

基于 TOA 压缩感知的矿井分布式目标定位方法

刘真真¹, 田子建¹, 王文清², 徐志明¹, 刘婷¹, 黄蕾¹, 张向阳¹

(1. 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083; 2. 北京工业职业技术学院, 北京 100042)

摘要: 基于目前矿井集中式目标定位系统存在可靠性较差的问题, 分析构建分布式矿井目标定位系统的必要性以及优势, 并提出分布式矿井目标定位系统的组成框架。为实现分布式矿井定位计算机低功耗、轻量化, 提出基于指纹库压缩感知的矿井分布式目标定位方法, 介绍基于指纹库压缩感知矿井分布式目标定位方法的离线和在线定位 2 个阶段的主要工作流程, 进行了粗定位过程和精定位过程的算法设计, 实现了仿真验证方案的设计和算法编程。研究表明: 基于 TOA 压缩感知的矿井分布式目标定位方法在定位误差和实时性有较好的性能, 其定位误差与网格划分的数量有关系, 相同的巷道定位区域情况下网格数量越大, 其定位误差越小。

关键词: 矿井定位; 分布式; 目标定位; 指纹库; 压缩感知

中图分类号: TP393

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2018)09-0188-08



Mine distributed target location method based on TOA compressed sensing

LIU Zhenzhen¹, TIAN Zijian¹, WANG Wenqing², XU Zhiming¹, LIU Ting¹, HUANG Lei¹, ZHANG Xiangyang¹

(1. School of mechanical and electrical information engineering China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China;

2. Beijing Polytechnic College, Beijing 100042, China)

Abstract: Based on the problem of poor reliability of centralized target positioning system, the necessity and advantages of constructing distributed target positioning system were analyzed. The composition framework of distributed target positioning system was proposed. In order to realize the low power consumption and weight saving of distributed mine positioning computer, a distributed mine target localization method based on fingerprint database compression perception was proposed. The main work chart of offline and on-line positioning based on the fingerprint sensing compressed sensing mine distributed target localization method was put forward. The algorithm of coarse positioning process and fine positioning process were designed. The simulation verification scheme design and algorithm programming were realized. Simulation results showed that the method proposed in this paper had good performance in positioning error and real-time performance. The positioning error was related to the number of grids. The larger the number of grids was, the smaller the positioning error was in the same laneway locating area.

Key words: mine location; distributed; target location; fingerprint database; compressed sensing

0 引 言

矿井人员位置监测系统(又称煤矿井下作业人员管理系统等)是矿井安全生产的重要保障和应急救援必要手段, 对提高生产效率, 保障井下人员的安全, 灾后及时施救与自救都具有十分重要的意

义^[1-3]。2000 年国内科研单位和厂家开始研制煤矿井下人员位置监测系统, 鉴于当时技术水平的限制, 国内大部分人员位置监测系统都是采用射频识别(RFID, Radio Frequency Identification)技术设计制造的, 但基于 RFID 技术的人员位置监测系统定位精确取决于 2 个读卡器间距, 精度难以保障。

收稿日期: 2018-04-09; 责任编辑: 赵瑞 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2018.09.030

基金项目: 国家重点研发计划专项资助项目(2016YFC0801800); 国家自然科学基金资助项目(51674269); 北京工业职业技术学院重点课题资助项目(bgzykyz201605, bgzyky201780z)

作者简介: 刘真真(1993—), 女, 安徽亳州人, 硕士。E-mail: lzz01030578@163.com

引用格式: 刘真真, 田子建, 王文清, 等. 基于 TOA 压缩感知的矿井分布式目标定位方法[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(9): 188-195.

LIU Zhenzhen, TIAN Zijian, WANG Wenqing, et al. Mine distributed target location method based on TOA compressed sensing[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(9): 188-195.

目前矿井目标定位系统基本都采用集中式,其特点是布设在井下的参考节点测出目标节点相对参考节点的距离(在 RFID 情况下,目标识别卡是否通过读卡器),参考节点将这些信息经由光纤以太网组成的矿井信息传输主干网络传送到地面定位计算机,由位于地面的定位计算机通过计算得出目标节点的坐标位置信息,所有关于目标节点的信息都汇聚到地面定位计算机,由地面定位计算机解算出目标节点的坐标位置信息,因此称为集中式,矿井目标定位系统的可靠性取决于光纤以太网矿井信息传输主干网络,如果矿井信息传输主干网络故障,则矿井目标定位系统就失效了,由于井下所有安全监测监控数据都占用矿井信息传输主干网络,特别是井下视频监控的普遍应用,不可避免地造成矿井目标定位数据的传输时延。

针对传统集中式矿井目标定位系统存在的问题,笔者提出分布式矿井目标定位系统,其关键是将定位计算机的功能下移并分散布置在井下,井下定位计算机也不是一个,而是由多个部署在井下的定位计算机组成分布式的矿井目标定位系统,井下定位计算机将目标节点的坐标位置信息通过矿井信息传输主干网络传送到地面调度中心,一旦井下发生灾害导致矿井信息传输主干网络故障,井下人员的坐标位置信息存储在就近的井下定位计算机上,只是无法送到地面调度中心,分布式结构为灾后应急救援获取人员位置信息留存了希望和可能。同时分布式结构将提高矿井目标定位系统的实时性,将传统的集中式地面定位计算机的功能分散布置在井下巷道中,巷道中的目标节点坐标位置信息由就近的井下定位计算机解算得到,因此其实时性得到很大的改善,但是由于煤矿井下现场供电受防爆要求、电缆敷设、巷道条件等限制^[4],给矿井定位计算机供电带来诸多不便,定位计算机就地电池供电是矿井分布式定位系统得以实现的前提和基础,因此分布式定位计算机需要尽可能地做到低功耗、轻量化,定位计算机在功能上需要尽可能地简化计算的复杂度,以适应低功耗的要求。传统的集中式矿井目标定位系统不仅实时性差,且可靠性较差,但存在结构简单,成本低,布设方便的优势。

基于指纹库压缩感知的分布式定位系统在现场的应用分前期的离线阶段和在线定位阶段,前期离线阶段是通过现场实测为各个区域的分布式定位计算机建立指纹库,这部分工作完成后,定位系统才正

式交付使用,各分布式定位计算机处于在线定位阶段。

分布式定位系统的硬件调试安装完成后首先将巷道定位区域网格化,进行离线阶段的测试,建立每个网格编号和到达时间(TOA, Time of Arrival)特征信号之间相对应的指纹库,而在线定位阶段,目标节点所在区域的分布式定位计算机根据参考节点测量到的 TOA 信号,与指纹库中的特征值查表对比,依据压缩感知算法得到与之相对应的网格编号。

由于指纹库是先期已建立好的,离线阶段指纹数据库的建立需进行大量的数据测试,要消耗能源和工作量,但离线阶段的能耗和工作量分担了分布式定位计算机在线定位阶段的能耗和算法复杂度,使在线定位阶段分布式定位计算机只需要查表对比,并利用压缩感知算法就可以对目标进行定位,大幅简化分布式定位计算机的算法复杂度,降低功耗,达到电池供电的低功耗要求。

前期已有文献提出将压缩感知算法应用于目标定位^[5-8],但是缺乏对压缩感知算法应用于 TOA 特征信号指纹库的实施方案和性能分析,笔者提出一种基于 TOA 压缩感知的矿井分布式目标定位方法。该方法的实现包括粗定位过程和精定位过程,在粗定位过程利用信号到达时间作为节点连通的依据,生成目标区域索引集,接着在精定位过程利用压缩感知进行降维、重构定位,解算得到目标网格索引,为分布式矿井定位系统的实现提供了方法。

1 分布式矿井目标定位系统建模与压缩感知理论

1.1 压缩感知定位模型

在空间域中定位的稀疏性使得利用压缩感知理论进行井下无线定位成为可能。由于在离散空间域中目标节点的位置在某个特定时刻是唯一的,因此目标位置可以近似为稀疏向量。故在将压缩感知理论应用于目标定位时,应考虑在满足定位要求的同时将定位问题转化为压缩感知问题。根据矿井巷道划分为具有 N 个网格点的离散网格区域,一般来说, N 被选择为尽可能大以提高定位精度。在巷道壁上设置 M ($M \ll N$) 个位置已知的参考节点(RP)来进行信号到达时间(TOA)测量,通过测量参考节点接收到目标节点发送的无线电信号的 TOA 值来确定目标节点处于网格中的哪些位置。井下巷道节点部署模型如图 1 所示。



图1 巷道节点部署模型

Fig. 1 Roadway node deployment model

故基于压缩感知的定位模型的数学表达式为

$$y = \Phi x \tag{1}$$

其中： Φ 为 $M \times N$ 的测量矩阵， Φ 中的任意项 $\varphi_{i,j}$ ($1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$) 为在第 j 个网格处网格点发射的无线电信号到达第 i 个参考节点的 TOA 测量值， t_{ij} 为在第 j 个网络处的网格点发射的信号到达第 i 个参考节点的 TOA 时间，其中信号到达时间为 t_i ，信号发送时间为 t_j ，即 $\varphi_{i,j} = t_{i,j} = t_i - t_j$ ； x 为 $N \times 1$ 维 K ($K \ll N$) 稀疏的目标位置向量，其非零值的位置表示目标节点的位置，即若 $x_j = 1$ ($1 \leq j \leq N$)，则目标节点位于第 j 个网格，稀疏度 K 为 1； y 为 $M \times 1$ 的测量值向量，表示 M 个参考节点采集的目标节点发送的无线电信号的实时信号到达时间，故式(1)等价于式(2)。

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{1,1} & t_{1,2} & \cdots & t_{1,N} \\ t_{2,1} & t_{2,2} & \cdots & t_{2,N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ t_{M,1} & t_{M,2} & \cdots & t_{M,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} \tag{2}$$

因此，就可以将基于 TOA 的煤矿井下目标定位问题转化为根据参考节点得到的 M 维观测矩阵重构 N 维稀疏信号的压缩感知问题。

1.2 压缩感知理论

由压缩感知理论可知，如果一个信号在某基下是稀疏的，那么就可以从一个不相关的基上利用少量的线性投影重建此信号的同时进行压缩，并且能够利用较少的采样点数对信号进行精确重构。因而，压缩感知算法的一般信号重构过程为，已知某一个测量矩阵 $A \in R^{Q \times N}$ ($Q \ll N$) 以及某未知信号 $f \in R^N$ 在该矩阵下的线性预测值 $z \in R^Q$ ，有：

$$z = Af \tag{3}$$

式(3)可以看作是未知信号 f 在 A 下的线性投影，而压缩感知理论的目的是根据压缩测量值 y 重构原始信号 f 。然而，由于 z 的维数远低于 f 的维数，式(3)有无穷多个解，即该问题是 f 不适定的，很难重构原始信号。文献[9-11]指出，如果原始信号

f 是 K 稀疏的，并且测量次数 Q (z 的维数) 满足 $Q = O(K \lg N)$ ， $O(\cdot)$ 为复杂度， z 满足约束等距性 (RIP) 条件，则信号 f 可以由测量值 z 通过求解最优 l_0 范数式最优解来精确重构稀疏信号 f ，即

$$\hat{f} = \operatorname{argmin} \|f\|_{l_0} \text{ s.t. } z = Af \tag{4}$$

所以，压缩感知算法的工作流程如图2所示。

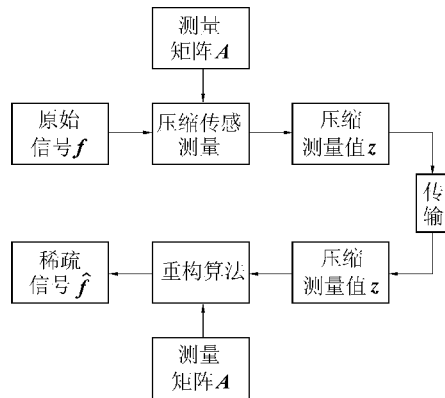


图2 压缩感知工作流程

Fig. 2 Compressed perception workflow

2 分布式压缩感知井下定位系统设计

矿井巷道作为一个密闭的受限空间，无线通信环境复杂，故在搭建系统模型时应充分考虑巷道的实际通信环境。针对矿井巷道复杂的通信环境，构建了分布式矿井巷道定位模型。矿井巷道分布式定位系统如图3所示。

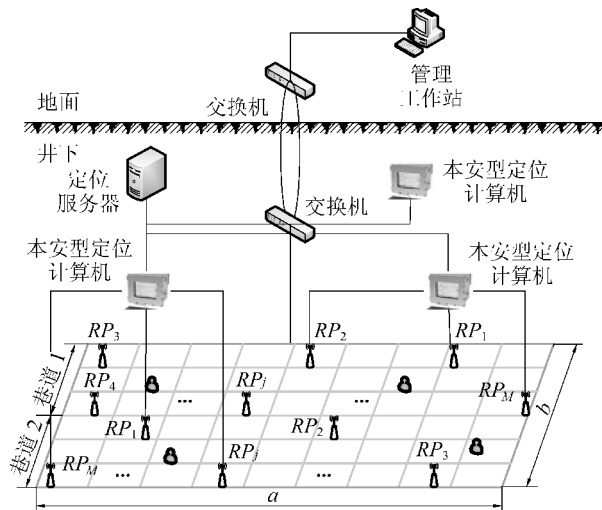


图3 矿井巷道分布式定位系统

Fig. 3 Mine roadway distributional positioning system

各参考节点 (RP) 将实时接收到的无线电信号发送给部署于该区域的分布式定位计算机，定位计算机首先对指纹库进行查表运算，接着运用压缩感

知定位算法对数据进行处理计算,计算出目标节点的网格位置。同时将计算出的目标节点位置信息通过矿井信息传输主干网络传送到地面数据调度中心,供地面数据中心调度及其他上层应用软件使用。

分布式井下在线定位阶段包括粗定位和精定位过程,其中粗定位过程的主要工作是锁定目标区域网格索引集。

在粗定位过程中,在各巷道的巷道壁上部分别部署 M 个 RP ,假设 RP_i 的连通域是以 RP_i 为中心的圆形区域, RP_i 的连通域半径已知,故 RP_i 连通域内包含网格的网格索引值可以用向量 l_i 表示,即

$$l_i = (1, 2, \dots, i, \dots, m) \quad (5)$$

其中, $m \in [1, N]$,表示 RP_i 连通域内包含网格的网格索引值。对于所有的 $RP_i (1 \leq i \leq M)$,网格索引数据表示为矩阵 L 。

$$L = (l_1, l_2, \dots, l_i, \dots, l_M)^T \quad (6)$$

故各巷道内的 RP 通过 RP 连通域构建指纹库指示网格索引,即将各参考节点的网格索引向量矩阵存入指纹库。

对于一个特定位置的测试目标 j ,如果 RP_i 可以接收到测试目标 j 发送的无线电信号,则测试目标 j 中心在 RP_i 的连通域内,通过与指纹库比对可知测试目标 j 所在区域的网格索引集 R_j 。

对于精定位过程, $RP_1, RP_2, \dots, RP_j, \dots, RP_M$ 采集的测试目标 j 发送的无线电信号的实时信号到达时间向量为

$$y = (y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_M)^T \quad (7)$$

设此时 RP_i 接收到 N 个网格处的网格点发送的无线电信号的信号到达时间为 φ_i ,即

$$\varphi_i = (t_{i,1}, t_{i,2}, \dots, t_{i,N}) \quad (8)$$

故对于所有的 $RP_i (1 \leq i \leq M)$,信号到达时间数据表示为测量矩阵:

$$\Phi = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_i \\ \vdots \\ \varphi_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{1,1} & t_{1,2} & \cdots & t_{1,N} \\ t_{2,1} & t_{2,2} & \cdots & t_{2,N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ t_{i,1} & t_{i,2} & \cdots & t_{i,N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ t_{M,1} & t_{M,2} & \cdots & t_{M,N} \end{bmatrix} \quad (9)$$

通过精定位过程得到 y 以及各 RP 接收到的 N 个网格处网格点的 TOA 测量值组成的 $M \times N$ 维的测量矩阵 Φ 利用子空间恢复定位算法即可得到测试目标 j 的 K 稀疏的恢复位置向量,再结合粗定位过

程获得的目标网格索引集选定目标网格索引,而网格索引一旦确定,即可得出测试目标的最终定位结果。笔者在粗定位过程使用了节点连通性来训练数据。综上所述,基于 TOA 压缩感知的井下定位流程如图 4 所示。

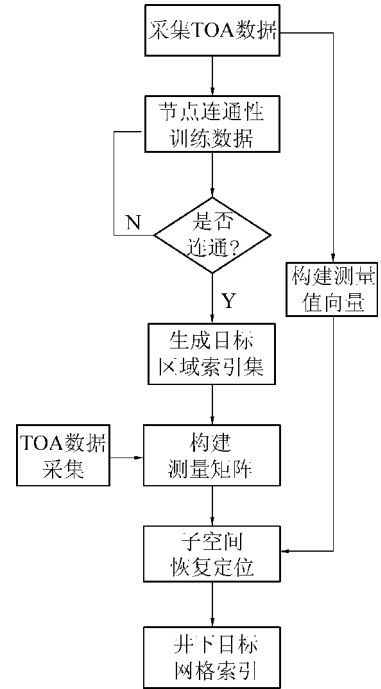


图 4 基于 TOA 的压缩感知井下定位流程

Fig. 4 Flow of compressed sensing underground mine location based on TOA

3 井下压缩感知目标定位实现

3.1 测量矩阵设计

假设位于第 j 个网格的网格点的坐标为 (x_j, y_j) ,且网格点的总数为 N ,测量矩阵 Φ 中的元素 $\varphi_{i,j}$ 为在第 j 个网格处网格点发射的无线电信号到达第 i 个参考节点的 TOA 测量值,即 $\varphi_{i,j} = t_{i,j} (1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N)$ 。故井下压缩感知目标定位系统的测量矩阵数学表达式见式(9)。

3.2 定位恢复算法

在压缩感知恢复算法中,贪婪算法具有复杂度低且运行速度快的特点,但在重构精度方面远不如凸松弛方法,故为了寻求复杂度和重构精度之间的平衡以及系统的定位精度要求,在精定位过程,笔者在 MP 算法和 OMP 算法^[12-15]的基础上,采用改进的子空间恢复算法(SP),通过选择 K 个较大非零值,得出 K 稀疏的恢复位置向量 x 的非零值位置,

即确定目标节点所在网格索引。

子空间恢复算法思想是通过输入 $M \times 1$ 维的测量值向量 \mathbf{y} 表示参考节点采集的目标节点发送的无线信号的实时信号到达时间, M 个参考节点接收到的 N 个网格处网格点的 TOA 测量值组成的 $M \times N$ 维的测量矩阵 Φ , 待定位目标节点位置向量 \mathbf{x} 的稀疏度 K , 在最多进行 K 次迭代运算过程中不断对参数进行更新, 确定测量值向量 \mathbf{y} 所属的 Φ 中 K 个列向量生成的子空间, 通过应用子空间的伪逆得到的列向量 $\hat{\mathbf{x}}$ 为对空间中的目标位置向量 \mathbf{x} 的恢复, 实现目标所在位置的估计即确定目标所在网格索引值。子空间定位恢复算法描述如下:

1) 步骤 1: 第 t 次循环迭代的子空间索引 λ_t 初始化。选择 $\Phi\mathbf{y}$ 中最大的 K 个值对应的索引作为从 Φ 中选择的列向量的索引构成子空间。第 t 次循环迭代的子空间为 Φ_{λ_t} , 子空间 Φ_p 为测量矩阵 Φ 中与测量值向量 \mathbf{y} 的 K 个最大相关列。

2) 步骤 2: 更新子空间索引值集合 P (初始值为 Φ)。加入新选择的索引 λ_t 来更新子空间索引, 即 $P = P \cup \lambda_t$ 。

3) 步骤 3: 最小二乘法求解 $\hat{\mathbf{x}}$ 。计算 $\hat{\mathbf{x}} = (\Phi_p^T \Phi_p)^{-1} \Phi_p^T \mathbf{y}$ 。

4) 步骤 4: 子空间索引选择。从步骤(3)中计算得到的 $\hat{\mathbf{x}}$ 中选择最大的 K 项对应的索引存入 λ_t 中。

5) 步骤 5: 更新残差 res 。 res 为实际信号 \mathbf{y} 与步骤(3)计算得到的 $\hat{\mathbf{x}}$ 在第 t 次循环迭代的子空间 Φ_{λ_t} 投影的残差, 初始值为 \mathbf{y} 。计算 $res = \mathbf{y} - \Phi_{\lambda_t} (\Phi_p^T \Phi_p)^{-1} \Phi_p^T \mathbf{y}$ 。

6) 步骤 6: 如果新的子空间恢复信号残差小于更新前的子空间恢复信号残差, 则返回步骤 2, 否则结束。

本文中的定位恢复算法计算复杂度低, 运算时间短, 能够满足井下目标定位的要求。

4 仿真试验和结果分析

4.1 仿真试验

为了分析本文方法的性能, 选择模拟矿井受限空间环境的试验场地是中国矿业大学(北京)逸夫楼顶层的长直走廊。该走廊长 10 m, 宽 5 m, 高 3.5 m, 将矩形走廊的 10 m × 5 m 的平面区域划分为 100 个网格, 并且在平面区域内随机均匀部署 4 个目标

信号发射器, 同时将 $M = 10$ 个信号接收模块悬挂在墙壁窗台上, 其中无明显障碍物, 试验环境如图 5 所示。如图 5 中小图部分所示, 将一个型号为 TL-AP302P 的室外无线 AP 悬挂在墙壁窗台上作为参考节点, 另一个型号为 OMT-620 的手持信号发射器作为移动目标在走廊内移动, 实时 TOA 测量值是由参考节点接收到移动目标发送的无线信号获得, 测量数据实时输入计算机, 移动目标与参考节点之间保持时间同步。

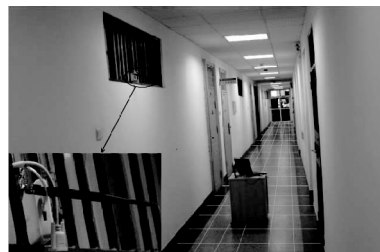


图5 仿真测试现场

Fig. 5 Simulation test site

在这种场景下将移动目标部署于不同网格位置测了 5 组数据, 定位实测试验的参数数据见表 1。

表 1 定位参数数据

Table 1 Positioning parameter data

实测试验组数	网格数 N	参考节点数 M	移动目标实际网格索引
1	100	10	2
2	100	10	45
3	100	20	73
4	200	20	103
5	200	10	179

为了直观地体现方法定位的过程及定位效果, 运用 Matlab 软件将 3.2 节所述定位恢复算法进行仿真试验, 试验中将各组分别进行 3 次 TOA 测量求均值得到的实际 TOA 测量值向量 \mathbf{y} 作为输入, 通过参考节点连通性训练程序输出移动目标索引集, 接着将测量值向量 \mathbf{y} 以及离线状态导入 Matlab 的测量矩阵 Φ , 作为 Matlab 定位重构方法的输入, 运行程序得到恢复位置向量 $\hat{\mathbf{x}}$, 最后结合移动目标索引集对位置向量定位结果进行处理, 移动目标实际位置以及本文方法的定位结果如图 6 所示。

4.2 算法及参数分析

为进一步验证本文方法的性能, 仿真分析本文定位重构算法相对于其他恢复算法在定位方面的优越性, 以及网格数 N 、参考节点数 M 、稀疏度 K 参

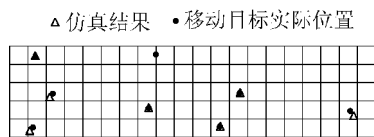


图 6 定位结果

Fig. 6 Positioning results

数变化对本文方法定位性能的影响,为了避免测量误差对定位结果的影响,所有的仿真结果均是对每组实际测量数据 3 次重复测量求均值后所得。

首先,为对比本文提出的定位恢复算法与其他贪婪恢复算法在定位方面的优越性,在保证稀疏度 $K=4$,参考节点数 $M=10$ 的情况下,选取网格数从 $N=100$ 到 200 变化时的仿真结果进行分析比较,得到目标节点的定位误差如图 7 所示,仔细分析可知,从图中可以得到,在 K, N 一定时,随着 M 值的增大,所有稀疏位置向量恢复算法的定位误差都在不断减小,即较高的 M 值能够得到更好的目标定位性能。这是因为在压缩感知理论中恢复算法中压缩投影得到的测量值越多,则目标信息获取越多,对于目标位置精确恢复的概率也就越高。而 SP 恢复算法在每次迭代过程中选取 K 个最大的列,有效地降低了算法计算过程中的复杂度,大幅提高了算法的精确度,因此 SP 恢复算法优于 OMP 恢复算法^[16] 和 CoSaMP 恢复算法^[17-18],其定位误差总是远小于其他恢复算法。

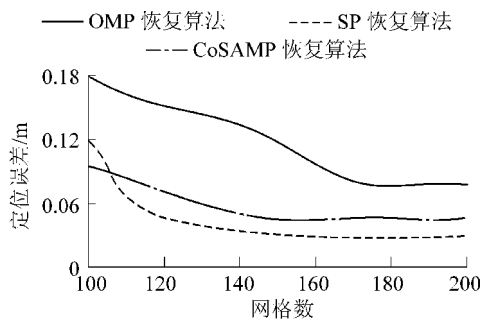


图 7 不同恢复算法定位误差对比

Fig. 7 Comparison of positioning errors of different recovery algorithms

为研究参考节点数目变化对定位性能的影响,仿真中取 $K=4, 12, 20$, 网格数 $N=200$, 当参考节点数 M 从 $2K$ 到 100 变化时,其定位误差如图 8 所示,从图中可以得到,在稀疏度 K 一定时,随着 M 值的增大,定位误差随着节点数目的增加不断减少。这是因为在应用压缩感知算法时,测量值数据越多,得到的信息越多,对稀疏信号的恢复越准确,定位误差越小。

最后,分析网格数目变化对定位性能的影响。令 $M=10, K=4, 12, 20$, 当 $N=100$ 增加到 200 时,目标定位误差逐渐降低,其结果如图 9 所示。从图中可以得到的,在参考节点数 M 一定时,随着 N 值的增大,定位误差随着网格数目的增加不断减少。这是因为在应用压缩感知算法时,网格数目越大,即稀疏度 K 越小,对稀疏信号的恢复越准确,定位误差越小。

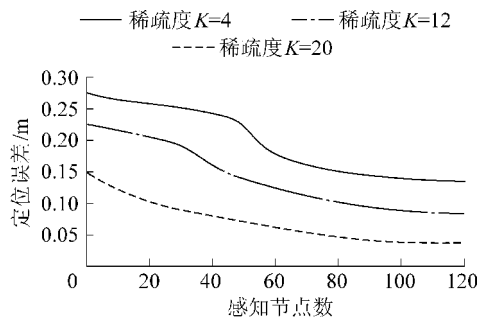


图 8 参考节点数对定位误差的影响

Fig. 8 Effect of reference number on positioning error

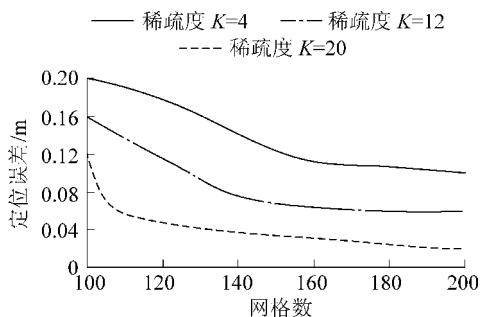


图 9 网格数对定位误差的影响

Fig. 9 Effect of grid number on positioning error

在以上仿真中,分析了不同位置向量恢复算法、参考节点数以及网格数变化对定位方法性能的影响,因此证明了本文方法具有更好的定位性能,显示了方法的优越性能。

4.3 不同定位方法对比

从定位实时性以及定位精度来进行分析,本文定位方法的运行效率更高,定位误差更小。根据图 10 的比较分析结果得到,本文定位算法的运行时间相较于其他定位算法提高了至少 57.1%,定位精度提高了至少 37.8%。之所以本文定位方法在定位精度和时效性方面有较大的优势,是由于传统的 TOA 定位方法在实际信号传输的 TOA 测量中,由于环境中因素的变化、非视距时延^[19-20] 和测量过程中的误差,会导致 TOA 测量存在误差,以至于 3 个圆的实际曲线不能交于一点,造成定位误差;同时传统的

基于 RSSI 的 3 点定位方法由于 RSSI 值是依据信号衰减模型计算得到,而信号衰减模型是一个统计模型,不能准确模拟当前通信环境的实际信号强度,同时 RSSI 值易受障碍物的遮挡、多径传播等环境因素的影响,环境适应性较差;而压缩感知技术能够大幅降低定位计算的复杂度。笔者充分利用了指纹库和压缩感知技术的优势,提高了定位的实时性和定位精度。

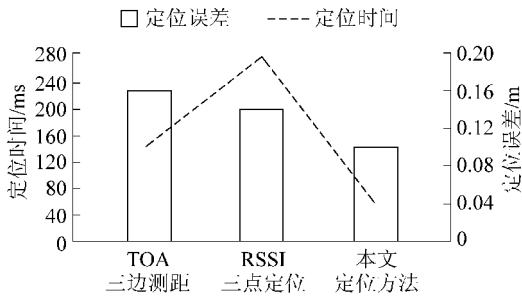


图 10 不同定位方法比较

Fig. 10 Comparison of different positioning methods

表 2 是利用表格形式对各定位算法的效果进行了归纳总结,可以看出本文定位方法相较于其他算法在定位精度和实时性方面都有提升。

表 2 定位方法比较总结

Table 2 Comparison of positioning methods

定位算法	平均误差/ m	运行时间/ ms	算法复 杂度
TOA 三边测距	0.16	140	$O(MN)$
RSSI 三点定位	0.14	280	$O(K\lg(N)N^2)$
本文定位方法	0.10	60	$O(K\lg(N)N)$

5 结 语

1) 分析了传统集中式定位系统的缺陷和不足,首次提出基于指纹库压缩感知的分布式定位系统的组成结构,分析了基于指纹库压缩感知的分布式定位系统的特点和在矿井中应用的优势。

2) 提出基于指纹库压缩感知的分布式定位系统离线和在线定位 2 个阶段的主要工作流程,进行了粗定位过程和精定位过程的算法设计。

3) 进行了仿真验证方案的设计和算法编程实现,仿真验证表明基于指纹库压缩感知的分布式定位方法相比于传统的 TOA 三边测距定位和 RSSI 三点定位,定位误差和实时性都有提高,其定位误差与网格划分的数量有关系,相同的巷道定位区域情况下网格数量越大,其定位误差越小。

参考文献 (References):

- [1] 孙继平.煤矿安全生产监控与通信技术[J].煤炭学报,2010,35(11):1925-1929.
SUN Jiping. Technologies of monitoring and communication in the coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11): 1925-1929.
- [2] 孙继平.煤矿安全生产理念研究[J].煤炭学报,2011,36(2):313-316.
SUN Jiping. Research on coal mine safety production concept [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 313-316.
- [3] 孙继平.煤矿信息化自动化新技术与发展[J].煤炭科学技术,2016,44(1):19-23,83.
SUN Jiping. New technology and development of mine informatization and automation [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 19-23, 83.
- [4] 陈鹏,刘爱军,刘璐峰,等.矿井电磁环境及电波传播特性的研究[J].通信技术,2010,43(3):54-56.
CHEN Peng, LIU Aijun, LIU Lufeng, et al. Study on mine electromagnetic environment and electromagnetic wave propagation [J]. Communications Technology, 2010, 43(3): 54-56.
- [5] 何风行,余志军,吕政,等.基于RSS的WSN多目标定位压缩感知算法优化[J].南京邮电大学学报:自然科学版,2012,32(1):24-28.
HE Fengxing, YU Zhijun, LYU Zheng, et al. Optimization of compressed sensing algorithm for multi-objective location based on RSS in WSN [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications; Natural science edition, 2012, 32(1): 24-28.
- [6] 何风行,余志军,刘海涛.基于压缩感知的无线传感器网络多目标定位算法[J].电子与信息学报,2012,34(8):716-721.
HE Fengxing, YU Zhijun, LIU Haitao. Multi-target location algorithm for wireless sensor networks based on compressed sensing [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(8): 716-721.
- [7] 张海峰,胡春海.压缩感知重构的传感器目标定位研究[J].激光杂志,2016,37(11):128-131.
ZHANG Haifeng, HU Chunhai. Sensor target reconstruction based on compressed sensing reconstruction [J]. Laser Journal, 2016, 37(11): 128-131.
- [8] 何风行,余志军.基于压缩感知的无线传感器网络多目标定位算法[J].电子与信息学报,2012,34(3):716-721.
HE Fengxing, YU Zhijun. Multi-target location algorithm for wireless sensor networks based on compressed sensing [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(3): 716-721.
- [9] 戴琼海,付长军,季向阳.压缩感知研究[J].计算机学报,2011,34(3):425-434.
DAI Qionghai, FU Changjun, JI Xiangyang. Research on Compressive Sensing [J]. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(3): 425-434.
- [10] CANDES E, WAKIN M. An Introduction to compressive sampling [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(2): 21-30.

- [11] DONOHO D. Compressed sensing [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [12] CHATTERJEES, HARI K V S, HÄNDEL P, *et al.* Projection-based atom selection in orthogonal matching pursuit for compressive sensing [C]// Communications. IEEE, 2012: 1-5.
- [13] 杨真真, 杨震, 孙林慧. 信号压缩重构的正交匹配追踪类算法综述 [J]. 信号处理, 2013, 29(4): 486-496.
YANG Zhenzhen, YANG Zhen, SUN Linhui. Summarization of orthogonal matching pursuit algorithms for signal compression reconstruction [J]. Signal Processing (China), 2013, 29(4): 486-496.
- [14] 刘冰, 付平, 孟升卫. 基于正交匹配追踪的压缩感知信号检测算法 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(9): 1959-1964.
LIU Bing, FU Ping, MENG Shengwei. A compressed sensing signal detection algorithm based on orthogonal matching pursuit [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(9): 1959-1964.
- [15] WEID, MILENKOVIC O. Subspace pursuit for compressive sensing signal reconstruction [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(5): 2230-2249.
- [16] TROPP J A, GILBERT A C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(12): 4655-4666.
- [17] NEEDELLD, TROPP J A. CoSaMP: Iterative signal recovery from incomplete and inaccurate samples [J]. Applied & Computational Harmonic Analysis, 2008, 26(3): 301-321.
- [18] LIUX P, YANG F, YI X, *et al.* A Sparsity adaptive compressive sampling matching pursuit algorithm [C]// Proceedings of the 6th International Asia Conference on Industrial Engineering and Management Innovation. Atlantis Press, 2016.
- [19] 田子建, 朱元忠, 张向阳, 等. 非视距误差抑制方法在矿井目标定位中的应用 [J]. 工矿自动化, 2015, 41(6): 78-82.
TIAN Zijian, ZHU Yuanzhong, ZHANG Xiangyang, *et al.* Application of NLOS Error suppression method in mine target location [J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(6): 78-82.
- [20] 尤凯明, 杨维, 柳瑞, 等. 矿井无线多媒体传感器网络单摄像机矿灯视频定位 [J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(7): 103-108.
YU Kaiming, YANG Wei, LIU Rui, *et al.* Mine wireless multimedia sensor Network single camera miner's lamp video positioning [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7): 103-108.