



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102427602 A

(43) 申请公布日 2012. 04. 25

(21) 申请号 201110400367. 9

(22) 申请日 2011. 12. 06

(71) 申请人 南京师范大学

地址 210046 江苏省南京市栖霞区文苑路 1 号

(72) 发明人 柯炜 王婷婷 王智 张倩茹

(74) 专利代理机构 南京知识律师事务所 32207

代理人 汪旭东

(51) Int. Cl.

H04W 64/00 (2009. 01)

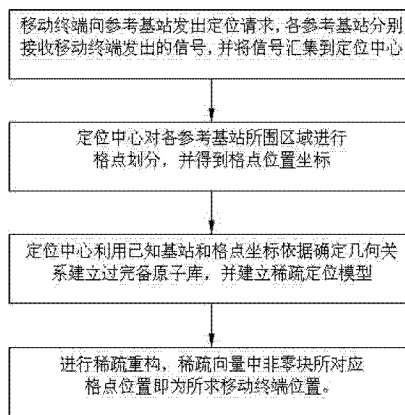
权利要求书 1 页 说明书 5 页 附图 2 页

(54) 发明名称

稀疏直接定位方法

(57) 摘要

本发明公开了一种稀疏直接定位方法。该方法由移动终端向参考基站发出定位请求,各参考基站分别接收移动终端发出的信号,并将信号汇集到定位中心;定位中心首先对定位区域进行格点划分,并将格点坐标组成集合;然后根据已知的基站和格点坐标预先建立过完备原子库,并建立稀疏定位模型;最后根据压缩感知原理对稀疏信号进行重构,所得稀疏向量中非零块所对应格点位置即为所求移动终端位置。本发明的方法由于不需要进行信号时延、角度、强度等特征参数估计,可以比两步定位方法获得更高的定位精度;同时该方法利用定位问题的稀疏性特征,依据接收信号判断稀疏向量中非零值所在位置,从而得出移动终端位置,可以大大降低计算复杂度。



1. 稀疏直接定位方法,其特征在于,所述方法包括如下步骤:

1) 移动终端向参考基站发出定位请求,各参考基站分别接收移动终端发出的信号,并将信号汇集到定位中心;

2) 定位中心对参考基站所围成的定位区域采用均匀或非均匀划分方法划分为 N_Ω 个格点,并将格点坐标组成集合 $\Omega = \{\mathbf{p}_1^G, \dots, \mathbf{p}_{N_\Omega}^G\}$;

3) 利用基站和格点坐标,依据确定的几何关系建立过完备原子库,并建立稀疏定位模型;

在第 k 个采样时刻第 n 个基站上第 m 个阵元接收到格点 \mathbf{p}_i^G 处发出信号可以表示为:

$$r_n^{(k)}(m) = \alpha_n \theta_n(m) s(t_k - \tau_n(\mathbf{p}_i^G)) + v_n^{(k)} \triangleq \alpha_n \phi_n^{(k)}(m) + v_n^{(k)}, m = 0, 1, \dots, M-1; n = 1, 2, \dots, L \quad (1)$$

其中 $r_n^{(k)}$ 表示第 m 个阵元上的接收信号, $s(t_k - \tau_n(\mathbf{p}_i^G))$ 表示信号波形, α_n 表示移动终端与第 n 个基站之间的信道衰减, $\theta_n(m)$ 是第 n 个基站上第 m 个阵元接收到信号的天线阵列响应, $\tau_n(\mathbf{p}_i^G)$ 表示电磁波从格点 \mathbf{p}_i^G 到第 n 个基站所经历的时延, L 为参考基站的个数,每个基站均装有含 M 阵元的阵列天线;

对于集合 Ω 中任意一个格点 \mathbf{p}_i^G ,定位中心将 L 个基站的所有阵元接收信号排成列矢量:

$$\mathbf{r}^{(k)} = \Phi(\mathbf{p}_i^G) \boldsymbol{\alpha} + \mathbf{v}^{(k)} \quad (2)$$

此处 $\mathbf{r}^{(k)} = [r(0)^T, \dots, r(M-1)^T]^T$ 是一个 $LM \times 1$ 的矢量,其中第 m 项 $\mathbf{r}(m) = [r_1^{(k)}(m), \dots, r_L^{(k)}(m)]^T$; $\Phi(\mathbf{p}_i^G) = [\boldsymbol{\phi}^{(k)}(0)^T, \dots, \boldsymbol{\phi}^{(k)}(M-1)^T]^T$ 是一个 $LM \times L$ 矩阵,而其中 $\boldsymbol{\phi}^{(k)}(m) = \text{diag}(\phi_1^{(k)}(m), \dots, \phi_L^{(k)}(m))$, $\text{diag}(\cdot)$ 表示对角矩阵; $\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{L-1}]^T$ 是一个 $L \times 1$ 矢量,表示信道衰减系数; $\mathbf{v}^{(k)}$ 是一个 $LM \times 1$ 矢量,包括噪声和模型误差;

因此对于所有 N_Ω 个格点,过完备原子库可以建立如下:

$$\tilde{\Phi} = [\Phi(\mathbf{p}_1^G), \dots, \Phi(\mathbf{p}_{N_\Omega}^G)] \quad (3)$$

从而稀疏直接定位模型可以表示为:

$$\mathbf{r}^{(k)} = \tilde{\Phi} \tilde{\boldsymbol{\alpha}} + \mathbf{v}^{(k)} \quad (4)$$

其中 $\tilde{\boldsymbol{\alpha}}$ 是一个 $LN_\Omega \times 1$ 的块稀疏矢量,即 $\tilde{\boldsymbol{\alpha}}$ 可以分成 N_Ω 个长度为 $L \times 1$ 的子块,其中只有第 i 块的 L 个系数非零,而其余系数均为零;

4) 进行稀疏重构;

利用压缩感知理论中的算法求解下述方程:

$$\hat{\boldsymbol{\alpha}} = \arg \min \|\tilde{\boldsymbol{\alpha}}\|$$

(5)

$$s.t. \|\mathbf{r}^{(k)} - \tilde{\Phi} \tilde{\boldsymbol{\alpha}}\|_2 \leq \varepsilon$$

其中 $\hat{\boldsymbol{\alpha}}$ 表示 $\tilde{\boldsymbol{\alpha}}$ 的估计值, ε 表示误差容限;计算出 $\tilde{\boldsymbol{\alpha}}$,就可以得到稀疏向量中非零块位置,其所对应的格点位置即为待确定的移动终端位置。

稀疏直接定位方法

技术领域

[0001] 本发明属于无线定位技术领域,特别涉及一种利用无线通信设施进行无线定位的方法。

背景技术

[0002] 无线定位技术在搜索救援、智能交通、物流管理、地质勘探和国土开发、航海 / 航空导航等诸多领域都有广泛应用。如今在军事行动和日常生活的各个领域,具有空间位置特性的地理信息发挥着越来越重要的作用,高精度的无线定位技术也越来越受到广泛关注。

[0003] 在众多无线定位系统中,最著名的是把无线电发射源设置在各种轨道卫星上的定位系统,例如美国的全球定位系统 (GPS)、欧洲的伽利略 (Galileo) 系统、俄罗斯的 GLONASS 系统以及我国的“北斗”定位系统等,凭借着广域覆盖的巨大优势,将无线电定位技术发展到一个新的高度。尽管卫星定位技术已经在国民经济各个方面得到广泛应用,但是在应用领域由于受到各种接收误差的影响,需要通过其它辅助手段(例如建立差分基准站)才能达到所需的定位精度要求;同时在接收信号受到物理遮挡的情况下常常无法完成导航任务。因此,利用现有和即将建设的庞大的民用无线通信设施进行无线定位,不仅可以弥补卫星定位系统的不足,而且可以作为无线通信高附加值的服务。尤其是在美国联邦通信委员会颁布了 E911 (Emergency call 911) 强制性定位要求后,加上巨大市场利润的驱动,国内外出现了研究移动通信系统终端定位技术的热潮。

[0004] 受卫星定位系统的影响,当前利用民用通信设施的定位方法绝大多数采用两步定位模式(如图 2 所示),即首先估计接收信号的一个或多个特征参数(如信号强度 (RSS)、信号到达时间 (TOA)、信号到达时间差 (TDOA) 和信号到达角度 (AOA) 等),再根据这些参数估计出移动终端的位置。此类定位模式的定位精度取决于第一步参数估计的精度和第二步位置解算算法的性能。在两步定位模式下,众多研究一直试图从提高参数估计精度和增强定位算法性能两个角度提出改进方案,以达到改善最终定位性能的目的。但不同于卫星定位系统,无线通信网络不是专门为定位设计的系统,其特征参数测量和估计是在完成通信功能的同时进行的,而且在信号格式上一般也没有为定位目的专门设计的定位信息域,难以保证特征参数测量精度,其误差不仅影响定位参数的估计精度,而且会传递到第二步位置解算阶段,引起更大误差。尽管已有大量关于参数估计的论文发表,但因为实际环境的复杂性和随机性,目前还没有在所有环境下都能进行高精度参数估计的一般方法。直接定位方法 (Direct Position Determination, DPD) 是无线定位领域近几年发展起来的一种定位新模式(如图 3 所示),该方法突破了传统两步定位方法的局限,将特征参数检测和定位融为一体,直接利用信号波形进行定位,无需专门的参数估计过程。

[0005] 目前主流的直接定位方法是 Weiss 提出的格点搜索方法 (Weiss AJ. “Direct position determination of narrowband radio frequency transmitters,” IEEE Signal Processing Letters, 2004, Vol. 11, No. 5, pp. 513-516.)。假设有 L 个已知自身坐标的参

考基站参与定位,该方法将第 n 个基站接收到待定位移动终端发出的信号表示为:

$$[0006] \quad r_n = \alpha_n \theta_n s(t - \tau_n(p)) + v_n(t)$$

[0007] 其中 r_n 表示接收信号, $s(t - \tau_n(p))$ 表示信号波形, p 表示待定位移动终端的位置。 α_n 表示移动终端与第 n 个基站之间的信道衰减。 $\tau_n(p)$ 表示电磁波从移动终端到基站所经历的时延,而 $\theta_n = [\theta_n(0), \dots, \theta_n(M-1)]^T$ 是第 n 个基站的天线阵列响应, M 表示天线阵元数目。 $v_n(t)$ 表示噪声矢量。

[0008] 然后对 r_n 抽样 N_s 点,并经离散傅里叶变换得:

$$[0009] \quad \mathbf{r}_n(k) = b_n \theta_n s(k) e^{-j\omega_k \tau_n(p)} + \mathbf{v}_n(k)$$

$$[0010] \quad 0 \leq k \leq N_s - 1, \omega_k \triangleq \frac{2\pi k}{N_s T}$$

[0011] 其中 T 为采样间隔时间。在此基础上,依据最小二乘原则建立如下的代价函数:

$$[0012] \quad Q(\mathbf{p}) = \sum_{n=1}^L \sum_{k=0}^{N_s-1} \left\| \mathbf{r}_n(k) - \alpha_n \theta_n s(k) e^{-j\omega_k \tau_n(p)} \right\|^2$$

[0013] 通过求解该函数的最小值即可得到移动终端的位置估计。由于这是一个多维优化问题,计算复杂度很高。为了减少计算量,Weiss 等人将定位区域划分成若干个格点,将每个格点作为移动终端可能的潜在位置,分别计算每个格点的代价函数值,其极值所对应位置即为所求位置。

[0014] 很显然,格点划分得越密,定位精度越高,但计算量也越大。另外由于这种直接定位方法不像两步定位方法可以利用清晰的几何关系,其计算量要远高于传统两步定位方法,尤其不适用于实时性要求较高的场合。这也是当前直接定位方法没有得到广泛应用的重要原因。

发明内容

[0015] 本发明的目的是针对现有技术中存在的不足,根据定位问题的稀疏性特征,依据压缩感知原理,提出一种基于稀疏恢复的直接定位方法,不仅去除了参数估计环节误差对定位精度的影响,而且从根本上解决现有直接定位方法计算量大的问题。

[0016] 本发明为实现上述发明目的,所采用的技术方案是:

[0017] 稀疏直接定位方法,包括如下步骤:

[0018] 1) 定位请求:假设待定位的移动终端位于 $p = (x, y)$, L 个已知位置的基站位于 $\mathbf{q}_n = (x_n, y_n)$, $n = 1, \dots, L$, 每个基站均装有含 M 阵元的阵列天线;移动终端向参考基站发出定位请求,各参考基站分别接收移动终端发出的信号,并将信号汇集到定位中心;

[0019] 2) 格点划分:定位中心将基站所围成的定位区域划分为 N_Ω 个格点,此处可以根据需要进行均匀划分或者非均匀划分,并将格点坐标组成集合 $\Omega = \{\mathbf{p}_1^G, \dots, \mathbf{p}_{N_\Omega}^G\}$;由于在某一特定时刻移动终端所在的位置在空间域上是唯一的,也即移动终端只在其中的一个格点处(或其附近),于是,一旦定位区域内的格点位置划定,移动终端在空间上的位置可精确地用一个稀疏向量表示,仅仅移动终端位置所对应格点处的值非零,而其他格点对应索引值为 0,如此一来,定位问题可以转变为依据接收信号判断稀疏向量中非零值所在位置的问题;

[0020] 3) 建立过完备原子库:在第 k 个采样时刻第 n 个基站上第 m 个阵元接收到格点 \mathbf{p}_i^G

处发出信号可以表示为：

$$[0021] \quad r_n^{(k)}(m) = \alpha_n \theta_n(m) s(t_k - \tau_n(\mathbf{p}_i^G)) + v_n^{(k)} \triangleq \alpha_n \phi_n^{(k)}(m) + v_n^{(k)}, m = 0, 1, \dots, M-1; n = 1, 2, \dots, L(1)$$

[0022] 其中 $r_n^{(k)}$ 表示第 m 个阵元上的接收信号, $s(t_k - \tau_n(\mathbf{p}_i^G))$ 表示信号波形, 一般采用训练序列或同步序列等已知信号波形, α_n 表示移动终端与第 n 个基站之间的信道衰减, $\theta_n(m)$ 是第 n 个基站上第 m 个阵元接收到信号的天线阵列响应, $\tau_n(\mathbf{p}_i^G)$ 表示电磁波从格点 \mathbf{p}_i^G 到第 n 个基站所经历的时延; 由于基站和格点位置都已知, 时延 $\tau_n(\mathbf{p}_i^G)$ 可由两者间距离除以光速精确求得, 同样也可以根据所选天线类型由基站位置与格点 \mathbf{p}_i^G 之间的几何关系求出到达角度值;

[0023] 对于集合 Ω 中任意一个格点 \mathbf{p}_i^G , 定位中心将 L 个基站的所有阵元接收信号排成列矢量, 可以得到:

$$[0024] \quad \mathbf{r}^{(k)} = \Phi(\mathbf{p}_i^G) \boldsymbol{\alpha} + \mathbf{v}^{(k)} \quad (2)$$

[0025] 此处 $\mathbf{r}^{(k)} = [r(0)^T, \dots, r(M-1)^T]^T$ 是一个 $LM \times 1$ 的矢量, 其中第 m 项 $\mathbf{r}(m) = [r_1^{(k)}(m), \dots, r_L^{(k)}(m)]^T$; $\Phi(\mathbf{p}_i^G) = [\boldsymbol{\phi}^{(k)}(0)^T, \dots, \boldsymbol{\phi}^{(k)}(M-1)^T]^T$ 是一个 $LM \times L$ 矩阵, 而其中 $\boldsymbol{\phi}^{(k)}(m) = \text{diag}(\phi_1^{(k)}(m), \dots, \phi_L^{(k)}(m))$, $\text{diag}(\cdot)$ 表示对角矩阵; $\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{L-1}]^T$ 是一个 $L \times 1$ 矢量, 表示信道衰减系数; $\mathbf{v}^{(k)}$ 也是一个 $LM \times 1$ 矢量, 包括噪声和模型误差;

[0026] 因此对于所有 N_Ω 个格点, 完备原子库可以构造如下:

$$[0027] \quad \tilde{\Phi} = [\Phi(\mathbf{p}_1^G), \dots, \Phi(\mathbf{p}_{N_\Omega}^G)] \quad (3)$$

[0028] 此处 $\tilde{\Phi}$ 个 $LM \times LN_\Omega$ 的矩阵; 从而稀疏直接定位模型可以表示为:

$$[0029] \quad \mathbf{r}^{(k)} = \tilde{\Phi} \tilde{\boldsymbol{\alpha}} + \mathbf{v}^{(k)} \quad (4)$$

[0030] 其中 $\tilde{\boldsymbol{\alpha}}$ 是一个 $LN_\Omega \times 1$ 的块稀疏矢量, 即 $\tilde{\boldsymbol{\alpha}}$ 可以分成 N_Ω 个长度为 $L \times 1$ 的子块, 但其中只有第 i 块的 L 个系数非零, 而其余系数均为零, 因此只要找到该块所对应的格点位置, 就可以近似认为是待确定移动终端位置;

[0031] 4) 稀疏重构: 根据压缩感知原理, 本发明的稀疏直接定位方法可以归结求解下述方程:

$$[0032] \quad \hat{\tilde{\boldsymbol{\alpha}}} = \arg \min \|\tilde{\boldsymbol{\alpha}}\|_1$$

$$[0033] \quad (5)$$

$$[0034] \quad \text{s.t.} \quad \|\mathbf{r}^{(k)} - \tilde{\Phi} \tilde{\boldsymbol{\alpha}}\|_2 \leq \varepsilon$$

[0035] 其中 $\hat{\tilde{\boldsymbol{\alpha}}}$ 表示 $\tilde{\boldsymbol{\alpha}}$ 的估计值, ε 表示误差容限; 计算出 $\hat{\tilde{\boldsymbol{\alpha}}}$, 就可以得到其非零块位置, 其对应的格点位置就是要估计的移动终端位置; 压缩感知理论中已有的算法可以求解方程 (5), 如凸优化算法、贪婪算法等。

[0036] 本发明的有益效果主要体现在以下几个方面:

[0037] (1) 本发明的方法由于不需要进行时延、角度、强度等特征参数估计, 因而避免了同步、峰值检测等参数估计中的难点问题, 同时也去除了参数估计环节误差对定位精度的影响, 可以比两步定位方法获得更高的定位精度。

[0038] (2) 本发明的方法利用定位问题的稀疏性特征, 提出稀疏直接定位方法, 将直接定位方法从现有的格点搜索方式变为依据接收信号判断稀疏向量中非零值所在位置的方式,

一次计算即可得出移动终端位置坐标,可以大大降低计算复杂度。

[0039] (3) 本发明的方法也不同于指纹 (Fingerprint) 定位法。本发明方法建立的过完备原子库由确定关系计算得到,无需像指纹数据库那样必须随着环境的改变而相应调整,甚至重建,可以有效地节省建设与维护成本。

附图说明

[0040] 图 1 是本发明稀疏直接定位方法的流程图;

[0041] 图 2 是现有技术中两步定位方式示意图;

[0042] 图 3 是现有技术中直接定位方式示意图;

[0043] 图 4 是本发明实施例中格点划分示意图;

[0044] 图 5 是本发明实施例中仿真结果图。

具体实施例

[0045] 为了更好地理解本发明的技术方案,以下将结合附图及具体实施例对本发明的工作流程及有益效果进行详细说明。

[0046] 在本实施例中,定位区域如图 4 所示,4 个基站的坐标分别为 (500m, 500m), (500m, -500m), (-500m, -500m), (-500m, 500m),用符号 $\mathbf{q}_n = (x_n^B, y_n^B)$, $n \in \{1, 2, 3, 4\}$ 表示。选择基站 1 作为定位中心,并且基站之间可以互相通信。每个基站安装一部均匀线阵天线 (UniformLinearArray, ULA),天线阵元数均为 10,阵元间隔取为信号波长的一半。信道幅度响应服从均值为 0,标准差为 0.01 的正态分布,信道相位响应服从 $(-\pi, \pi)$ 上的均匀分布,信号载波频率为 900MHz。格点划分方式采用均匀划分方式,格点间隔为 20m,这样在所围区域内共设定了 $N_\Omega = 51 \times 51$ 个格点。由于定位区域是四个基站所围区域,因此这些格点位置可以预先得到,记为 $\mathbf{p}_i^G = (x_i^G, y_i^G)$, $i \in \{1, 2, \dots, N_\Omega\}$ 。

[0047] 由于基站和格点位置都是已知的,因此从格点 \mathbf{p}_i^G 到第 n 个基站所经历的时延 $\tau_n(\mathbf{p}_i^G)$ 可以由公式 $\tau_n(\mathbf{p}_i^G) = \sqrt{(x_n^B - x_i^G)^2 + (y_n^B - y_i^G)^2} / c$ 直接计算得到,其中 c 表示光速。同样地,格点 \mathbf{p}_i^G 和第 n 个基站的波达角也可以通过计算得到,为 $\theta_{n,i} = \tan^{-1} \left(\frac{y_n^B - y_i^G}{x_n^B - x_i^G} \right)$ 。于是,当采用均匀线阵时,第 n 个基站的阵列响应矢量为 $\boldsymbol{\theta}_n(\mathbf{p}_i^G) = [1 e^{j\zeta d \cos \theta_{n,i}} \dots e^{j\zeta(M-1)d \cos \theta_{n,i}}]^T$,其中 $\zeta = 2\pi / \lambda$ 为波数, λ 是信号波长, d 为阵元间隔。注意此处的时延和阵列响应是根据几何关系直接计算得到,并非通过参数估计得到,因此可以在定位前预先获得。相应地,根据上述时延和阵列响应建立的过完备原子库 $\tilde{\Phi} = [\Phi(\mathbf{p}_1^G), \dots, \Phi(\mathbf{p}_{N_\Omega}^G)]$ 也可以预先建立,并且只要基站位置和格点划分方法不改变,过完备原子库也不会发生改变。

[0048] 在过完备原子库建立后,根据 $\tilde{\mathbf{a}}$ 的块稀疏特性,本实施例采用一种块结构的贪婪算法 -BCOSAMP 算法 (Baraniuk, R. G., Cevher, V., Duarte M. F., and Hegde, C., 'Model-based compressive sensing', IEEE Transactions on Information Theory, 2010, Vol. 56, No. 4, pp. 1982-2001.) 进行稀疏重构,所得 $\tilde{\mathbf{a}}$ 中非零块所对应格点位置即为所求移动终端位置。一般来说,移动终端位置 \mathbf{p} 不会正好等于格点位置 \mathbf{p}_i^G ,但当格点密度足够大时,可以做到 $\mathbf{p}_i^G \approx \mathbf{p}$ 。

[0049] 采用计算机仿真验证本发明的性能（仿真中使用的是奔腾 IV(2.4GHz) 处理器和 1GB 内存的计算机），统计运行 1000 次的平均定位效果，仿真结果如图 5 所示。如图所示，稀疏直接定位方法的定位性能要优于 Weiss 方法，尤其在低信噪比时，该方法可以明显地改善定位精度；而在高信噪比时两种定位算法的性能接近。然而，稀疏直接定位方法平均运行一次只需 0.021 秒，而 Weiss 方法要 7.251 秒，可见稀疏直接定位方法的计算时间都要远小于 Weiss 方法，也即该方法的复杂度要低很多。

[0050] 以上实施例仅为说明本发明的技术思想，不能以此限定本发明的保护范围，凡是按照本发明提出的技术思想，在技术方案基础上所做的任何改动，均落入本发明保护范围之内。

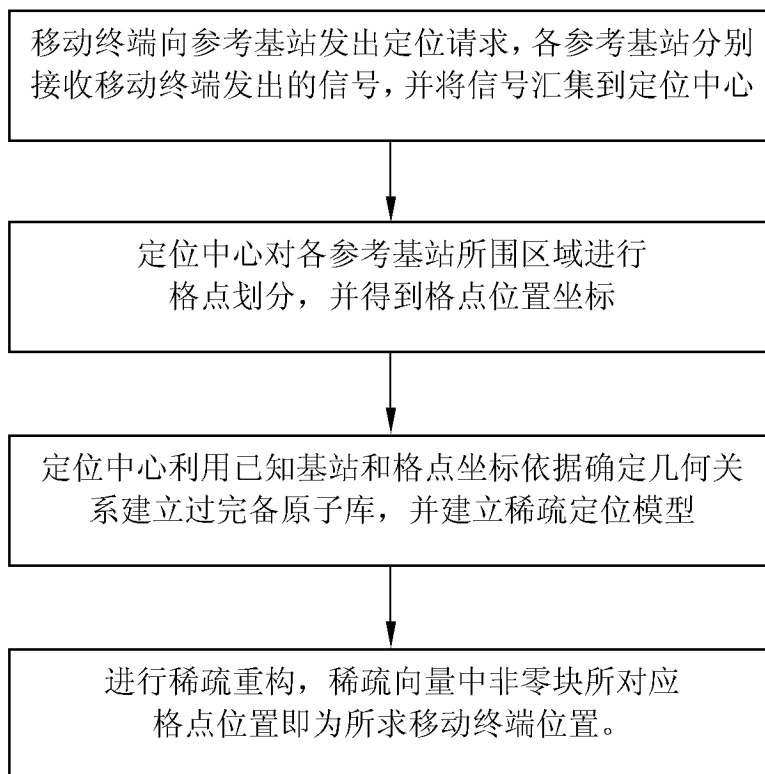


图 1

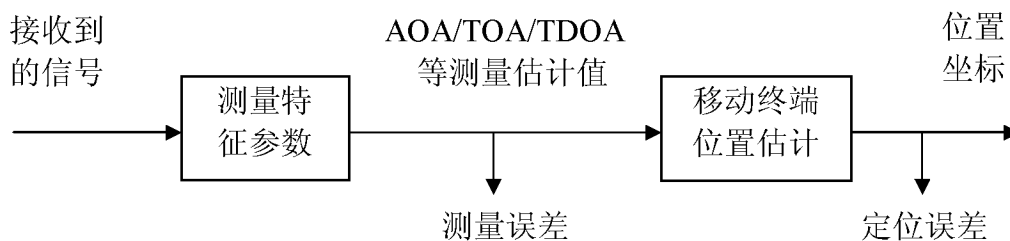


图 2

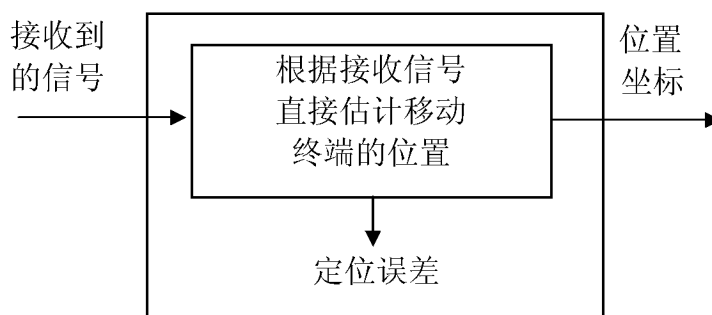


图 3

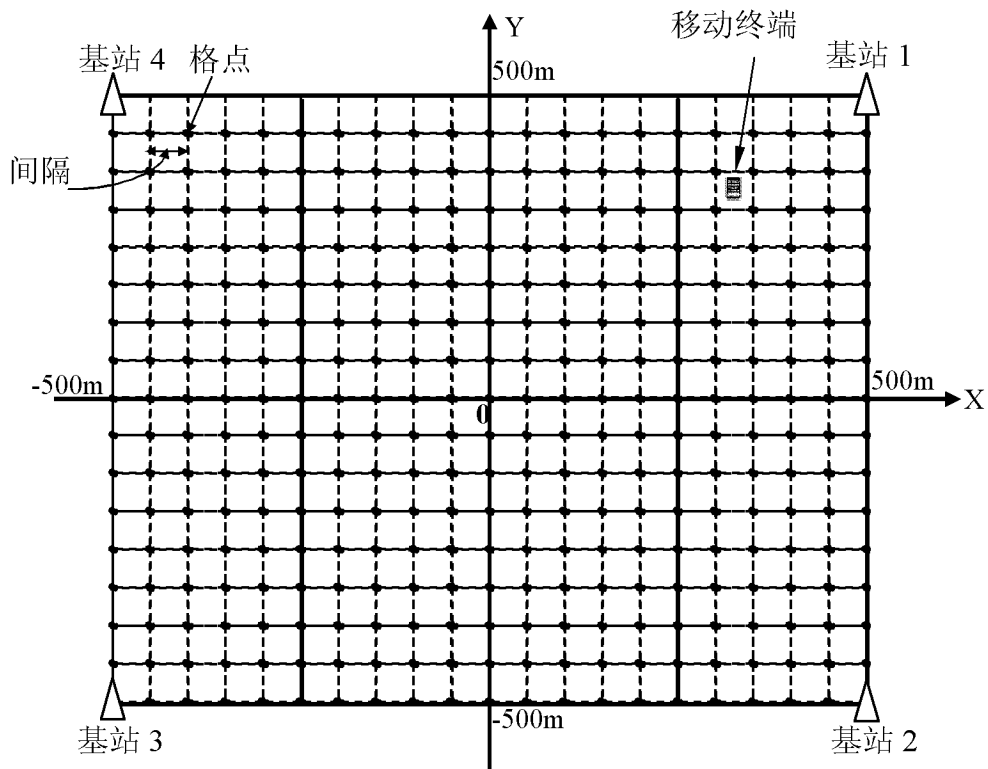


图 4

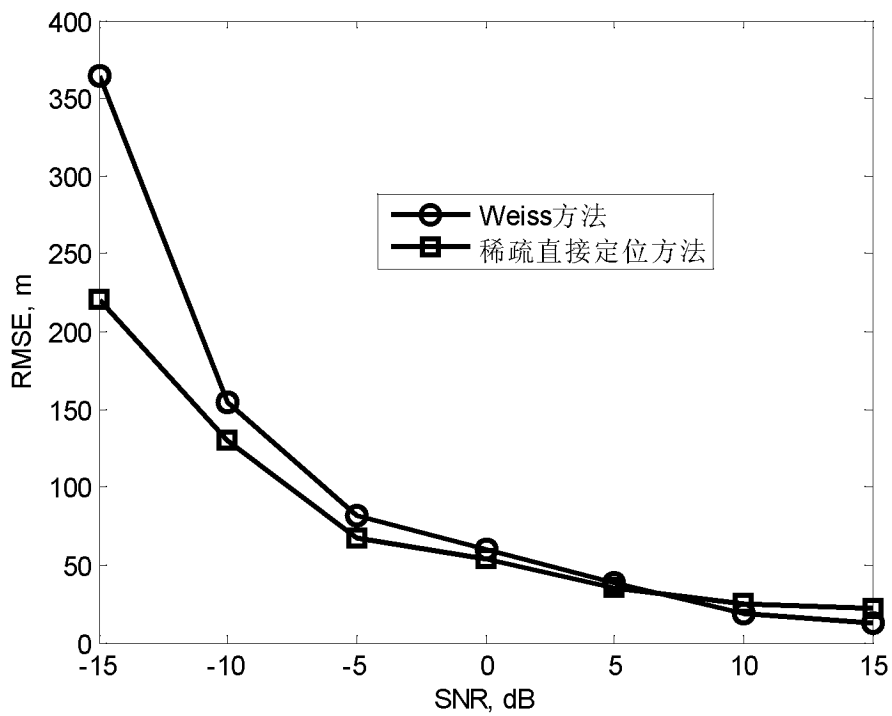


图 5