发送 3 个导频，进行 3 次不同方向的探测，探测的方向为上一次估测的方向加上三组固定偏移量 $\Delta_{DII,1}, \Delta_{DII,2}, \Delta_{DII,3}$ ；

步骤 33，基于探测结果及历史上记录的信息，利用随机迭代法更新估测值。

5、根据权利要求 4 所述基于二维相控天线阵列的快速精确波束跟踪方法，其特征在于，所述步骤 11 中，采用的初始估测方法为波束扫描：在 1 个探测通信周期内，发送 $M \times N$ 个导频，利用这些导频，进行 $M \times N$ 个不同方向的探测，根据正交匹配跟踪（Orthogonal Matching Pursuit, OMP）算法，获得信道系数和波束方向的初始估计；所述步骤 12 中，三组固定的探测偏移量位于二维平面的一个环上 $0.4 \leq |\Delta_{S,i}| \leq 0.6, i = 1, 2, 3$ ；所述步骤 13 中，采用的随机迭代法为随机牛顿法。

6、根据权利要求 5 所述基于二维相控天线阵列的快速精确波束跟踪方法，其特征在于，所述位于环上的三组固定探测偏移量依据要跟踪的目标进行优化，优化目标为信道矢量的均方误差、方向参数矢量的均方误差。

7、根据权利要求 4 所述基于二维相控天线阵列的快速精确波束跟踪方法，其特征在于，所述步骤 21 中，采用的初始估测方法为波束扫描：在前 L 个探测通信周期内，每个探测通信周期发送 $M \times N$ 个导频，利用这些导频，每个探测通信周期进行 $M \times N$ 个不同方向的探测， L 的选取要保证在第 L 个探测通信周期接收到的 $M \times N$ 个不同探测方向的最大信号能量大于某个阈值，然后利用第 L 个探测通信周期的探测结果，根据 OMP 算法获得波束方向的初始估计；所述步骤 22 中，三组固定的探测偏移量位于二维平面的一个环上 $0.5 \leq |\Delta_{DI,i}| \leq 0.7, i = 1, 2, 3$ ，所述步骤 23 中，采用的随机迭代法为随机牛顿法。

8、根据权利要求 7 所述基于二维相控天线阵列的快速精确波束跟踪方法，其特征在于，所述位于环上的三组固定探测偏移量依据要跟踪的目标进行优化，优化目标为方向参数矢量的均方误差。

9、根据权利要求 4 所述基于二维相控天线阵列的快速精确波束跟踪方法，其特征在

于, 所述步骤 31 中, 采用的初始估测方法为波束扫描: 在 1 个探测通信周期内, 发送 $M \times N$ 个导频, 利用这些导频, 进行 $M \times N$ 个不同方向的探测。根据 OMP 算法, 获得信道系数和波束方向的初始估计; 所述步骤 32 中, 三组固定的探测偏移量位于二维平面的一个环上: $0.4 \leq |\Delta_{DH,i}| \leq 0.6, i = 1, 2, 3$; 所述步骤 33 中, 采用的随机迭代法为随机牛顿法。

10、根据权利要求 9 所述基于二维相控天线阵列的快速精确波束跟踪方法, 其特征在于, 所述位于环上的三组固定探测偏移量依据要跟踪的目标进行优化, 优化目标为信道矢量的均方误差、方向参数矢量的均方误差。

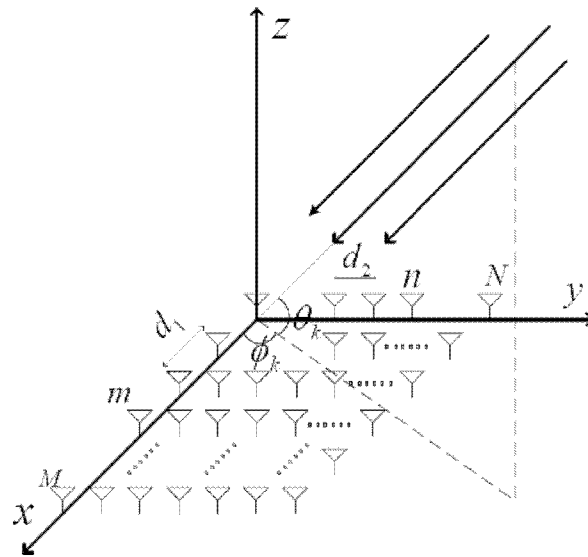


图 1

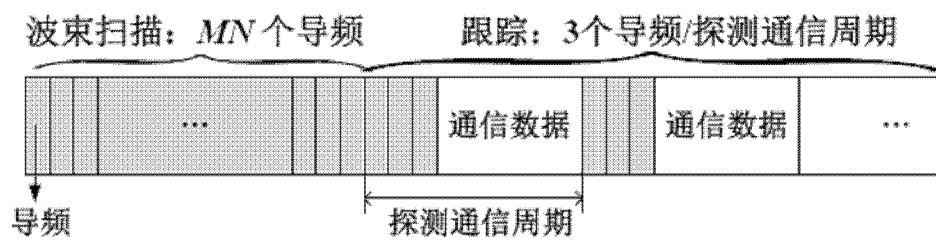


图 2

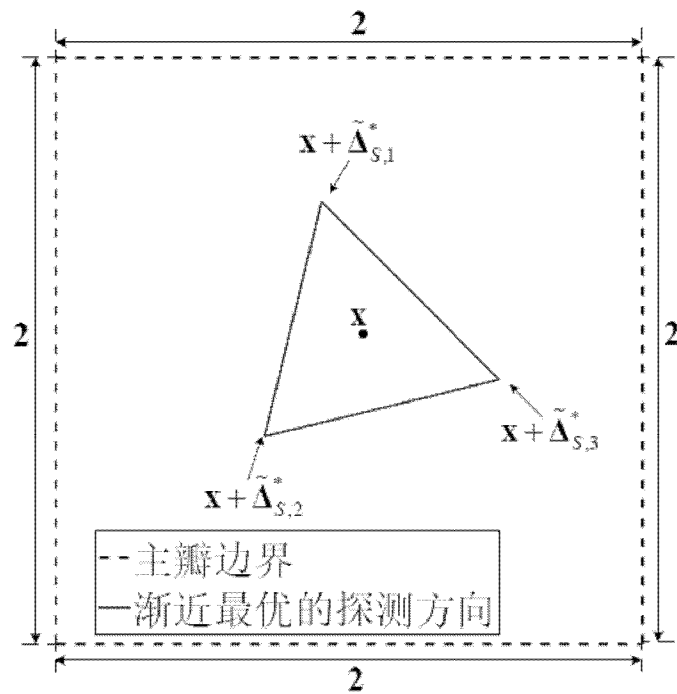


图 3

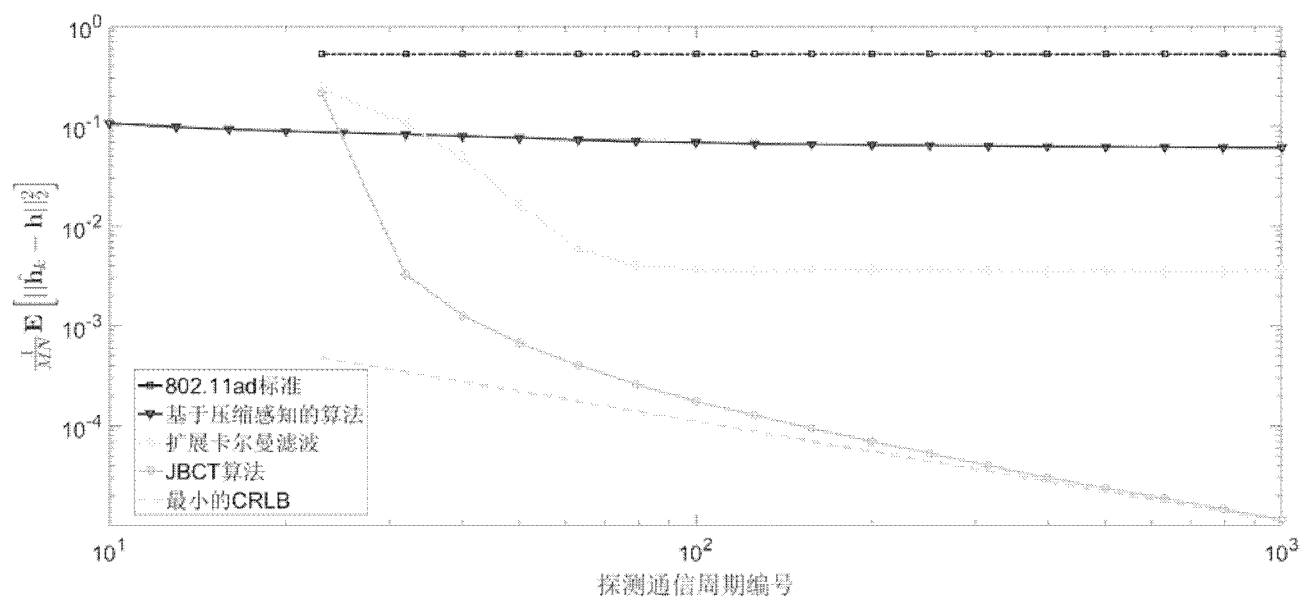


图 4

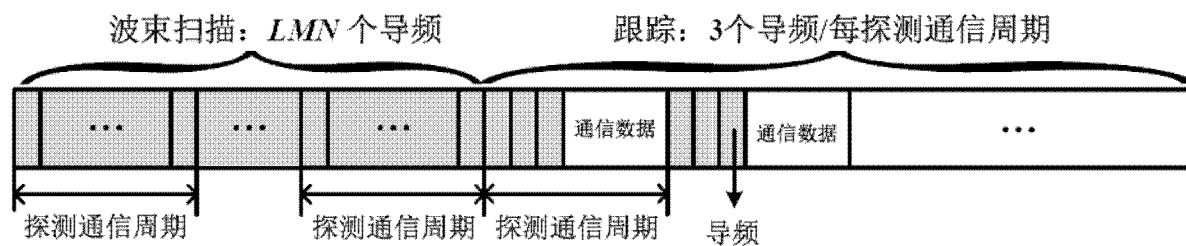


图 5

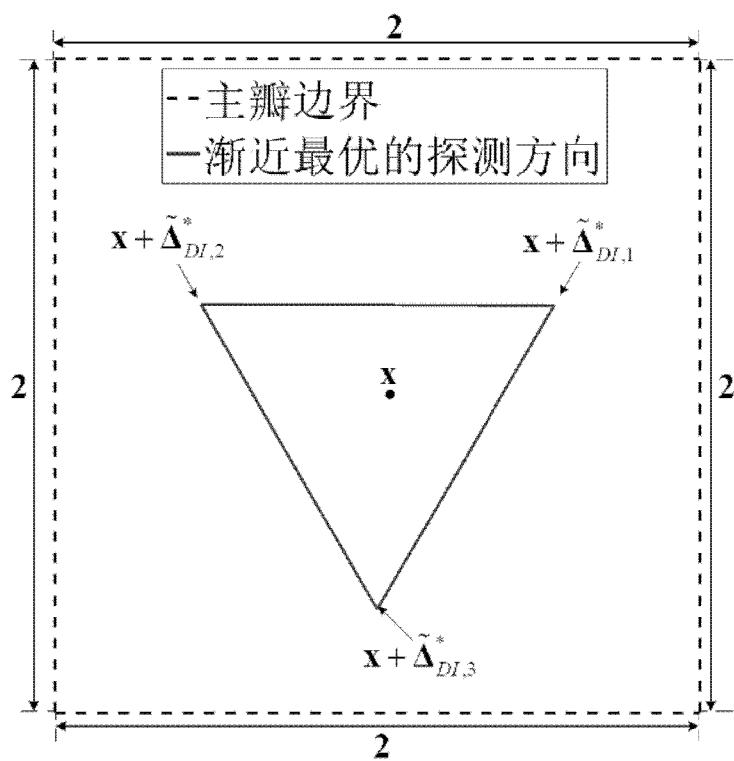


图 6

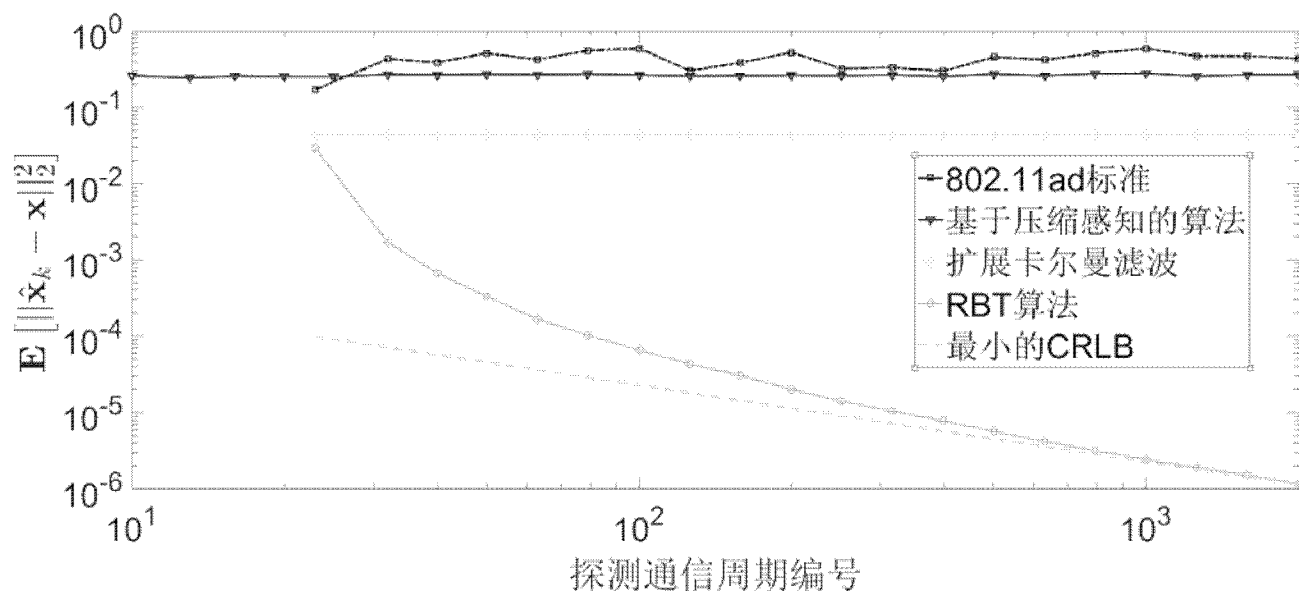


图 7

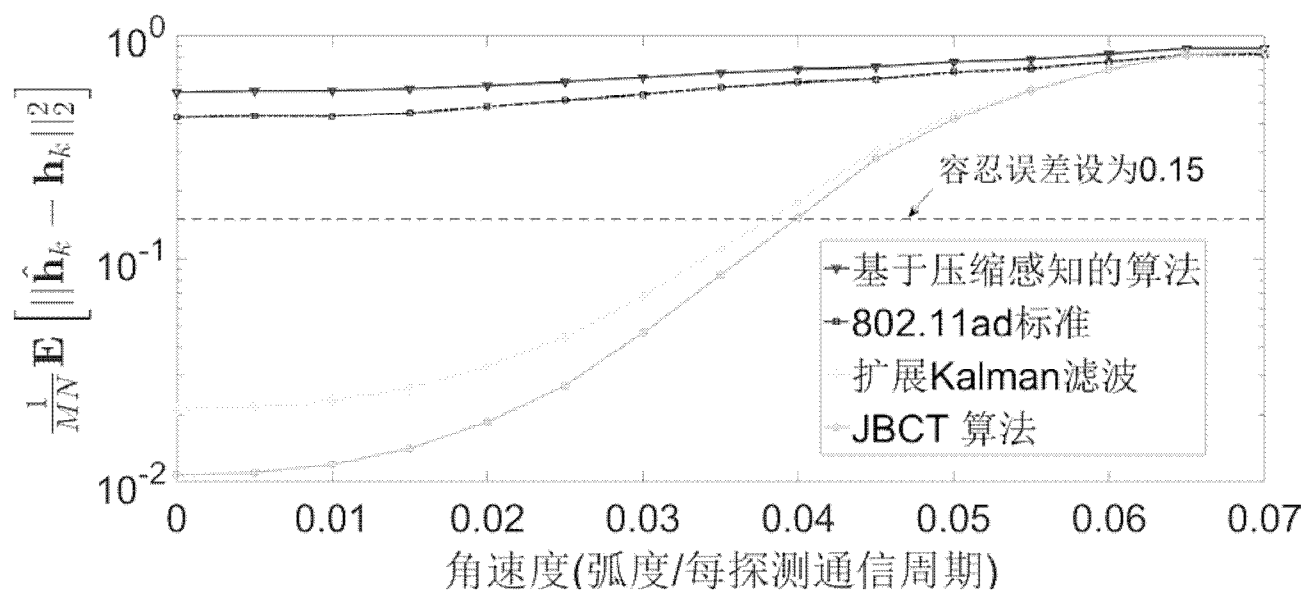


图 8

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/110029

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER H04B 7/06(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) H04B 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) CNPAT, CNKI, WPI, EPODOC, IEEE: 波束, 对准, 训练, 搜索, 扫描, 成形, 追踪, 方向, 二维, 平面, 动态, 静态, 信道, 特性, 天线, 阵列, 相控, 定向, 场景, search, scan, forming, track, array, plane, dynamic, static, channel, characteristic, beam, alignment, train, direction, antenna, phased																				
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT <table border="1"> <thead> <tr> <th>Category*</th> <th>Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages</th> <th>Relevant to claim No.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>X</td> <td>LI, Jiahui et al. "HOW TO MOBILIZE MMWAVE: A JOINT BEAM AND CHANNEL TRACKING APPROACH" 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing(ICASSP), 13 September 2018 (2018-09-13), sections 1-5</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>CN 106465070 A (QUALCOMM INC.) 22 February 2017 (2017-02-22) description, paragraphs [0056]-[0074], figures 7-14</td> <td>1,</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>US 2013229309 A1 (NOKIA SIEMENS NETWORKS OY) 05 September 2013 (2013-09-05) description, paragraphs [0035]-[0073]</td> <td>1,</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 109742542 A (BEIJING HUIQING TECH CO., LTD.) 10 May 2019 (2019-05-10) entire document</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 106533557 A (SHAANXI SHARPEN INFORMATION TECHNOLOGY CO., LTD.) 22 March 2017 (2017-03-22) entire document</td> <td>1-10</td> </tr> </tbody> </table>			Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.	X	LI, Jiahui et al. "HOW TO MOBILIZE MMWAVE: A JOINT BEAM AND CHANNEL TRACKING APPROACH" 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing(ICASSP), 13 September 2018 (2018-09-13), sections 1-5	1-10	X	CN 106465070 A (QUALCOMM INC.) 22 February 2017 (2017-02-22) description, paragraphs [0056]-[0074], figures 7-14	1,	X	US 2013229309 A1 (NOKIA SIEMENS NETWORKS OY) 05 September 2013 (2013-09-05) description, paragraphs [0035]-[0073]	1,	A	CN 109742542 A (BEIJING HUIQING TECH CO., LTD.) 10 May 2019 (2019-05-10) entire document	1-10	A	CN 106533557 A (SHAANXI SHARPEN INFORMATION TECHNOLOGY CO., LTD.) 22 March 2017 (2017-03-22) entire document	1-10
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.																		
X	LI, Jiahui et al. "HOW TO MOBILIZE MMWAVE: A JOINT BEAM AND CHANNEL TRACKING APPROACH" 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing(ICASSP), 13 September 2018 (2018-09-13), sections 1-5	1-10																		
X	CN 106465070 A (QUALCOMM INC.) 22 February 2017 (2017-02-22) description, paragraphs [0056]-[0074], figures 7-14	1,																		
X	US 2013229309 A1 (NOKIA SIEMENS NETWORKS OY) 05 September 2013 (2013-09-05) description, paragraphs [0035]-[0073]	1,																		
A	CN 109742542 A (BEIJING HUIQING TECH CO., LTD.) 10 May 2019 (2019-05-10) entire document	1-10																		
A	CN 106533557 A (SHAANXI SHARPEN INFORMATION TECHNOLOGY CO., LTD.) 22 March 2017 (2017-03-22) entire document	1-10																		
☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☒ See patent family annex.																				
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "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) "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 "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 "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 "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 "&" document member of the same patent family																				
Date of the actual completion of the international search 03 March 2020		Date of mailing of the international search report 13 March 2020																		
Name and mailing address of the ISA/CN China National Intellectual Property Administration (ISA/CN) No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088 China Facsimile No. (86-10)62019451		Authorized officer Telephone No.																		

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/110029

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	XU, Xiaofei et al. "Power-Efficient Distributed Beamforming for Full-Duplex MIMO Relaying Networks" <i>IEEE Transactions on Vehicular Technology</i> , Vol. 66,, No. 2,, 28 February 2017 (2017-02-28), pp. 1087-1103	1-10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2019/110029

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	106465070	A	22 February 2017	US	2015373627	A1	24 December 2015
				KR	20160149316	A	27 December 2016
				WO	2015195379	A1	23 December 2015
				IN	201647038648	A	09 December 2016
				EP	3158809	A1	26 April 2017
				JP	2017525203	A	31 August 2017
				BR	112016029381	A2	22 August 2017
US	2013229309	A1	05 September 2013	WO	2013127585	A1	06 September 2013
CN	109742542	A	10 May 2019	None			
CN	106533557	A	22 March 2017	None			

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/110029

A. 主题的分类

H04B 7/06 (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)

H04B

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))

CNPAT, CNKI, WPI, EPDOC, IEEE : 波束, 对准, 训练, 搜索, 扫描, 成形, 追踪, 方向, 二维, 平面, 动态, 静态, 信道, 特性, 天线, 阵列, 相控, 定向, 场景, search, scan, forming, track, array, plane, dynamic, static, channel, characteristic, beam, alignment, train, direction, antenna, phased

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
X	LI, Jiahui等. "HOW TO MOBILIZE MMWAVE: A JOINT BEAM AND CHANNEL TRACKING APPROACH" 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2018年 9月 13日 (2018 - 09 - 13), 第1-5节	1-10
X	CN 106465070 A (高通股份有限公司) 2017年 2月 22日 (2017 - 02 - 22) 说明书第[0056]-[0074]段, 附图7-14	1
X	US 2013229309 A1 (NOKIA SIEMENS NETWORKS OY) 2013年 9月 5日 (2013 - 09 - 05) 说明书第[0035]-[0073]段	1
A	CN 109742542 A (北京慧清科技有限公司) 2019年 5月 10日 (2019 - 05 - 10) 全文	1-10
A	CN 106533557 A (陕西尚品信息科技有限公司) 2017年 3月 22日 (2017 - 03 - 22) 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

2020年 3月 3日

国际检索报告邮寄日期

2020年 3月 13日

ISA/CN的名称和邮寄地址

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

传真号 (86-10)62019451

受权官员

张雪

电话号码 86-(10)-53961613

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	XU, Xiaofei等. "Power-Efficient Distributed Beamforming for Full-Duplex MIMO Relaying Networks" IEEE Transactions on Vehicular Technology, 第66卷, 第2期, 2017年 2月 28日 (2017 - 02 - 28), 第1087-1103页	1-10

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/110029

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	106465070	A	2017年 2月 22日	US	2015373627	A1	2015年 12月 24日
				KR	20160149316	A	2016年 12月 27日
				WO	2015195379	A1	2015年 12月 23日
				IN	201647038648	A	2016年 12月 9日
				EP	3158809	A1	2017年 4月 26日
				JP	2017525203	A	2017年 8月 31日
				BR	112016029381	A2	2017年 8月 22日
US	2013229309	A1	2013年 9月 5日	WO	2013127585	A1	2013年 9月 6日
CN	109742542	A	2019年 5月 10日	无			
CN	106533557	A	2017年 3月 22日	无			