

面向变电站智能巡检 5G 大规模 MIMO 融合定位方法

马助兴^{1*}, 张立硕¹, 徐红元¹, 郑焕坤², 赵智龙¹, 康哲¹

(1. 国网河北省电力有限公司检修分公司, 河北省 石家庄市 050013;

2. 华北电力大学, 河北省 保定市 071000)

5G Large-scale Antenna Fusion Positioning Method for Intelligent Inspection of New Substations

MA Zhuxing^{1*}, ZHANG Lishuo¹, XU Hongyuan¹, ZHENG Huankun², ZHAO Zhilong¹, KANG Zhe¹

(1. State Grid Hebei Maintenance Branch, Shijiazhuang 050013, Hebei Province, China;

2. North China Electric Power University, Baoding 071000, Hebei Province, China)

Abstract: With the continuous advancement of the construction of new power systems, the large-scale access of power terminals and acquisition equipment has created huge challenges for the inspection work of substations, and the implementation is difficult and the positioning accuracy cannot be guaranteed. In this regard, this paper designs a fusion positioning algorithm based on 5G massive MIMO. First, the static beamforming method is used to fit the coarse positioning architecture to determine the search area of the direct positioning method; then, the fourth-order cumulant is derived to fit the approximate field model and computes adaptive weights associated with far-field base stations. Finally, a location-aware model based on FNDP is constructed, and the direct positioning method is effectively applied to the coarse positioning area, which solves the problem of large errors in dense cells relying on the traditional angle of arrival positioning method. The simulation results show that under the same experimental environment, the massive MIMO fusion positioning technology based on the 5G base station in the far and near scenarios proposed in this paper has higher positioning accuracy and stability, and can effectively ensure the accuracy of the inspection and positioning in the station.

Keywords: new power systems; substations; fusion positioning; large-scale antennas; 5G

摘要: 随着新型电力系统建设的不断推进, 电力终端和采集类设备的大范围接入, 对变电站的巡检工作开展产生了巨大的挑战, 实施难度大、定位精度无法保障。为此, 设计了一种基于5G的大规模MIMO的融合定位算法, 首先, 利用静止波束成形方法拟合粗定位体系结构, 确定直接定位方法的搜索区域。然后, 推导四阶累积量拟合近场模型, 并计算与

远场基站关联的自适应权值。最后, 构建了一种基于远场与近场联合直接定位的位置感知模型, 将直接定位方法有效应用于粗定位区域, 解决了依靠传统到达角定位方式密集小区误差大的问题。仿真结果表明, 在相同的实验环境下基于5G基站的远近场景大规模MIMO融合定位技术具有更高的定位精度和稳定性, 能够有效保证站内巡检定位的准确性。

关键词: 新型电力系统; 变电站; 融合定位; 大规模天线; 5G

0 引言

近年来, 随着“双碳”目标的不断推进, 分布式能源、源网荷储一体化等基础设施建设不断投入, 电网建设工程数量实现了跨越式增长^[1-4]。智能巡检是变电站缺少人员看守时, 确保变电站安全可靠运转的重要手段^[5-6]。然而随着能源互联网战略目标的深入实施, 站内变电设备和传感装置的广泛部署, 存在大量的非视距传输环境, 导致变电站巡检定位精度低^[7]。此外在变电站室内密闭空间环境内, 北斗、GPS等系统存在定位盲区, 目前主要采用标签扫描定位方式, 只能反映目标设备在变电站内的大致位置, 无法有效支撑室内变电站巡检对位置信息精确的需求^[8]。因此迫切需要适应变电站室内环境的位置感知技术, 实现高精度的定位。

5G凭借其高可靠、低时延、大带宽的网络优势被广泛应用于现有的电力通信网络, 并在多个中国地市局公司开展试点应用。大规模天线作为5G关键技术之一, 除了能够有效满足海量用户接入对通信容量的需求, 而且在定位方面具有很大的潜力^[9-11]。近年来, 基于5G网络的定位技术主要有到达方向 (direction of

基金项目: 国家电网有限公司科技项目 (基于3D虚拟技术和智能研判的变电站智能安全管控技术与设备评估, kj2021-054)。

Science and Technology Foundation of SGCC (kj2021-054).

arrival, DOA) 定位、指纹定位、全球导航卫星系统 (global navigation satellite system, GNSS) /5G集成定位等方法, 大多数定位方式能够结合5G基站的特点, 具备米级定位精度^[12-13]。然而, 这些方法都忽略了多输入多输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) 角度检测的潜在优势, 随着天线数量的增加, 接收天线的阵列流形更接近于信号子空间, 角度测量的精度明显提高^[14]。目前到达方向定位技术, 主要有MUSIC和ESPRIT, 尽管这些定位方式能够很好获得位置感知对象的方位角分辨率, 但在匹配和两步定位过程中仍会引入累积误差^[15-16]。此外, 受到变电站本身地理环境的制约, 变电站内电力设备众多, 存在较多的非视距传输环境, 定位精度难以有效保障。同时, 采用5G角度定位存在超密集网络导致的基站覆盖范围减少、阵列孔径较大, 显著增大近场距离, 从而导致近场球面波对角度估计的误差也更为明显的问题^[17]。

为了解决密集组网下的近场误差和多径复杂度等问题, 本文提出一种基于5G大规模MIMO的远场与近场联合直接定位 (far-field and near-field direct positioning, FNDP) 方法。利用位置感知模型直接搜索坐标, 比传统的角度定位具有更好的耦合性。

1 面向变电站巡检的5G大规模MIMO的远场融合定位模型

假设有 M 个视距基站 (base station, BS), 每个基站配置 $K \times 2L (K \times 2L > 100)$ 根天线, 在BS附近接入边缘计算服务器 (mobile edge computing, MEC) 灵活感知站内用户位置信息, 完FNDP成变电站智能巡检过程的实时定位。采用多基站定位时, 移动终端需要全方位广播信号, MEC作为中央计算服务器用于上行定位, 对多基站定位数据进行融合处理。

用户根据是否在基站范围内被分为近场和远场用户, 如图1所示。用户向基站发送位置信号 $S(t)$ 。

在近场范围内, 第0根和第1根天线接收的相位差为

$$\varphi_L = L\omega + L^2\psi \quad (1)$$

其中:

$$\omega = \frac{2\pi d \cos \theta_k}{\lambda} \quad (2)$$

$$\psi = \frac{\pi d^2}{\lambda d_k} \sin^2 \theta_k \quad (3)$$

θ_l 和 d_l 分别为DOA和第 l 列参考天线的距离 $l \in [-L, L]$, λ 为信号波长, d 为阵列间距。

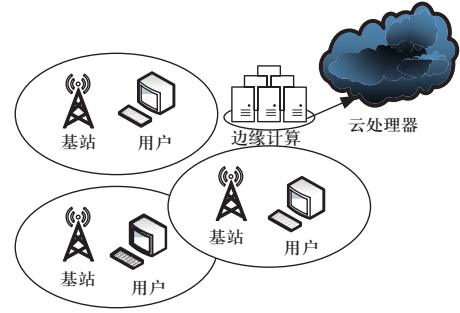


图1 5G大规模MIMO架构定位图

Fig. 1 5G massive MIMO architecture positioning diagram

$\theta_{k,0} = \theta_0 + \delta_k, k \in [1, 2, \dots, K]$, K 为该阵列的行数, δ_k 为纵向阵列引起的方位误差。为了确保噪声子空间存在, 需满足 $K < L$ 。

对于远场模型, 假设 $d_k \rightarrow \infty$, $\psi \rightarrow 0$, 因此

$$\varphi_L = L\omega + L^2\psi = -\frac{2\pi d \cos \theta_k}{\lambda} \quad (4)$$

天线阵列流可以表示为一个矩阵

$$\mathbf{A}_M = [a(\theta_1, d_1), a(\theta_2, d_2), \dots, a(\theta_k, d_k)] \quad (5)$$

$$\mathbf{S}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_K(t)]^T \quad (6)$$

$$\mathbf{n}_M(t) = [n_{-L}(t), \dots, n_0(t), \dots, n_L(t)]^T \quad (7)$$

$$a(\theta, d) = [e^{-j\varphi-L}, \dots, e^{-j\varphi L}] \quad (8)$$

第 M 个基站的到达信号可表示为

$$\mathbf{R}_M(t) = \mathbf{A}_M \mathbf{S}(t) + \mathbf{n}_M(t) \quad (9)$$

$$\mathbf{R}_M(t) = [r_{M,-L}(t), \dots, r_{M,0}(t), \dots, r_{M,L}(t)]^T \quad (10)$$

式中: θ_M 表示第 M 个基站的阵列; $R_M(t)$ 、 $n_M(t)$ 分别为接收信号和噪声。

假设用户在定位节点 $p = p(p_{x0}, p_{y0})$ 的基站位置为 $p_M = (p_{Mx}, p_{My})$, 则

$$\theta_M = \arctan\left(\frac{p_{My} - p_{y0}}{p_{Mx} - p_{x0}}\right) \quad (11)$$

因此接收信号的位置函数可表示为

$$\mathbf{R}(t) = \mathbf{A}_M(p) \mathbf{S}(t) + \mathbf{n}_M(t) \quad (12)$$

将角度搜索转换成空间搜索。定位步骤大概划分为4部分: 粗定位法、直接精确定位法、改进的空间搜索法、参数计算。

2 面向变电站巡检的5G大规模MIMO的远场融合定位算法

2.1 粗定位

初始定位区域的选择在一定程度上有利于降低算法的复杂度和减少多路传播的数量。基于5G大规模

MIMO的广播特性, 本文提出一种新的MIMO初始定位方法, 克服了传统4G MIMO定位, 波束形成向量只集中于方向信号上, 定位精度模糊的缺点。基于5G MIMO的定位方式, 将波束形成作用于所有的5G信号, 在一个区域有12束, 每束的范围是 10° , 根据终端接收到的波束, 确定一个大概的方位角度, 具体定位方式如图2所示。

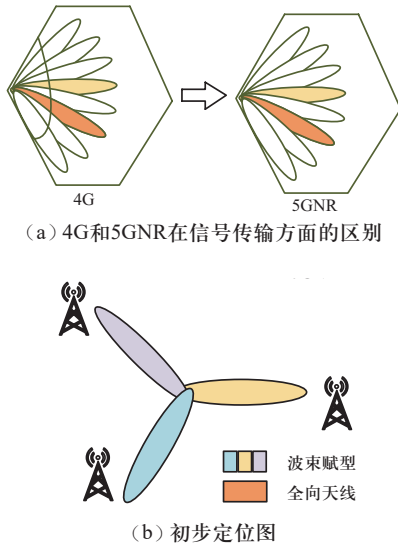


图2 基于5G的初始粗定位方法

Fig.2 Initial coarse positioning method based on 5G

本文所提出的粗定位方式主要基于波瓣信号进行定位, 基站将波瓣的固定区域和MIMO接收信号叠加发送到MEC, 完成初始位置的计算并通过基站反馈给终端, 在保障位置感知精度的同时, 进一步降低定位时间, 具体定位过程如下。

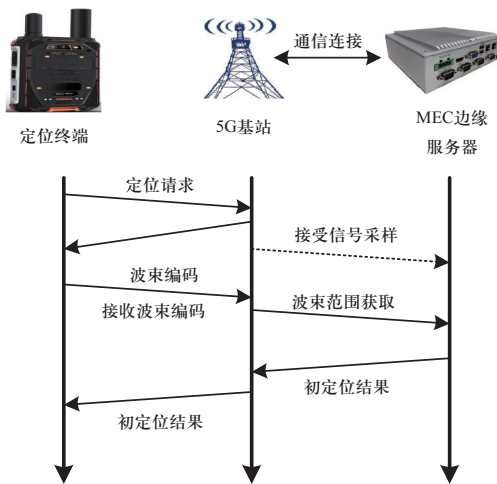


图3 基于5G直接定位方式流程图

Fig.3 Flow chart of direct positioning method based on 5G

首先定位终端通过全向天线向周围5G基站发送位置感知请求。当接收到定位请求时, 基站感知终端位置信息并将波瓣信息发送给终端, 终端对接收到的波瓣编码进行确认反馈。最终, 基站将这些确认的位置信息和波束范围信息打包发送给边缘服务器进行统一的位置计算, 从而完成最终定位的过程。从图3中可以看出与传统定向4G多基站定位方式相比本文所提出的定位方法, 只需与5G基站进行两次信息交互就能获取准确的位置信息, 此外通过位置计算信息的下沉至边缘服务器降低了位置和处理的时间。

2.2 直接定位法精确定位

在超密集的情况下, 多路径的方向是随机的, 只有直接路径可以在一点上相交, 而非直接路径不能相交。因此, 直接定位方法在多径环境下具有良好的性能, 将坐标带入计算中得到结果, 并进行公式推导。为了与模型保持一致, 本文分别对远场和近场定位信号进行计算。

这里引入四阶累积量, 克服近场信号定位过程中的非线性问题, ψ 表示 φ_L , 这里有

$$\begin{aligned} \text{cum}\{r_{1,h_1}(t), r_{1,h_2}(t), r_{1,h_3}^*(t), r_{1,h_4}^*(t)\} = \\ \text{cum}\{s(t)e^{j(h_1 w + h_1^2 \varphi)}, s(t)e^{j(h_2 w + h_2^2 \varphi)}, \\ [s(t) \times e^{j(h_3 w + h_3^2 \varphi)}]^*, [s(t) \times e^{j(h_4 w + h_4^2 \varphi)}]^*\} = \\ e^{j[(h_1 + h_2 - h_3 - h_4)w + (h_1^2 + h_2^2 - h_3^2 - h_4^2)\varphi]} \times \\ \text{cum}\{s(t), s(t), s^*(t), s^*(t)\} = \\ C_{4,s} e^{j[(h_1 + h_2 - h_3 - h_4)w + (h_1^2 + h_2^2 - h_3^2 - h_4^2)\varphi]} \end{aligned} \quad (13)$$

式中: h 代表第 h 根天线, 其中 $h_3 = -h_1$, $h_4 = -h_2$, 公式(13)可以重新写为

$$\begin{aligned} \text{cum}\{r_{1,h_1}(t), r_{1,h_2}(t), r_{1,h_3}^*(t), r_{1,h_4}^*(t)\} = \\ \text{cum}\{r_{1,h_1}(t), r_{1,h_2}(t), r_{1,-h_1}^*(t), r_{1,-h_2}^*(t)\} = \\ C_{4,s} e^{j2(h_1 + h_2)w} \end{aligned} \quad (14)$$

消除公式(14)中的非线性部分, 根据式(14), 可以得到 $c(h_1, h_2) = \text{cum}\{r_{1,h_1}(t), r_{1,h_2}(t), r_{1,-h_1}^*(t), r_{1,-h_2}^*(t)\}$ 的四阶累积量矩阵 C , 其中 h_1, h_2 可以从 $[-L, L]$ 中选择。

$$C = \begin{bmatrix} c(-L, -L) & c(-L+1, -L) & \cdots & c(L, -L) \\ c(-L, -L+1) & \ddots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c(-L, L) & \cdots & \cdots & c(L, L) \end{bmatrix} \quad (15)$$

这里有

$$C = BDB^H \quad (16)$$

$$\mathbf{D} = \text{diag}[C_{4,s_1}, C_{4,s_1}, \dots, C_{4,s_1}] \quad (17)$$

$$\mathbf{B} = [b(\theta_1), b(\theta_1), \dots, b(\theta_1)] \quad (18)$$

引入线性权重因子 $\mathcal{G}_{\text{linear}}$ 有效降低信号峰值间的差异。 $Y_1 = \mathcal{G}_{\text{linear}}$ 为近场计算

$$Y_1 = \mathcal{G}_{\text{linear}} / \|b(\theta_k) U_{\text{near}, N}\|_2 \quad (19)$$

式中: $b(\theta)$ 为修正后的天线阵列信息流, 它取决于四阶项和选择的天线源。

通过权重因子将多峰转化为单峰, 提高角度分辨率。

$$\mathbf{B} = [b(\theta_1), \dots, b(\theta_k)] = [a(\theta_1) \odot \text{Re}v[a^*(\theta_1)], \dots, a(\theta_1) \odot \text{Re}v[a^*(\theta_1)]] \quad (20)$$

对于远场信号, Y_M 通过协方差矩阵分解计算。由于矩阵分解后子空间的正交性, 可以得到

$$Y_M = 1 / \|a(\theta_k) U_{\text{far}, N}\|_2 \quad (21)$$

基于公式(11)变化获得最终的位置结果。

$$t = \sum_{k=1}^K \mathcal{G}_{\text{nonlinear}, k} Y_k(p), p = (x, y) \in \Omega \quad (22)$$

式中: $\mathcal{G}_{\text{nonlinear}, k}$ 为自适应非线性权值。直接定位算法流程如表1所示。

表 1 直接定位方法

Table 1 Direct positioning method

| 步骤 | 直接定位算法 |
|----|-------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | 变量初始化: 输入粗定位区域 Ω , 接收信号 $R_M(t)$ 和待测坐标 $p = (x, y)$, $p \in \Omega$ 。 |
| 2 | 基于 Ω 确定基站远场 (F) 和近场 (N)。 |
| 3 | 基于公式 (11) 计算基站 M 和 p 的角度 $\theta_{p, M}$ 。 |
| 4 | 如果基站 $M \in F$ |
| 5 | 通过COV, 获得远场距离 |
| 6 | 当 $\theta_k = \theta_{p, M}$ 时通过公式 (21) 计算 Y 。 |
| 7 | 否则 |
| 8 | 基于公式 (18) 计算信号子空间 $U_{\text{near}, N}$ 和 $\mathcal{G}_{\text{linear}}$ |
| 9 | 基于公式 (19) 计算 Y , 这里有 $\theta_k = \theta_{p, M}$ |
| 10 | 计算 $\mathcal{G}_{\text{nonlinear}}$ |
| 11 | 基于公式 (22) 完成直接位置定位结果的计算 |

2.3 改进的空间搜索

为了使终端位置感知结果更准确, 需对初定位结果进一步的细化, 具体公式为

$$P_t = \arg \max_p \sum_{k=1}^K \mathcal{G}_{\text{nonlinear}, k} Y_k(p), p = (x, y) \in \Omega \quad (23)$$

式中: $\arg \max$ 表示最大坐标的返回值。为了简化

搜索难度, 提高位置感知效率, 本文采用 x 、 y 坐标并行搜索方式得到 (x_0, y_0) 。同时为了进一步优化位置感知精度, 在 (x_0, y_0) 附近进行重复搜索。定义一个范围 Ω_s , 其中 $(x = x_0 + i \times l_{\text{step}}, y = y_0 + i \times l_{\text{step}})$, $i = -2, -1, 0, 1, 2$, l_{step} 是搜索步长, 这里采用回溯线搜索的算法, 首先选择一个较大的搜索范围完成步长的初始化, 然后按照一定的比例逐渐缩小, 直到目标函数的下降要与步长和下降方向成一定的比例, 即完成搜索步长的确定^[18]。并通过反向搜索的方式解决搜索区域溢出的情况。

综上所述, FNDP算法可概括为表2。

表 2 FNDP算法

Table 2 FNDP algorithm

| 步骤 | FNDP算法 |
|----|---------------------------------------------------------------------|
| 1 | 初始化定位区域 Ω , 接收信号 $R_M(t)$, 坐标 $p = (x, y)$, $p \in \Omega$ |
| 2 | 通过粗定位区域半径 Ω 定义近场 (N) 和远场距离 (F) |
| 3 | 基于 p 和基站 M 并通过公式 (11) 计算完成 $\theta_{p, M}$ 定位角度的计算 |
| 4 | 如果 $(x, y) \in \Omega_s$ |
| 5 | 基于算法1计算 (x_0, y_0) |
| 6 | 滑动窗口到 Ω_s |
| 7 | 通过算法1计算更新 (x_0, y_0) , 并检查是否会溢出, 直到溢出。 |
| 8 | 得到定位结果 (x_0, y_0) |

2.4 基于FNDP定位算的线性和非线性权重分析

1) 线性权重。

系统定位过程中的线性权重表示为

$$\Delta\theta = \arccos \frac{P}{1 + Qx_k} - \arccos P \quad (24)$$

由于 $Qx_k \rightarrow 0$, 可以用泰勒近似得到

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= \arccos P(1 - Qx_k) - \arccos P \\ &= \frac{\pi}{2} - P(1 - Qx_k) - \frac{\pi}{2} + P \\ &= PQx_k \end{aligned} \quad (25)$$

x_k 为固定值, 用它来表示线性相关性。

$$\mathcal{G}_{\text{linear}} \begin{cases} + \frac{1}{R} \left(\frac{n_{\text{step}}}{L_{\text{length}} / l_{\text{step}}} \right), \vec{v} \| A \\ - \frac{1}{R} \left(\frac{n_{\text{step}}}{L_{\text{length}} / l_{\text{step}}} \right), \vec{v} \| -A \end{cases} \quad (26)$$

公式 (26) 为线性方程, 基于初始局部区域进行

优化。式中： R 是 Ω 的最大直径； n_{step} 表示实时搜索频率； L_{length} 和 l_{step} 为当前方向的长度以及每一步的长度； $\vec{v}\|A$ 、 $\vec{v}\| - A$ 分别表示与索引方位相同和相反的阵列流。

2) 非线性权重。

由于配电环境存在大量高压和高电磁干扰的设备，环境复杂，需要选择高信噪比的信号进行定位。

远场信号为平行波，即 $\mathbf{a}_M(\theta) = \mathbf{a}_M(\theta_1) = \mathbf{a}_M(\theta_2) = \dots = \mathbf{a}_M(\theta_k)$ ，因此可以得到

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_A &= \mathbf{a}_M(\theta)E[S_M(t) * S_M^H(t)]\mathbf{a}_M(\theta) = \\ & \mathbf{a}_M(\theta)P_M\mathbf{a}_M^H(t) = \\ & U_S \Sigma_S U_S^H \end{aligned} \quad (27)$$

定义

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_{\text{nonlinear},M} &= [\mathbf{a}_M^H(\theta)\mathbf{R}_A^+\mathbf{a}_M(\theta)]^+ = \\ & [\mathbf{a}_M(\theta)]^+ [\mathbf{a}_M(\theta)P_M\mathbf{a}_M^H(\theta)] [\mathbf{a}_M^H(\theta)]^+ = \\ & [\mathbf{a}_M(\theta)]^+ \mathbf{a}_M(\theta)P_M\mathbf{a}_M^H(\theta) [\mathbf{a}_M^H(\theta)]^+ \end{aligned} \quad (28)$$

式中： P_M 为基站接收信号的功率。

为降低运算复杂度，假设 $\mathbf{b}(\theta) = \mathbf{b}(\theta_k)$ ，因此有

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_A &= [\mathbf{b}(\theta)\mathbf{C}\mathbf{b}(\theta)]^+ = \\ & [\mathbf{b}(\theta)]^+ [\mathbf{PDP}][\mathbf{b}(\theta)]^+ = \\ & [\mathbf{b}(\theta)]^+ \mathbf{b}(\theta)P_M\mathbf{b}^H(\theta) [\mathbf{b}^H(\theta)]^+ = c_{4,s_k} \end{aligned} \quad (29)$$

根据峰度的定义，有

$$\mathcal{G}_{\text{nonlinear}} = \sqrt{m_4 / (C_A + 3)} = p_1 \quad (30)$$

式中： m_4 为接收信号的第四矩； p_1 为基站1的接收功率。

3 仿真结果

在本章通过matlab仿真验证本文所提出面向变电站巡检的5G大规模天线融合定位方法的有效性，将从粗定位分析、定位精度和角度分辨率三个方面对该方法进行仿真验证。

3.1 粗定位分析

本文所提出了一种粗定位方法，不需要完全建立连接，只需要接收基站发出的信号。为降低定位过程中计算复杂性，基于日常运行过程中积累的数据进行预测，基于波束成行的方式将固定区域分割成像素点进行二进制运算，有效降低位置计算过程中算法的复杂性，减少计算时间。在资源占用方面，变电站内变电设备和环流装置相对较多，在巡检过程众多设备同时进行定位需要同时占用较大的传输带宽，基于本文所提出的粗定

位方式，终端设备在定位过程中只占用所连接基站的网络资源，有效节约了站内的带宽。

表3对比了本文所提出的粗定位方式与传统定位方式。

表3 不同定位算法对比分析

Table 3 Comparative analysis of different positioning algorithms

| | TOA方式 | 本文所提出的方式 |
|------|-------|----------|
| 连接数量 | 超过3个 | 1 |
| 通信次数 | 2 | 2 |
| 计算类型 | 循环积分 | 多元二进制计算 |
| 计算设备 | 终端设备 | MEC |

通过对比文献[17]中的传统到达时间定位 (time of arrival, TOA)，即通过监测位置感知信号在基站和终端这段距离的到时间完成具体定位信息的确定的方式相比，本文所提出的定位方式在多个层面上都明显优于传统定位算法。

3.2 定位精度

仿真过程中采用3个基站对变电站发射终端进行定位，基站的坐标分别为(0,0)、(300,600)、(200,-300)。将原点的基站视为近场，其他为远场，基站采用MIMO系统。用户发射器发射频率为3.5 GHz的余弦信号作为定位信号。为了便于搜索，在此仿真中采用了 $d = \lambda / 2$ 。

选择(100,100)锚点定位，在整个粗定位区域内进行FNDP计算。从图4可以看出，锚点处峰值比较明显。由于搜索方向与BS和终端用户的连接角度相同，在空间的其他地方会出现脊状线。

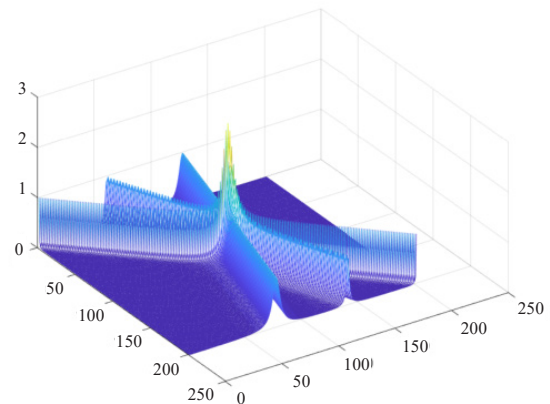


图4 FNDP空间搜索效果图

Fig. 4 FNDP spatial search renderings

图5是定位方法精度的性能分析。为了便于比较, 本文给出了传统两步法^[12]、DPD-MUSIC^[16]、FNDP的均方误差进行对比分析。从图中可以看出, FNDP相比其他两种方式具有较好的性能, 通过远近场融合定位方式不但提高了定位精度, 还降低了计算复杂度。

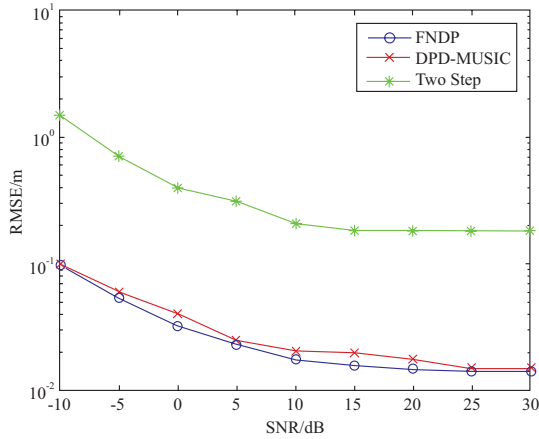


图 5 定位精度性能分析

Fig. 5 Performance analysis of positioning accuracy

在第二种情况下, 假设信噪比固定在10dB。而用户的位置通过从(100, 100)到(20, 20)的直线逼近BS, 目标从远场变为近场。一般来说, 角定位误差随着目标的逼近而增加。然而, 当考虑阵列波的近场时, 这种趋势变得难以确定。从图6可以看出, 本文提出的方法在接近BS时, 均方根误差不断减小。因为, 本文所提出的FNDP算法对近场球面波有明显的削弱作用, 从而有效降低定位误差。

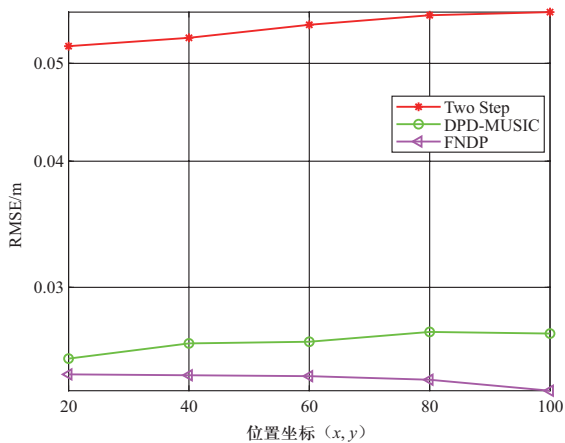


图 6 目标接近BS时定位精度情况分析

Fig. 6 Analysis of positioning accuracy when the target approaches BS

为了验证本文所提出的定位方式的稳定性, 将定位终端从(10, 110)移动到(40, -40), 并在整个过程中添加10dB的随机衰减。仿真结果如图7所示, 本文所提融合定位方式能够有效覆盖多个角度, 同时采用加权定位方式其信号的稳定性更明显。

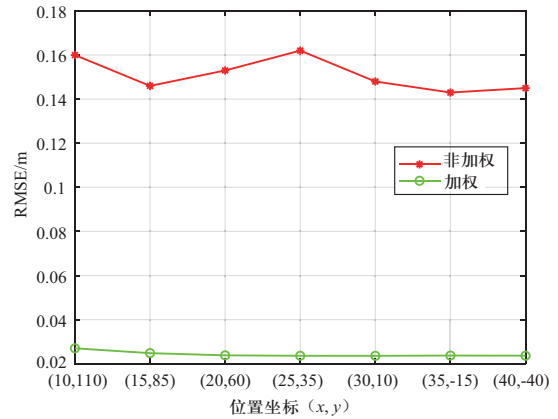


图 7 不同坐标点的加权和未加权误差

Fig. 7 Weighted and unweighted errors of different coordinate points

图8为近场天线数量和定位精度的关系, 从图中可以看出, 随着天线数量K的增加定位精度也明显的提升, 但是由于天线间干扰的存在不会无条件增大, 因此在保证位置感知准确性的情况下, 考虑到成本问题, 天线数量K = 5比较合适。

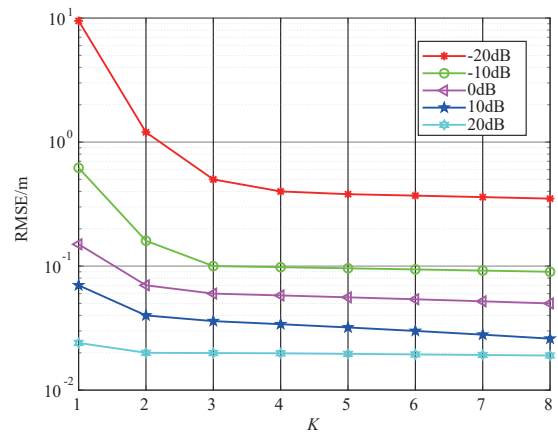


图 8 近场基站行数K对定位精度的影响

Fig. 8 Influence of the number of near-field base station rows K on the positioning accuracy

接下来主要考虑频率和信号类型对FNDP算法定位精度的影响。如图9所示, 余弦信号的定位结果明显优于传统的随机信号, 不难理解, 由于余弦信号本身具有较强的规律性, 定位过程中阵列流形计算更容易。同时, 随着频率的增高, 周期性变得越充分, 更

容易获得相位差。综上,该方法在各个频段都具有一定的适用性。

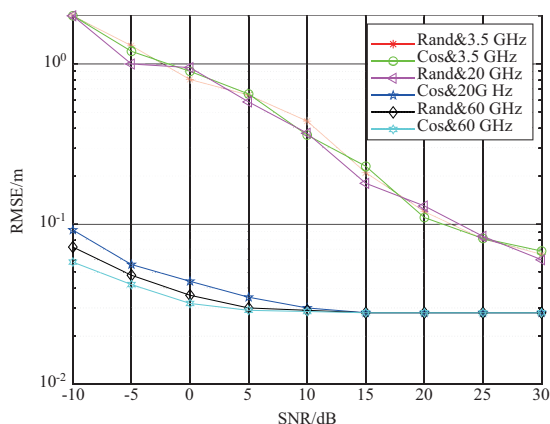


图9 频率和信号类型的影响

Fig. 9 Effects of frequency and signal type

4 结语

变电站内高压、高电磁干扰设备较多,同时存在大量的非视距传输环境,站内巡检实施难度大、定位精度低。本文提出了一种基于5G大规模天线远近场融合的定位算法。首先,利用波速成型方法拟合粗定位体系结构,确定搜索区域。然后,推导四阶累积量来拟合近场模型,并计算出与远场基站关联的自适应权值。最后,构建位置感知模型,有效地将直接定位方法应用于粗定位区域,通过近场和远场位置感知结果有效融合,解决了传统到达角的定位方式密集小区误差大的问题。

参考文献

[1] 陈国平, 梁志峰, 董昱. 基于能源转型的中国特色电力市场建设的分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 369-379.
CHEN Guoping, LIANG Zhifeng, DONG Yu. Analysis and reflection on the marketization construction of electric power with Chinese characteristics based on energy transformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 369-379 (in Chinese).

[2] 徐天奇, 田业, 高鑫, 等. 新能源全消纳并网友好型虚拟发电厂优化调度研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 33-38.
XU Tianqi, TIAN Ye, GAO Xin, et al. Optimal dispatching of virtual power plant with new energy power generation full consumption and friendly integration into power grids [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 33-38 (in Chinese).

[3] 毛安家, 马静, 蒯圣宇, 等. 高比例新能源替代常规电源

后系统暂态稳定与电压稳定的演化机理[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2745-2756.

- MAO Anjia, MA Jing, KUAI Shengyu, et al. Evolution mechanism of transient and voltage stability for power system with high renewable penetration level[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2745-2756 (in Chinese).
- [4] 黄山, 吴振升, 任志刚, 等. 电力智能巡检机器人研究综述[J]. 电测与仪表, 2020, 57(2): 26-38.
HUANG Shan, WU Zhensheng, REN Zhigang, et al. Review of electric power intelligent inspection robot[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(2): 26-38 (in Chinese).
- [5] 王建邦, 袁智勇, 陈波, 等. 变电站巡检机器人数据驱动无模型自适应控制[J]. 电测与仪表, 2019, 56(19): 114-120.
WANG Jianbang, YUAN Zhiyong, CHEN Bo, et al. Data driven model-free adaptive control for substation inspection robot[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(19): 114-120 (in Chinese).
- [6] 董翔宇, 季坤, 朱俊, 等. 对特高压变电站巡检机器人路径规划改进蚁群算法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 154-160.
DONG Xiangyu, JI Kun, ZHU Jun, et al. A retrofitted ant colony algorithm for inspection robot path planning in UHV substations[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 154-160(in Chinese).
- [7] 郑杰. 视觉与惯导信息融合的变电站巡检机器人定位方法及应用[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2020.
ZHENG Jie. Positioning method and application of substation inspection robot based on fusion of vision and inertial navigation information[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2020(in Chinese).
- [8] 刘永福, 黄芳艳, 林镇滔, 等. 基于超声波的无人机室内定位技术研究[J]. 科技与创新, 2020(1): 51-53.
LIU Yongfu, HUANG Fangyan, LIN Zhentao, et al. Research on indoor positioning technology of UAV based on ultrasonic wave[J]. Science and Technology & Innovation, 2020(1): 51-53 (in Chinese).
- [9] 谢石木林. 基于5G的变电站电气设备智能巡检技术研究与应用[J]. 电力信息与通信技术, 2021, 19(12): 109-116.
XIE Shimulin. Research and application of intelligent inspection technology for substation electrical equipment based on 5G[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2021, 19(12): 109-116 (in Chinese).
- [10] 李枫航, 唐波, 齐道坤, 等. 变电站内5G基站天线对二次设备的电磁干扰[J]. 南方电网技术, 2021, 15(10): 111-117.
LI Fenghang, TANG Bo, QI Daokun, et al. Electromagnetic interference from 5G base station antenna in substation on secondary equipment[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(10): 111-117 (in Chinese).
- [11] 唐宜彬, 邓煜霖. 北斗导航与5G技术在电力行业中的应用[J]. 中国新通信, 2021, 23(9): 37-38.

- [12] 张路, 王楠. 基于5G通信系统的室内定位及导航解决方案[J]. 电信快报, 2021(12): 9-13.
- [13] 刘黎. 面向5G大规模天线的角度定位技术[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.
- [14] 左燕, 刘雪娇, 彭冬亮. 距离相关噪声AOA协同定位下无人机路径优化方法[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(4): 1192-1198.
ZUO Yan, LIU Xuejiao, PENG Dongliang. UAV path planning for AOA-based source localization with distance-dependent noises[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021, 43(4): 1192-1198 (in Chinese).
- [15] 张曦文. 基于TDOA和AOA的无线定位算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [16] 黄东华, 赵勇胜, 赵拥军, 等. 基于DOA-TDOA-FDOA的单站无源相干定位代数解[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(3): 735-744.
HUANG Donghua, ZHAO Yongsheng, ZHAO Yongjun, et al. An algebraic solution for single-observer passive coherent location using DOA-TDOA-FDOA measurements[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021, 43(3): 735-744 (in Chinese).
- [17] 刘振, 苏晓龙, 刘天鹏, 等. 基于矩阵差分的远场和近场混合源定位方法[J]. 雷达学报, 2021, 10(3): 432-442.
LIU Zhen, SU Xiaolong, LIU Tianpeng, et al. Matrix differencing method for mixed far-field and near-field source localization[J]. Journal of Radars, 2021, 10(3): 432-442 (in Chinese).
- [18] 潘金凤, 徐芝美, 徐秀美. 基于改进回溯线搜索的二维梯

度投影法[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2019, 40(5): 432-436.

PAN Jinfeng, XU Zhimei, XU Xiumei. An improved backtracking line search method for 2D projected gradient method[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2019, 40(5): 432-436 (in Chinese).

收稿日期: 2023-01-01; 修回日期: 2023-02-08。



马助兴

作者简介:

马助兴(1979), 男, 高级工程师, 研究方向为大电机及运行, 新能源发电及并网, 电力储能应用。通信作者, E-mail: 282200100@qq.com。

张立硕(1989), 男, 工程师, 研究方向为电气自动化, 新能源发电及并网, 电力储能应用。

徐红元(1989), 男, 高级工程师, 研究方向为新型电力系统、发电储能。

郑焕坤(1980), 男, 讲师, 主要研究方向为多能源系统优化与稳定分析, 微电网优化运行。

赵智龙(1989), 男, 工程师, 研究方向为电力设备监测、大数据, 电力采集和分析。

康哲(1989), 男, 工程师, 研究方向为电力人工智能。

(责任编辑 张鹏)