



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860,CN 42-1676/TN

## 《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: MEMS IMU 实测磁信号 MNMF 盲源分离降噪及匹配定位分析  
作者: 孟庆港, 汪金花, 王赛楠, 李鸣铎, 侯金亮  
DOI: 10.13203/j.whugis20230186  
收稿日期: 2024-03-12  
网络首发日期: 2024-03-26  
引用格式: 孟庆港, 汪金花, 王赛楠, 李鸣铎, 侯金亮. MEMS IMU 实测磁信号 MNMF 盲源分离降噪及匹配定位分析[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).  
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20230186>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20230186

引用格式：

孟庆港, 汪金花, 王赛楠, 等. MEMS IMU 实测磁信号 MNMF 盲源分离降噪及匹配定位分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20230186 (MENG Qinggang, WANG Jinhua, WANG Sainan, et al. Denoising and Matching Localization of MNMF Blind Source Separation Algorithm for Measured Magnetic Signals by MEMS IMU[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20230186)

# MEMS IMU 实测磁信号 MNMF 盲源分离降噪 及匹配定位分析

孟庆港<sup>1</sup> 汪金花<sup>1</sup> 王赛楠<sup>1</sup> 李鸣铎<sup>2</sup> 侯金亮<sup>1</sup>

1 华北理工大学矿业工程学院, 河北 唐山, 063210

2 华北理工大学电气工程学院, 河北 唐山, 063210

**摘要：**针对 MEMS IMU (Micro-Electro-Mechanical System Inertial Measurement Unit) 量测信号噪声大, 来源复杂特点, 利用盲源解混算法对动态磁序列进行了噪声分离和降噪效果的系统研究。文中引入乘性误差和加性误差建立了 MEMS IMU 动态测量磁场值误差扰动模型, 分析了 MEMS IMU 在腰部、手腕及脚踝 3 处磁测量噪声扰动规律。并在 NMF (Nonnegative Matrix Factorization) 盲源解混模型基础上, 根据磁数值特点引入重加权稀疏约束条件, 构建了动态磁序列 MNMF (Magnetic Nonnegative Matrix Factorization) 盲源解混模型。试验采用 FVM-400 磁力仪测量静态磁基准库, MEMS IMU 装置采集动态行走磁序列, 开展了 Fast ICA (Fast Independent Component Analysis)、MNMF 磁信号盲源解混试验。试验结果表明: 在磁扰动解混的仿真试验中, Fast ICA、MNMF 算法对混合磁信号解混分离指数均小于 0.1, 可以有效分离磁信号中人员行走噪声、设备振动噪声和静态磁序列; 在 MEMS IMU 实测磁数值解混试验中, MNMF 可以有效分离出与静态磁序列相近的信号, 能够提高行人动态行走状态下磁匹配定位的概率, 验证了 MNMF 盲源分离降噪对匹配定位的有效性, 也为室内自主定位磁量测值降噪处理提供了新的理论基础。

**关键词：**MNMF; MEMS IMU 磁信号; 盲源分离降噪; 地磁匹配

## Denoising and Matching Localization of MNMF Blind Source Separation Algorithm for Measured Magnetic Signals by MEMS IMU

MENG Qinggang<sup>1</sup> WANG Jinhua<sup>1</sup> WANG Sainan<sup>1</sup> LI Mingduo<sup>2</sup> HOU Jinliang<sup>1</sup>

1 School of Mining Engineering, North China University of Technology, Tangshan 063210, China

2 School of Electrical Engineering, North China University of Technology, Tangshan 063210, China

收稿日期: 2024-03-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (42274056); 河北省自然科学基金项目 (E2018209345); 河北省高等学校科学技术重点项目 (ZD2021082); 河北省高等学校科学技术研究项目 (QN2022117)。

第一作者: 孟庆港, 硕士生, 主要从事基于 MEMS 井下自主定位数值降噪算法。meng\_qg2022@163.com。

通讯作者: 汪金花, 博士, 教授, 博士生导师。jinhua66688@126.com。

**Abstract: Objectives:** With the development of indoor positioning technology towards continuity, precision, and intelligence, autonomous indoor positioning technology has become a research hotspot. The inertial acceleration and magnetic field values of the carrier can be obtained using MEMS IMU (Micro Electro Mechanical System Inertial Measurement Unit), it is an important device in positioning, however, there are difficulties in the complex noise of dynamic measurement values. For the high noise of measurement signals in low-cost MEMS IMUs, a study was conducted on the noise separation and denoising of dynamic magnetic sequences using blind source unmixing separation algorithm. **Methods:** An error model using multiplicative parameters and additive errors for MEMS IMU dynamic measurement was constructed, which expresses the error source of magnetic signals in real-time. It is analyzed the magnetic measurement noise disturbance law of MEMS IMU at waist, hand and foot, then a new algorithm Magnetic Nonnegative Matrix Factorization (MNMF) is constructed based on the Nonnegative Matrix Factorization (NMF) with adding the reweighted sparse constraint equation. The static magnetic value were measured using an FVM-400 magnetometer in study area, and magnetic sequences of pedestrian in walking using MEMS IMU. It were conducted on blind source unmixing separation and denoise test of magnetic signals using Fast ICA (Fast Independent Component Analysis) and MNMF algorithms. **Results:** The results show that: in the simulation test of magnetic disturbance unmixing, the Performance Index (PI) of FastICA and MNMF is less than 0.1, which can effectively separate the walking noise, equipment vibration noise and static magnetic sequence in the magnetic signal. FastICA has better separation effect on periodic noise, MNMF can accurately unmix the static magnetic value, and the correlation coefficient reaches 0.999. In the unmixing experiment of the measured dynamic magnetic sequence, the MNMF algorithm can separate signals similar to the static magnetic sequence, which keep relatively good magnetic spatial sequence feature, but the separation accuracy for other noises is poor; In addition, MNMF algorithm has obvious noise reduction on the measured dynamic magnetic sequence. The experiment shows, the matching probability of the magnetic sequence after denoising with the MNMF algorithm will be significantly improved, especially magnetic sequence at hand after denoising, the probability reaches about 95% with the 3-meter matching length. **Conclusions:** It is unmixing and separated the measured magnetic sequence using the MNMF algorithm, most irrelevant interference noise can be separated, and the unmixed signal is similar to the static magnetic sequence, which can improve the probability and accuracy of the geomagnetic matching positioning in the dynamic walking of the pedestrian. The noise separation of dynamic magnetic measurement using MNMF has certain effectiveness, which provides a new theoretical basis for magnetic measurement denoise of indoor autonomous positioning.

**Key words:** MNMF; MEMS IMU magnetic signal; Blind source separation noise reduction; Geomagnetic matching

随着定位技术的泛在、连续、精准、智能的发展和转型<sup>[1-3]</sup>, 基于 MEMS(Micro-Electro-Mechanical System)的自主定位技术成为研究热点方向。MEMS IMU(Inertial Measurement Unit)是行人航位推算 (Pedestrian Dead Reckoning, PDR)定位、地磁匹配与 PDR 组合定位等的数据采集设备<sup>[4-5]</sup>可以实时测量载体惯性加速度、角速度。低成本九

轴 MEMS IMU 传感器与手机集成传感器类似, 采集数据方便快捷, 不仅可以实时测量人员通行路径加速度及角速度, 还可以测量磁场值。但是其集成的轴系结构, 实测磁场值、加速度与姿态存在明显的误差传递和相互干扰<sup>[6-8]</sup>。牛小骥等<sup>[9]</sup>在共享单车定位 MEMS IMU 数值量测中, 发现量测姿态、速度与位置的误差存在明显相关性, 运动

姿态变化会使 IMU 量测产生较大的瞬间噪声。杜俊伟等<sup>[10]</sup>在 MEMS 惯性导航单元量测过程中发现, 当有随机大幅度姿态变化时, 重力加速度、角速度、会产生较多噪声, 对测量精度产生直接的影响。可见 MEMS IMU 实测数据扰动大且相关强, 解算数据易产生累积误差, 直接制约了 MEMS IMU 自主定位的精度。那么, 如何降低 MEMS 动态测量条件下噪声扰动, 如何有效减弱载体运动对动态磁测量数据的影响就显得尤为重要了, 解决这些问题将直接提高 MEMS IMU 自主定位可行性。

电子传感器量测实际信号中通常含有白噪声、干扰、漂移及偏置等多种组合误差。目前对噪声的处理方式是分阶段的。一阶段是对采集信号通过数字滤波器降噪, 剔除异常值<sup>[11-12]</sup>; 二阶段是采集信号输出后, 再通过函数模型来抑制噪声。大量试验研究表明, 经过数字滤波器初步降噪后结果可以消除传感器内部产生的大部分乘性误差, 但是对于观测过程外部环境、载体运动产生磁噪声难以消除<sup>[13-14]</sup>。可以结合 FIR(Finite Impulse Response)滤波器、小波滤波器、谱减滤波器、维纳滤波器与函数模型来抑制噪声。康瑞清等<sup>[15]</sup>针对实测的地磁数据易受到软硬磁干扰, 对实测的地磁信号分别经小波强制降噪、小波阈值降噪和基于经验模态分解的阈值滤波, 发现基于经验模态分解的阈值滤波方法降低的匹配误差最为明显。汪金花等<sup>[16]</sup>采用 Laplace、High pass 和 Sobel 卷积算子构建了井下磁数值 CEA(Convolution Enhancement Algorithms)卷积算子, 试验发现 CEA 算子卷积后降低了磁噪声扰动的影响, 增强了地磁空间匹配特征。函数模型虽然能够有效降低噪声干扰, 但信号处理时易出现降噪过度, 信号失真的问题。为了提高复杂环境下的信号降噪效果, 一些研究提出对观测信号与噪声进行分离后, 再

进行函数降噪的处理效果十分明显, 最典型应用是声音识别<sup>[17-18]</sup>。奚琦等<sup>[19]</sup>在多源动态嘈杂场景中语音识别问题, 提出了基于盲源聚类的自适应波束形成算法。这种方法无需先验信息条件下, 能够构建自适应修正目标导向矢量和协方差矩阵的估计误差, 显著提升了信号分离识别处理精度。李倩等<sup>[20]</sup>在复杂环境下对信号与船辐射噪声进行分离识别后, 再采用针对性的降噪处理, 提升信号分析准确率至 90%左右。在地磁匹配动态磁测量中, 低成本 MEMS IMU 实测磁信号含有多种噪声干扰, 地磁空间特征识别度低<sup>[21-22]</sup>, 还鲜见相关磁数据盲源解混降噪方面研究。本文针对动态磁信号不易降噪难点, 优化了 NMF 解混模型。并利用 FastICA 和 NMF 模型对九轴 MEMS IMU 采集的行人路径磁场值进行了盲源分离试验, 为精准获取实时空间点位的磁场值和提高地磁匹配定位精度提供了一种新思路。

## 1 基础理论

### 1.1 MEMS IMU 实测磁场值模型

前期大量试验表明: 人员携带定位设备正常行走过程中, 实时测量磁场值, 除了通行路径空间点位磁场值外, 还包含了两个明显磁扰动。一个是由于人迈步/踏步过程中产生磁噪声, 另一个是定位设备轻微振动产生姿态微小变化下磁噪声。

由于姿态的改变会影响地磁三轴分量的分布, 不同姿态采集的地磁分量存在较大偏差, 为解决该问题, 本文计算地磁模值作为室内磁总场值:

$$M_i = \sqrt{m_{ix}^2 + m_{iy}^2 + m_{iz}^2} \quad (1)$$

式中  $M_i$  为第  $i$  点的磁场模值,  $m_{ix}$ 、 $m_{iy}$ 、 $m_{iz}$  分别表示磁力计的三轴磁分量。

图 1 是在已知静态磁场值的固定点位置上将磁力计固定在手腕且保持手腕下垂姿态, 然后原地踏步, 约 0.5 秒/步情况下测量的磁场值。理论上在

固定基准点上，短时间内磁场值是相对恒定不变。但是从图中磁总场波动可以看出：人员行走踏步会给 MEMS IMU 设备产生一定的磁波动，大部分磁波动幅值在 0~1 000 nT 区间内波动，少量波动幅值达到近 2 000 nT。人员行走踏步磁扰动数值与行走步态大小、速度有明显关系，行进状态在一定程度上会给磁测量产生不确定噪声，行进速度越快，相对磁波动范围会增大。

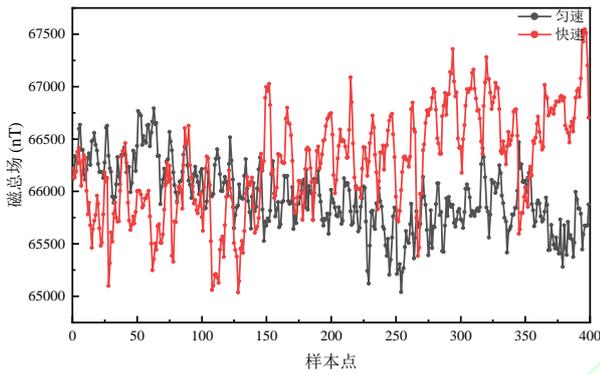


图 1 行人踏步对 MEMS IMU 磁测量产生扰动

Fig. 1 Pedestrian Walking Disturbance on MEMS IMU Magnetic Measurement

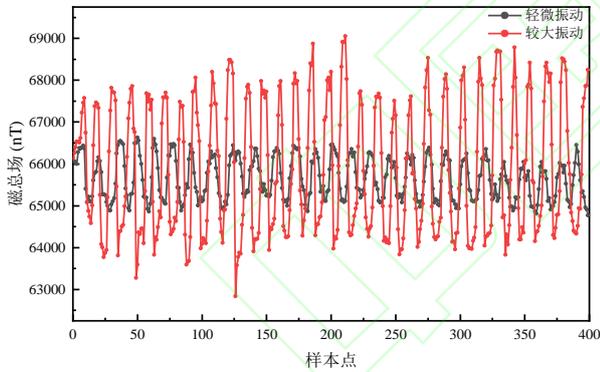


图 2 MEMS IMU 设备姿态变化产生磁扰动

Fig.2 MEMS IMU Attitude Disturbance on MEMS IMU Magnetic Measurement

图 2 是在已知静态磁场值固定点位置上将磁力计固定在手腕且保持手腕下垂姿态，然后左右抖动手腕，约 0.5 秒/次，模拟人员动态行进过程中 MEMS IMU 设备产生轻微振动条件下的磁场值波动情况。从图中可以看出，设备姿态变化和振动会给磁测量产生明显磁扰动。其幅值在 MEMS IMU 设备产生轻微振动时可以产生 1000 nT 周期磁

扰动，而较大振动时产生达 4000nT 周期磁扰动。并且姿态变化越明显，给磁场值带来的不确定噪声越大。

假设认为 MEMS 的实时测量磁数值包含空间点磁场值、行人走路、设备振动、环境变化等因素产生扰动，那么任意一点实测磁场值可以是这些干扰因素磁场的叠加。由于 MEMS 电子传感器轴系相关性，任一空间点 $P(x_p, y_p)$ 动态实测的磁场值不仅会与静态磁场值 $s_0(x_p, y_p)$ 相关，还会与采样时刻 $i$ 的行人走路状态、设备振动情况、环境变化等因素相关。那么任意一点实测磁场值可以是这些干扰因素磁场的叠加：

$$M(x_p, y_p)_i = k_i s_0(x_p, y_p) + s_{1i} + s_{2i} + s_{3i} + \varepsilon_i \quad (2)$$

式中， $M(x_p, y_p)_i$ 是 MEMS 定位设备实时测得 $P(x_p, y_p)$ 采样点 $i$ 时刻的磁总场值；

$k_i$ 是 $i$ 时刻传感器电路或器件产生乘性噪声系数，和模具组件本质敏感性能有关；

$s_0(x_p, y_p)$ 是人员经过空间点 $P(x_p, y_p)$ 的磁场值；

$s_{1i}$ 是 $i$ 时刻人员行走过程中踏步产生磁扰动，扰动表现出周期波动，但最大幅值是相对固定基数；

$s_{2i}$ 是 $i$ 时刻人员行走过程中 MEMS 定位设备振动产生磁场扰动值，其数值与载体姿态变化相关；

$s_{3i}$ 是 $i$ 时刻人员通行路径中环境干扰产生磁场值，如铁质小车动态位移产生由弱渐强瞬间磁场值；

$\varepsilon_i$ 是 $i$ 时刻实际测量随机扰动误差。

从式 (2) 可以看出，当进行静态磁测量时，人员动态行走磁扰动 $s_1$ 、设备振动磁扰动 $s_2$ 是不存在的或者说数值接近于 0。在前期大量地磁匹配仿真测试中发现，只需降低环境噪声对实测磁序列影响，就可以达到较为理想的磁匹配结果。但是

如果要将地磁匹配有效应用，不可避免会采用动态行走直接获取磁序列的方式，人员行走过程中踏步磁扰动 $s_1$ 、设备振动磁扰动 $s_2$ 会降低地磁匹配精准性，如何有效降低动态行走过程噪声扰动，还原空间磁序列特征就显得尤为重要了。

## 1.2 MEMS 磁信号盲源解混

室内或地下工程地磁匹配定位主要依据地磁基准库指纹磁空间的差异性，人员动态行走、设备振动磁扰动达到数千纳特，会淹没行人通行路径中磁总场空间差异特征，有可能直接导致地磁匹配结果失败。文中根据人员动态行走、设备振动磁扰动周期性变化特点，尝试将其从实测磁总场中分离出踏步磁扰动 $s_1$ 、设备振动磁扰动 $s_2$ ，获取较为纯净的空间磁序列。

假设实际观测过程中，测量了  $N$  个相同状态下的观测磁序列数据（后简称样本），每个样本是空间点磁总场、人员步态磁扰动、MEMS IMU 振动磁扰动及随机磁噪声的成分信号混合结果，但是信号间的混合比是动态变化的。其线性混合模型矩阵形式定义：

$$M_v = AS + \varepsilon = A \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} + \varepsilon \quad (3)$$

式中， $M_v \in R^{N \times t}$  表示  $N$  个实测磁序列信号向量，其中  $t$  为时间长度； $S \in R^{u \times t}$  表示通行路径空间点磁总场、人员步态磁扰动、MEMS 姿态磁扰动及环境干扰产生磁扰动的基向量， $u$  表示单独信号的个数，具体表示为：

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{01} & S_{02} & \cdots & S_{0t} \\ S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1t} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2t} \\ S_{31} & S_{32} & \cdots & S_{3t} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$A \in R^{N \times u}$  表示每个单独信号在混合数据中丰度矩阵。 $\varepsilon \in R^{N \times t}$  表示随机噪声、模型误差或不确定性因子。

根据信号的实际物理意义，每个成分基向量

需要满足非负性的约束条件，混合丰度矩阵  $A$  的每个分量向量和丰度矩阵  $A$  的每个元素需要满足非负性以及每个分量向量和为 1 的约束条件：

$$\sum_j A_{ij} = 1, \forall i, j, A_{ij} > 0 \quad (5)$$

盲源解混过程是在已知矩阵  $M_v$  需要求解矩阵  $A$  和  $S$ ，可以将其视为一个优化问题。通过定义目标函数和选择合适的优化方法来求解矩阵  $A$  和  $S$ 。常用分离算法有 FastICA 和 NMF 等模型。

其中 FastICA 是基于非高斯性最大化原理。它以最大化负熵作为目标函数，对观测信号  $M_v$  的采样点批处理，每次分离出一个独立成分，即可求得分离矩阵  $W$ ，然后求得混合矩阵  $A$ ，最后求得  $S$ 。目标函数具体为：

$$J(W) = \max \sum_{i=1}^p k_i \{E[G_i(W)] - E[G_i(v)]\}^2 \quad (6)$$

式中， $k_i$  是正常数， $v$  是一个具有零均值和单位方差的高斯随机变量， $G_i(\cdot)$  是某种形式的非二次函数， $W$  为分离矩阵， $A = W^T$ 。

NMF 是在矩阵分解过程中加入了非负约束条件，从而得到了完全不同的结果，与 FastICA 相比，NMF 不要求信号源统计独立和信号源非高斯分布，具有分解形式和分解结果可解释性强等优点。NMF 最常用目标函数为最小化欧式距离：

$$J(A, S) = \min_{A, S} \frac{1}{2} \|M_v - AS\|^2 \quad (7)$$

NMF 模型对目标函数  $J(A, S)$  使用梯度下降法进行迭代求解，使目标函数最小化，就可求得矩阵  $A$  和  $S$ 。但是式 (7) 目标函数存在的非凸性缺点，导致求得的结果不唯一，无法得到准确的结果。为了获得更加精确的解，可对目标函数中施加约束，来促进丰度矩阵  $A$  的稀疏性。本文采用重加权稀疏约束来促进丰度矩阵的稀疏性。

$$\min_A \|\omega \cdot A\|_1 \quad s. t. M_v = AS \quad (8)$$

式中， $\cdot$  表示对应元素相乘，此时  $\|\cdot\|$  表示向量

的1范数,  $\omega \in R^{u \times 1}$ 表示 $u$ 维的权值向量, 用于控制丰度向量 $A$ 的稀疏性,  $u$ 表示原始基向量个数。

混合磁序列解算过程的迭代权函数, 可以是根据上一次解算丰度矩阵来计算下一次迭代的权重,

$$\omega_{i,j}^{\{k+1\}} = \frac{1}{(|A_{i,j}^{\{k\}}| + eps)} \quad (9)$$

MEMS IMU 设备采集行人动态磁序列中包含踏步磁扰动、设备振动磁扰动, 这两类噪声具有一定相关性和不确定性的特点。为了保证分解磁信号高斯性和非负性, 在最小的欧氏距离约束条件基础上, 加入加权稀疏处理的约束条件, 形成适合室内定位磁测量数值的解混 MNMF(Magnetic Nonnegative Matrix Factorization)约束条件见下式(10):

$$J(S, W) = \min_{A, S} \frac{1}{2} \|M_v - AS\|^2 + \min_A \|\omega \cdot A\|_1 \quad (10)$$

即利用 MEMS IMU 实测动态磁场值, 应在式(10)目标约束条件下差异求解  $A$  和  $S$ 。

解混过程是假设成分信号基向量  $A$  和混合比例  $S$  未知, 从两个矩阵开始, 经过处理和迭代算法, 不断交替迭代来达到最小化目标函数, 从而达到最优分解结果。试验数据开展混合信号的盲源分离步骤如下:

step1: 实测量磁信号进行归一化处理;

step2: 按照式(7)初次分离基元信号  $S$  和组分矩阵  $A$ ;

Step3: 利用上步求解出组分矩阵  $A$  重新迭代计算初始权阵矩阵  $\omega$ ;

Step4: 利用式(10)再次迭代计算分离基元信号  $S$  和组分矩阵  $A$ ;

Step5: 重复步骤 2~4, 直到相邻两次计算差值在 0.001, 终止迭代计算;

Step6: 按照全局矩阵、信噪比和均方差等指标, 检测解混基元信号  $S$  的分离精度。

## 2 试验方案

### 2.1 试验设备

磁数据采集使用九轴 MEMS IMU 装置和高精度 FVM-400 磁力仪 2 种设备完成, 见图 3。图 3(a) 是动态磁数据测量设备 MEMS 惯导装置, 是九轴集成传感器等组成, 可以测量 3 轴磁分量、3 轴加速度、3 轴角速度, 采样频率为 10 赫兹, 磁力计型号为 QCM5883, 理论噪声 100nT, 可以完成数据的蓝牙传输。静态测量使用进口 FVM-400 磁力仪, 见图 3(b)。该仪器经过专业调校, 测量灵敏度达到 1 nT, 量程为 100 000 nT, 测量噪声方差 50 nT, 随机误差为 10~30 nT, 稳定性高。



(a) 九轴 MEMS IMU 装置 (b) FVM-400 磁力仪

图 3 磁测量的定位装置和设备

Fig. 3 Positioning Device of Magnetic Measurement

### 2.2 数据采集

被试对象: 6 名身高不同的大学生, 身体健康, 行走正常。

实验描述: 在标准场地为长度约 30 米楼道内, 在场地内无行人、小车等其它环境磁干扰条件下完成(1)(2)(3)实验任务。

实验任务:

(1) 在基准点处, 携带 MEMS 装置原地踏步或者轻微振动, 采样频率 10Hz, 记录空间磁总场变化数据。要注意踏步速度与匀速行走速度相同, 约 0.5 秒/步。

(2) 在试验场地使用 FVM400 开展空间点位的静态磁总场测量。空间采样间隔为 0.3 米, 每个空间点重复测量 10 次, 数值偏差小于 20nT 为合格, 取 10 次平均值作为该点静态磁总场。

(3) 在试验场地使用 MEMS 惯导装置进行动态磁测量。测试者将定位装置置于衣服兜内，按照大约 2 步/秒频率行走，MEMS 惯导装置实时记录人员通行路径的磁总场数据。

实验数据共收集到 10 组加速度变化、姿态变化与实测磁数值信号，每组信号有 12 序列，每个序列有 400 多个数据点。在动态情况下进行磁测量，开始和结束时存在一定的磁测量延迟。为了保证算法试验可靠性，统一去除了前端和后尾的部分数据点。由于试验场地无环境磁干扰条件下测量的磁总场，所以理论上可认为：测量磁数据应主要为空间点静态磁场值、踏步产生磁场值及设备振动产生磁场值的组合。

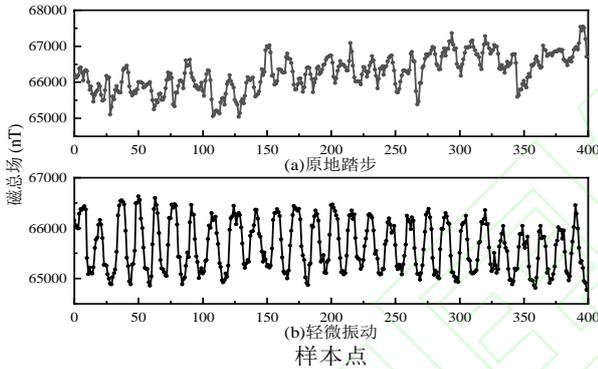


图 4 试验区内基准点原点踏步、轻微振动的磁扰动曲线  
Fig. 4 Magnetic Disturbance Curve of the Pedestrian Walking and the Slight Vibration on the Reference Point in the Test Area

图 4 是在同一个基准点上的磁扰动，图 (a) 是原地踏步产生的磁扰动 $S_1$ ，图 (b) 是装置轻微

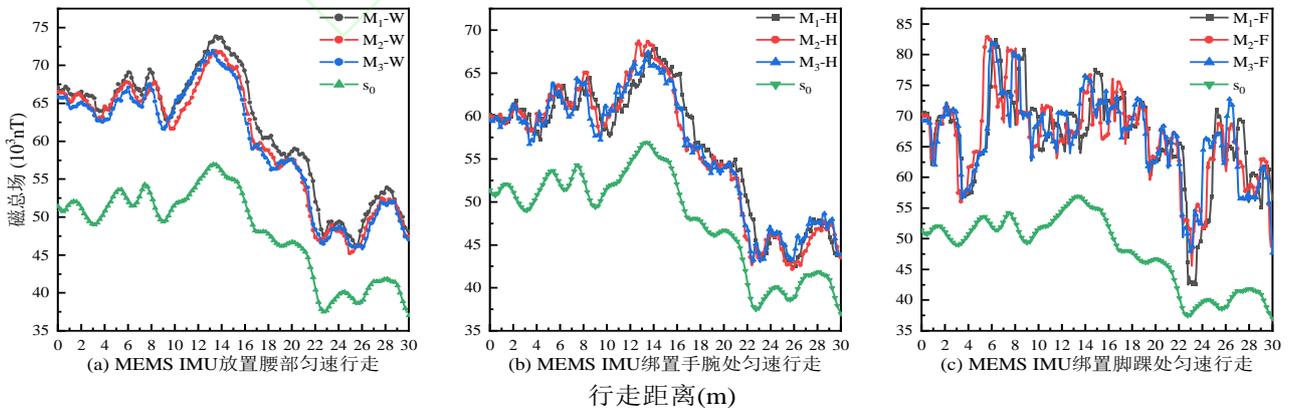


图 5 试验区 FVM 静态磁序列和 MEMS IMU 动态

Fig. 5 FVM Static Magnetic Value and MEMS IMU Dynamics Magnetic Value in the Test Area

振动产生的磁扰动 $S_2$ 。从图中可以看出，原地踏步产生了 1500nT 的磁扰动，并且随着时间增长，产生误差累积的偏置误差，从前段 65000nT~66000nT 持续波动，后半段上仰到 66000nT~67000nT 区间内变化。

图 5 是利用 MEMS IMU 装置在试验区内同一条路径上，行人动态行走过程中采集磁序列。图中 $S_0$ 是行人通行路径静态磁场插值后曲线，图 (a) 是 MEMS IMU 放置腰部匀速行走的 3 条磁序列 $M_i - W$ ，图 (b) 是将 MEMS IMU 绑置手腕处匀速行走的磁序列 $M_i - H$ ，图 (c) 是 MEMS IMU 绑置脚踝处匀速行走的磁序列 $M_i - F$ 。从图 5 (a)

(b) (c) 与静态磁场 $S_0$ 总体形态上对比，可以看出 MEMS IMU 放置腰部和绑置手腕处测量动态磁序列的总体变化趋势与静态磁场 $S_0$ 相一致，但存在上万纳特偏置磁噪声；另外 MEMS IMU 置于腰部、脚踝和手腕处不同部分，测量磁序列噪声扰动形态是不相同的，明显看出置于腰部、手腕处扰动值相对较小，3 次重复测量值总体形态相似，仅在局部上存在一定差异变化。绑置脚踝处测量磁序列与静态磁场 $S_0$ 趋势差异明显，可见绑置脚踝处测量磁数据噪声包含多种来源，扰动噪声更为复杂，且局部噪声扰动数数值已经将静态空间磁差异淹没了。

## 2.3 评价指标

为了检测空间点磁场值、步态变化磁扰动和姿态变化磁扰动的信号分离有效性和精度。解混试验结果采用了2种指标：解混性能指数 $PI$ ，相关系数 $\rho$ ，具体数学公式如下：

(1) 解混性能指数 $PI$ 是表示混合信号分离性能指标，当解混完全时 $PI=0$ 。实际上当 $PI$ 接近 $10^{-2}$ 时说明该算法分离性能好。

$$PI = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \left\{ \left( \sum_{k=1}^n \frac{|g_{ik}|}{\max_j |g_{ij}|} - 1 \right) + \left( \sum_{k=1}^n \frac{|g_{ki}|}{\max_j |g_{ji}|} - 1 \right) \right\} \quad (11)$$

式中， $g_{ij}$ 为解混后全局矩阵 $C = WA$ 的元素； $\max_j |g_{ij}|$ 表示 $C$ 的第 $i$ 行中绝对值最大值； $\max_j |g_{ji}|$ 表示第 $j$ 列元素绝对值最大值。

(2) 相关系数 $\rho$ 表示为解混信号基向量与参考信号之间相似程度，数值在 $0 \sim 1$ 之间。当 $\rho$ 越接近于1，表示解混信号与参考信号相似度高；反之，相似度越小。

$$\rho = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{A_i - \mu_A}{\sigma_A} \right) \left( \frac{B_i - \mu_B}{\sigma_B} \right) \quad (12)$$

式中， $A$ 、 $B$ 分别为解混前后信号向量， $\mu_A$ 和 $\sigma_A$ 分别是 $A$ 的均值和标准差， $\mu_B$ 和 $\sigma_B$ 是 $B$ 的均值和标准差。

## 3 结果与分析

### 3.1 MEMS IMU 磁扰动解混仿真试验

为了检测 FastICA、MNMF 分离人工混合磁扰动信号源的性能，开展 MEMS IMU 磁扰动解混仿真试验。试验选取图4中源信号 $S_1$ 常速行走磁扰动、 $S_2$ 轻微振动的磁扰动和 $S_0$ 通行路径的静态磁序列。每道信号源数据均为400点，归一化处理后见图6，

从图中可以看出归一化后 $S_2$ 振动噪声周期性明显。

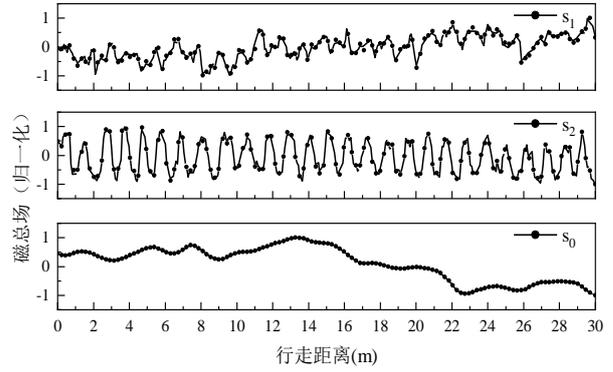


图6 行走磁扰动、振动的磁扰动及静态磁序列归一化后曲线

Fig. 6 Walking Magnetic Disturbance, Vibration Magnetic Disturbance and Static Magnetic Value Normalized Curve

参考2.2数据采集中MEMS IMU采集腰部、手腕处磁序列扰动变化特征，构建一定约束条件下随机生成混合矩阵 $A_0$ 时，按 $A_0 = \begin{bmatrix} 0.4036 & 0.4555 & 0.7844 \\ 0.8990 & 0.5132 & 0.0691 \\ 0.1701 & 0.7274 & 0.6163 \end{bmatrix}$ 混合源信号。图7是混合后磁序列曲线，也是盲源解混的原始信号 $MX_i (i = 1, 2, 3)$ 。

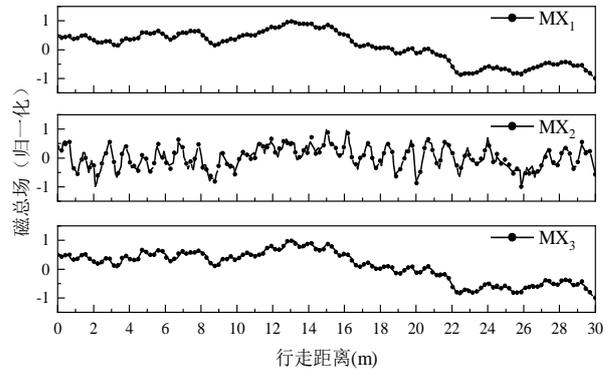


图7 按照随机生成矩阵 $A_0$ 生成的混合后磁序列曲线

Fig. 7 Mixed Magnetic Value Curve Generated According to the Random Generation Matrix  $A_0$

因为盲源解混目标函数存在的非凸性缺点，导致求得的结果不唯一。为了检测出混合磁数值解混的算法适用性，对仿真数据同时应用了 FastICA 算法、MNMF 算法分离试验独立执行1000次，以保证实验分析结果的可靠性。图8是盲源解

混结果与源信号对比图， $S_i - o(i = 1,2,3)$ 是源信号， $S_i - r(i = 1,2,3)$ 是解混后的信号，图 8 (a) 是FastICA解混结果，图 8 (b) MNMF解混结果。从图中可以看出，FastICA 对周期性振动噪声 $S_2$ 解混效果较好，MNMF 算法分离出静态磁场序列形态很好，与源信号 $S_0$ 通行路径的静态磁序列一致性高。

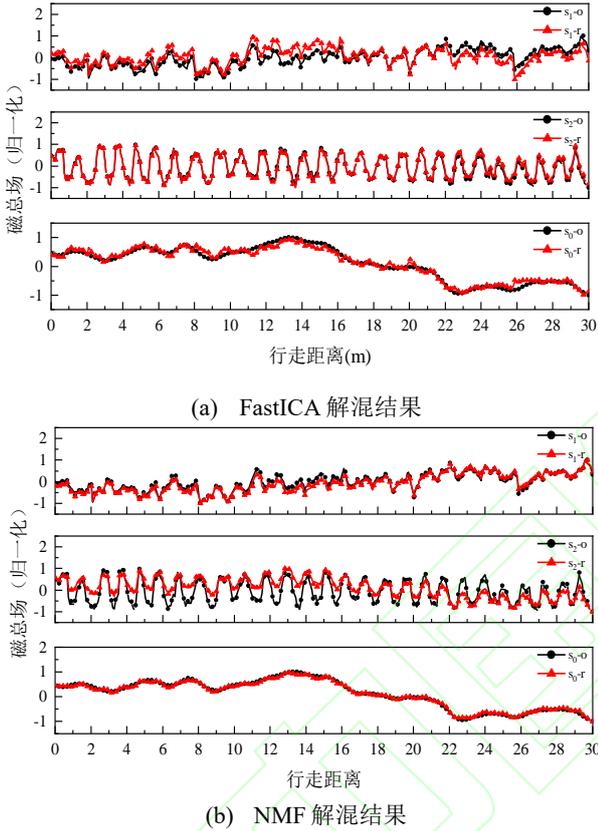


图 8 混合磁序列解混后信号与源原号对比

Fig. 8 Signal After Unmixing of the Mixed Magnetic Value is Compared with the Original Source Number

表 1 是 FastICA 算法、MNMF 算法分离试验评价结果。通常情况下，盲源分离精度 PI 小于或接近  $10^{-2}$  时说明该算法分离性能好。从表中可以看出 FastICA 算法、MNMF 算法分离精度 PI 均小于 0.1，分离性能较好。从源信号与解混信号的相关系数来看，FastICA 解混轻微振动的磁扰动 $S_2$ 达到了 0.9900，说明 FastICA 能够有效分离出周期性噪声扰动；MNMF 解混结果静态磁场值 $S_0$ 相关系数达到 0.9968，精准度很高。说明 MNMF 解混结果能

够保持静态磁数据空间结构特征，利于动态磁序列之间匹配定位。但是对噪声微振动的磁扰动 $S_2$ 分离特征较低，但分离结果也保持了周期性。

表 1 MEMS IMU 磁扰动解混仿真分离的性能

Tab.1 Performance Index of Magnetic Disturbance

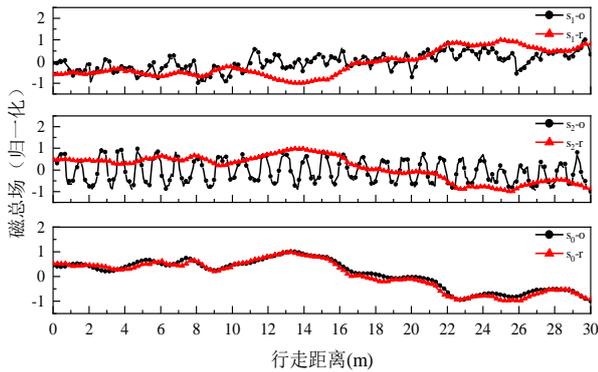
Unmixing Separation			
方法	分离精度 PI	分离组分	相关系数
FastICA	0.055	$S_1$ 行走	0.740 8
		$S_2$ 振动	0.989 4
		$S_0$ 静态	0.983 9
MNMF	0.0955	$S_1$ 行走	0.970 1
		$S_2$ 振动	0.752 4
		$S_0$ 静态	0.996 8

### 3.2 MEMS IMU 实测磁测量值解混

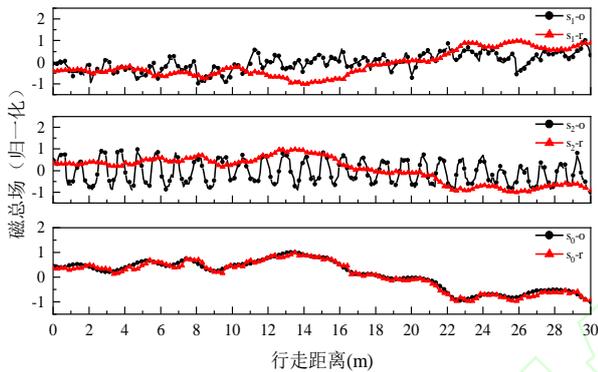
为了测试 MNMF 算法为动态磁序列降噪效果，对图 5 中实测动态磁序进行 MNMF 算法进行盲源分离。图 9 是盲源解混结果与源信号的对比图， $S_i - o(i = 1,2,3)$ 是源信号， $S_i - r(i = 1,2,3)$ 是解混后的信号，图 9 (a) 是放置腰部 3 组动态磁序列解混结果，图 9 (b) 绑置手腕 3 组动态磁序列解混结果，图 9 (c) 绑置脚踝处 3 组动态磁序列解混结果。仿真试验中较好的分离出相应的常速行走磁扰动、轻微振动的磁扰动和通行路径的静态磁序列 3 个对应基源向量，但从图 9 中可以看出实测试验中并没有按照仿真试验预期得到较好的结果，而是从信号中分离出 3 个相近的静态磁序列。

解混结果未达到噪声完全分离，一是实测动态磁序列空间磁差异较大，在近两万纳特内进行波动，行走和振动磁扰动值约 2000nT 以内，当其叠加到空间磁序列时，并未淹没真正静态磁序列空间差异性，只是造成局部细节磁数值扰动偏离。二是实测动态磁序列噪声来源较为复杂，不仅仅是理论分析踏步、振动等加性噪声，还可能存在一定比例乘性噪声及惯性偏移累积误差。MNMF 算法对其它类型噪声分离效果较差，但是却能分离出静态磁数据，且保持了相对较好的磁空间序

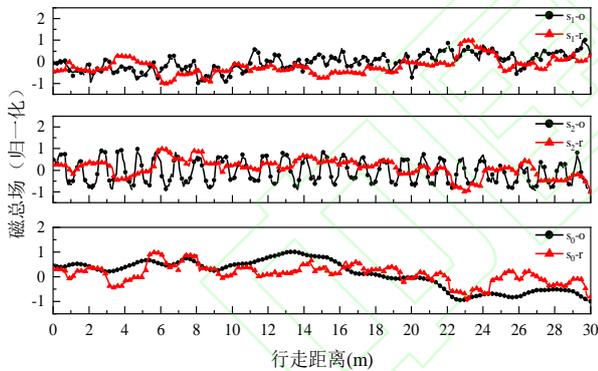
列特征。



(a) MEMS IMU 放置腰部动态磁序列解混结果



(b) MEMS IMU 绑置手腕处动态磁序列解混结果



(c) MEMS IMU 绑置脚踝处动态磁序列解混结果

图9 实测动态磁序列NMNF解混结果

Fig. 9 Measured Dynamic Magnetic Value NMNF Unmixing Results

从图9分离结果可以看出，虽然NMNF算法未能将一部分周期性噪声和随机噪声完全分离，但是却能够有效分离出动态磁序列的行走路径静态磁序列，且分离结果相似度很高，消除大部分干扰性噪声，利于动态磁序列之间匹配定位。表2是行人动态行走过程中，MEMS IMU放置腰部、手腕处和脚踝处采集动态磁序列的NMNF算法分

离试验评价结果。从表中从源信号与解混信号的相关系数来看，MEMS IMU放置腰部、手腕处动态磁序列解混结果较好，解混出静态磁场值与已知静态 $S_0$ 相关系数达到0.98以上，精准度很高。MEMS IMU放置脚踝处解混结果仅为0.6350，说明放置脚踝处采集磁序列易受到不确定多种因素的噪声干扰，如有可能存在来自地面表层管道磁扰动，说明脚踝处不适合作为动态磁测量位置。

表2 MEMS IMU 实测动态磁序列解混分离的性能

Tab. 2 Performance of Dynamic Magnetic Value Unmixing Separation Measured by MEMS IMU

MEMS IMU 位置	分离组分	相关系数
放置腰部	$S_1$ 行走	0.5416
	$S_2$ 振动	0.1812
	$S_0$ 静态	0.9873
绑置手腕处	$S_1$ 行走	0.4957
	$S_2$ 振动	0.1788
	$S_0$ 静态	0.9897
绑置脚踝处	$S_1$ 行走	0.3938
	$S_2$ 振动	0.1148
	$S_0$ 静态	0.6350

### 3.3 MEMS IMU 动态实测磁序列解混降噪

地磁匹配或磁匹配定位需要获取实时测量行走磁序列，计算与已有磁基准数据库的指纹相似度，相似度最高序列的即为实际定位点所在磁序列。通常磁基准库是通过静态测量或者高精度磁测量来获取数据，但是磁匹配所需的行人通行路径的磁序列是在动态状态下实时测量的，会存在多种不确定噪声扰动，易导致磁匹配定位的低精度或失败。如果可以通过盲源解混算法去除低成本MEMS IMU磁测量大部分的噪声扰动，获取较为纯净的磁序列，就有可能直接提升动态磁匹配的定位精度。

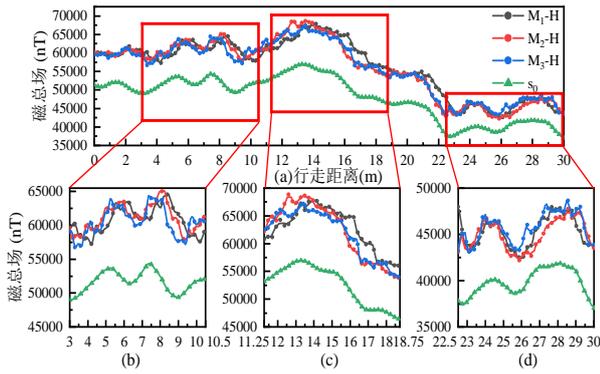


图 10 MEMS IMU 绑置手腕处实测磁序列  
Fig. 10 Measured Magnetic Value at the MEMS IMU Strapped Wrist

文中 3.2 节中试验结果表明, MEMS IMU 绑置手腕处测量磁序列噪声相对较大, 但解混后仍能获得相对精准的磁序列。为了测试盲源解混算法对动态实测磁序列降噪效果的适应性, 以 MEMS IMU 绑置手腕处观测值 (见图 10) 作为试验数据, 截取了(a)窗口中的 3 个子序列: (b) (41-140)、(c) (151-250)、(d) (301-400) 进行 MNMF 算法解混降噪试验。每个序列约 100 个采样点, 按照动态采样频率和平均步长换算, 相当于实地行进距离约

在 7.5 米左右, 符合动态磁匹配定位的一般匹配长度。从图 10 中看出 3 个子序列噪声扰动是不一样的, (b)窗口内 3 次重复测量的磁序列差异性主要是随机噪声扰动, 而(c) (d)窗口内 3 次重复测量的磁序列存在明显整体偏移误差和随机干扰。

图 11 是 3 个子序列的 MNMF 算法的解混结果。从图中可以看出: 不同子序列的分离精度是不一样的, (b) (151-250) 解混结果能够分离大部分不相关噪声干扰, 与静态磁序列相似度高, 保持了主要磁空间差异特征, 与源静态信号相关系数达到了 0.9918; 解混后(a) (41-140)、(c) (301-400) 解混结果与已知静态源磁序列相近, 存在一定程度偏移误差, 进一步说明了动态行走过程中传感器惯性存在累积误差影响。解混后(a) (41-140) 与源静态信号相关系数为 0.8018, 但是解混后(c) (301-400) 序列为相关系数为 0.8197, 均达到了 80%以上, 说明 MNMF 解混分离对动态磁序列有较好降噪效果。

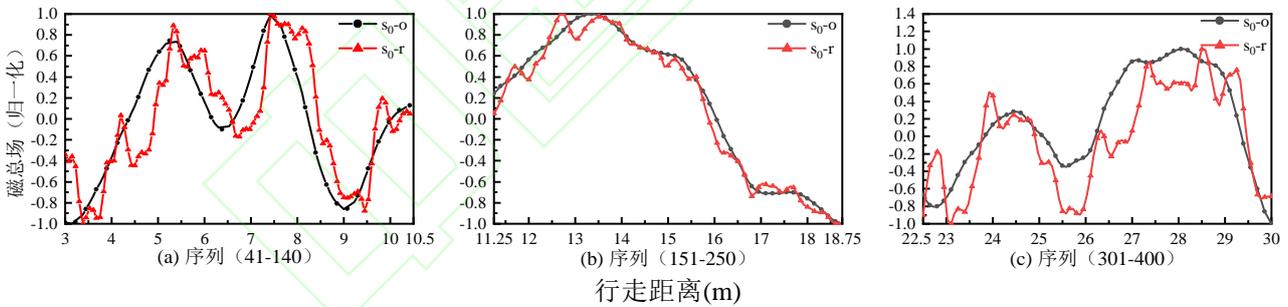


图 11 动态实测磁序列 MNMF 解混结果  
Fig. 11 Dynamic Measured Magnetic Value MNMF Unmixing Results

在磁匹配定位过程中, 匹配步长大小是直接影响定位精准度的主要因素。从匹配模型解算的角度, 待匹配序列长度越长, 其匹配结果往往会更精准, 甚至可以抵消大多数未知干扰误差对匹配结果的影响。但是从动态实时定位的需求, 期望行人通行较短的距离, 就可以解求出较佳的定位结果。文中期望 MNMF 模型对短距离匹配存在

一定适应性, 为了测试 MNMF 算法是否易受动态实测磁序列长度影响, 选取了(b) (151-250) 序列数据, 按照匹配步长递减的方式进行了降噪效果的分析试验, 检测匹配长度对解混效果的影响趋势。表 3 和图 12 中序列长度从 100 样本点降低到 50 样本点, 对应匹配序列长度从 7 米左右减少至 3.75 米左右。但是经过盲源解混得出磁序列与源信

号形态上差异并不明显，两者相关系数始终在 99% 左右。说明盲源解混降噪方式有一定鲁棒性，对噪声分离效果较为稳定。

为了进一步检验盲源分离对动态实测磁数据降噪的有效性，将 MEMS IMU 绑置手腕处，测量了 3 个试验区行走的磁数值，每个区域长度不少于 30 米，磁序列样本数均为 400 个样本左右。

对 3 个试验区磁数据开展盲源分离，并计算了降噪前后数据的 MSD 匹配定位概率。从表 4 可以

看出，匹配概率明显受到通行路径特点、匹配步长的影响，当匹配步长达到 3 米以上时，试验区地磁匹配定位概率快速上升。另外，经过盲源分离降噪后的磁序列，其匹配定位概率会明显提高。特别是绑置手腕处的磁序列经过盲源降噪后，3 米匹配步长的定位概率均达到了 95% 左右。说明盲源解混算法对动态行走状态磁序列降噪效果明显，直接有助于匹配定位精度提高。

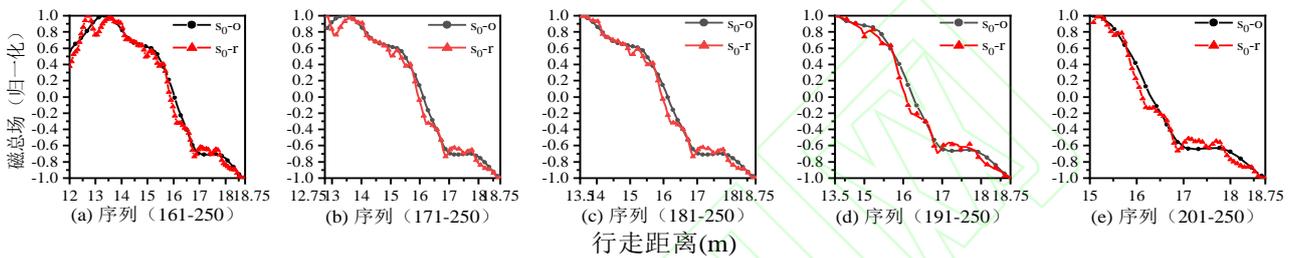


图 12 不同长度动态实测磁序列 MNMF 解混结果

Fig. 12 MNMF Unmixing Results of Dynamic Measured Magnetic Value with Different Lengths

表 3 不同长度动态实测磁序列 MNMF 解混分析

Tab. 3 MNMF Unmixing Analysis of Dynamic Measured Magnetic Value with Different Lengths

匹配步长	序列 (161-250) 6.75/m	序列 (171-250) 6/m	序列 (181-250) 5.25/m	序列 (191-250) 4.5/m	序列 (201-250) 3.75/m
相关系数	0.9929	0.9944	0.9949	0.9933	0.9907

表 4 盲源分离降噪前后 MSD 匹配结果指标

Tab. 4 MSD Matching Result Before and After Blind Source Separation Noise Reduction

匹配步长	MEMS IMU 位置	匹配数据	匹配概率/%		
			试验区 1	试验区 2	试验区 3
20 样本点 /1.5m	放置腰部	实测数据	68.50	47.24	58.53
		盲源分离后	71.39	53.54	82.68
	绑置手腕处	实测数据	66.40	58.27	69.29
		盲源分离后	80.05	77.43	85.83
40 样本点 /3m	放置腰部	实测数据	83.10	57.62	72.02
		盲源分离后	90.03	64.54	97.51
	绑置手腕处	实测数据	85.87	66.76	81.44
		盲源分离后	94.46	95.84	97.23

## 4 结语

文中针对低成本 MEMS IMU 动态行走条件下，磁量测数值噪声大，噪声来源复杂的问题，构建

了 MNMF 盲源解混算法，并开展系统的解混降噪试验研究，得出以下结论：

(1) 携带 MEMS IMU 装置测量磁数值是空间点磁场值与扰动磁场值的叠加。扰动磁场值易

受行人走路、设备振动、环境变化等多因素影响。文中构建的动态测量磁场值误差扰动模型利用了乘性误差和加性误差因子定量表达了实时测量磁信号存在的误差组成。分析了 MEMS IMU 在腰部、手腕及脚踝 3 处磁测量噪声扰动规律。

(2) 在 NMF 盲源解混模型加入重加权稀疏约束条件, 构建的动态磁序列 MNMF 解混算法具有较好磁信号解混效果。在仿真磁信号分离试验中, FastICA 和 MNMF 算法分离指数均小于 0.1, FastICA 对周期性噪声扰动分离效果较好, MNMF 能够精准解混出静态磁场值, 相关系数达到 0.999。在对实测动态磁序列解混试验中, MNMF 算法能分离出静态磁数据, 且保持了相对较好的磁空间序列特征, 但对其它类型噪声分离效果较差。

(3) MNMF 盲源分离对实测动态磁序列存在明显降噪效果。磁序列经过解混分离后, 可以分离出大部分的噪声扰动, 获取较为纯净的磁序列, 直接有助于匹配定位精度提高。试验中当匹配步长达到 3 米以上, 绑置手腕处测量的磁序列经过 MNMF 盲源降噪后, 匹配定位概率提升至 95%左右, 充分验证了 MNMF 盲源分离降噪的适宜性。

## 参考文献

- [1] Liu Jingnan, Gao Kefu. Challenges and Opportunity for Mapping and Surveying and Location Based Service in The Age of Intelligence [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(11): 1506-1518. (刘经南, 高柯夫. 智能时代测绘与位置服务领域的挑战与机遇[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(11): 1506-1518.)
- [2] Chen Ruizhi, Chen Liang. Indoor Positioning with Smartphone: The State-of-the-art and the Challenges [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1316-1326. (陈锐志, 陈亮. 基于智能手机的室内定位技术的发展现状和挑战[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1316-1326.)
- [3] Deng Zhongliang, Wang Hanhua, Liu Jingrong. Status and Trend of Communication-Navigation Integrated Positioning Technology [J]. *Navigation Positioning & Timing*, 2022, 9(02): 15-25. (邓中亮, 王翰华, 刘京融. 通信导航融合定位技术发展综述[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(02): 15-25.)
- [4] Li Simin, Cai Chenglin, Wang Linna, et al. A Fusion Method for PDR and Magnetic Fingerprinting Based Indoor Localization on Smartphone [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2018, 31(1): 36-42. (李思民, 蔡成林, 王亚娜, 等. 基于地磁指纹和 PDR 融合的手机室内定位系统[J]. 传感技术学报, 2018, 31(1): 36-42.)
- [5] Zhao Yu, Lan Ying, Qu Xian. Design of Personnel Positioning System in Coal Mine Underground based on MEMS Sensor [J]. *Industry and Mine Automation*, 2018, 44(8): 87-9. (赵悦, 兰英, 屈贤. 基于 MEMS 传感器的煤矿井下人员定位系统设计[J]. 工矿自动化, 2018, 44(8): 87-9.)
- [6] Song Z G, Zhang J S, Zhu W Q, et al. The Vector Matching Method in Geomagnetic Aiding Navigation [J]. *Sensors*, 2016, 16(7): 1120.
- [7] Li Xiaoyang, Wang Weikui, Wang Shouli, et al. Status and Development Trend of MEMS Inertial Sensors [J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2019, 40(06): 1-13+21. (李晓阳, 王伟魁, 汪守利, 等. MEMS 惯性传感器研究现状与发展趋势[J]. 遥测遥控, 2019, 40(06): 1-13+21.)
- [8] Liu Shibin, Chen Lulan, Zhang Wei, et al. A Calibration Method of MEMS Gyroscope Based on Magnetic Sensor [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2013, (12): 1700-170. (刘诗斌, 陈露兰, 张韦, 等. 一种基于磁传感器的 MEMS 陀螺标定方法[J]. 传感技术学报, 2013, (12): 1700-170.)
- [9] Niu Xiaoji, Ding Longyang, Kuang Jian, et al. A MEMS IMU and Motion Constraint-based Positioning Algorithm for Shared Bicycles [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2021, 29(03). (牛小骥, 丁龙阳, 旷俭, 等. 基于 MEMS IMU 和运动约束的共享单车定位算法[J]. 中国惯性技术学报, 2021, 29(03).)
- [10] Du Junwei, Chen Qijin, Niu Xiaoji, et al. Analysis on Measurement Accuracy of MEMS Inertial Height Gauge [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2019(11): 2605-2610. (杜俊伟, 陈起金, 牛小骥, 等. MEMS 惯性高度尺

- 测量精度分析[J]. 系统工程与电子技术, 2019(11): 2605-2610. )
- [11] Ma Mengyao. Design of 2-D FIR digital filter base on ADMM Algorithm [D]. Hangzhou, China: Hangzhou Dianzi University, 2020. (马梦瑶. 基于 ADMM 算法的二维 FIR 数字滤波器设计[D]. 杭州电子科技大学, 2020.)
- [12] Chen Junliang, Kang Lin, Li Guangwei, et al. Design of FIR Digital Filter Based on Matlab and Its Application in Receiver [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2020, 39(12): 33-35, 49. (陈俊良, 康林, 李广伟, 等. 基于 Matlab 的 FIR 数字滤波器设计及在接收机中的应用[J], 兵工自动化. 2020, 39(12): 33-35, 49.)
- [13] Wang Jinhua, Zhang Hengjia, Hou Jinliang, et al. The Disturbance Law of Instantaneous Strong Noise in Underground Geomatic Positioning [J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Sciences)*, 2021, 46(3):3 9-46. (汪金花, 张恒嘉, 侯金亮, 等. 井下地磁定位的瞬间强噪声扰动规律研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2021, 46(3):3 9-46.)
- [14] Huang Ying. A Fast Denoising Algorithm for Multimedia Reading Speech Based on Remez Algorithm [J]. *Automation & Instrumentation*, 2021(9): 62-65. (黄英. 基于 Remez 算法的多媒体阅读语音快速降噪算法[J]. 自动化与仪器仪表, 2021(9): 62-65.)
- [15] Kang Ruiqing, Zhang Chaohui, Sun Bing. Empirical Mode Decomposition Method for Geomagnetic Matching Navigation [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2015, 44(6): 858-862. (康瑞清, 张朝晖, 孙冰. 经验模态分解在地磁匹配导航中的研究 [J]. 电子科技大学学报, 2015, 44(6): 858-862.)
- [16] Wang Jinhua, Zhang Bo, Guo Liwen, et al. Performance Analysis of Convolution Enhancement of CEA Operator for Underground Geomagnetic Matching [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(09): 1422-1431. (汪金花, 张博, 郭立稳等. 井下巷道地磁匹配特征的 CEA 卷积增强的分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(09): 1422-1431.)
- [17] Yu Xianchuan, Hu Dan. Blind source separation theory and application [M]. Beijing: science press, 2011. (余先川, 胡丹. 盲源分离理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.)
- [18] Ji Changdong, Lv Guanghan, Zhang Hengjing, et al. A Noise Recognition Algorithm of CORS Station Elevation Series [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2021, 46(3): 8-16. (吉长东, 吕广涵, 张恒璟, 等. 一种 CORS 站高程序列噪声识别算法[J]. 测绘科学, 2021, 46(3): 8-16.)
- [19] Xi Qi. Research of Adaptive Beamforming Algorithm based on Blind Source Separation [D]. Beijing, China: Beijing Jiaotong University, 2021. (奚琦. 基于盲源分离的自适应波束形成算法研究[D]. 北京交通大学, 2021.)
- [20] Li Qian. Identification of Ship Radiated Noise Based on BP Neural Network [J]. *Ship Science and Technology*, 2019, 41(24): 22-24. (李倩. BP 神经网络的舰船辐射噪声识别 [J]. 舰船科学技术, 2019, 41(24): 22-24.)
- [21] Akai N, Ozaki K. Gaussian processes for magnetic map-based localization in large scale indoor environment [C]// Proceeding of 2015 IEEE/RSJ International conference on intelligent Robots and systems(IROS), 2015, Hamburg, Germany.
- [22] Cai Jin, Cai Chenglin, Zhang Shougang, et al. A Smooth Transition Method for Indoor and Outdoor Seamless Positioning of GNSS/Magnetic Combination [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2018(2): 30-34. (蔡劲, 蔡成林, 张首刚, 等. GNSS/地磁组合的室内外无缝定位平滑过渡方法[J]. 测绘通报, 2018(2): 30-34.)

## 网络首发:

标题: MEMS IMU 实测磁信号 MNMF 盲源分离降噪及匹配定位分析

作者: 孟庆港, 汪金花, 王赛楠, 李鸣铎, 侯金亮

收稿日期: 2024-03-12

DOI:10.13203/j.whugis20230186

## 引用格式:

孟庆港, 汪金花, 王赛楠, 等. MEMS IMU 实测磁信号 MNMF 盲源分离降噪及匹配定位分析[J]. 武汉

大学学报(信息科学版),2024,DOI: 10.13203/j.whugis20230186 (MENG Qinggang, WANG Jinhua, WANG Sainan, et al. Denoising and Matching Localization of MNMF Blind Source Separation Algorithm for Measured Magnetic Signals by MEMS IMU[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2024,DOI: 10.13203/j.whugis20230186)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

---

您感兴趣的其他相关论文:

**一种城市环境下 GNSS/MEMS IMU 车载实时精密定位方法**

祝浩祈, 王甫红, 张万威, 栾梦杰, 程雨欣

武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(7): 1232-1240.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220491>

**城市环境下智能手机车载 GNSS/MEMS IMU 紧组合定位算法**

王甫红, 栾梦杰, 程雨欣, 祝浩祈, 赵广越, 张万威

武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(7): 1106-1116.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20230010>

**轻小型低成本无人机激光扫描系统研制与实践**

杨必胜, 李健平

武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 1972-1978.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20180265>