引文格式：孙文俊. 基于GPS/BDS联合定位技术的移动目标动态跟踪方法[J]. 地理空间信息, 2024, 22(11): 62-65. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.11.012

基于GPS/BDS联合定位技术的移动目标动态跟踪方法

孙文俊[1]
（1. 山东省煤田地质局第四勘探队，山东 潍坊 261200）

摘　要：为降低定位误差，提出基于GPS/BDS联合定位技术的移动目标动态跟踪方法。在统一GPS、BDS导航系统时空基准的基础上，构建单系统伪距、载波相位量测模型，并利用误差校正模型修正其量测误差；再通过设置合适的权重来改进模糊度计算法方程，以加快模糊度收敛；最后将载波相位观测量作为核心测距信息，伪距观测量作为辅助数据，建立基于卡尔曼滤波算法的定位模型，对移动目标运动位置进行实时估计，并对状态空间进行限制。结果表明，该方法可跟踪移动目标的运动轨迹；跟踪时的可见卫星数量较多，能避免干扰造成的移动目标跟踪丢失问题；且东、北、天顶方向的定位误差显著低于单导航系统，跟踪精度最高为98.46%。

关键词：GPS/BDS联合定位；动态跟踪；误差校正；整周模糊度；卡尔曼滤波；状态空间
中图分类号：P228.4　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）11-0062-04

Dynamic Tracking Method for Moving Target Based on GPS/BDS Joint Positioning Technology

SUN Wenjun[1]
(1. The Fourth Exploration Team of Shandong Coalfield Geological Bureau, Weifang 261200, China)

Abstract: In order to reduce positioning errors, we proposed a dynamic tracking method for moving target based on GPS/BDS joint positioning technology. On the basis of unifying the spatio-temporal benchmarks of GPS and BDS navigation systems, we constructed single system pseudo range and carrier phase measurement models, and used error correction model to correct the measurement error. And then, we improved the ambiguity calculation equation by determining appropriate weights to accelerate ambiguity convergence. Finally, we took the carrier phase observation as the core ranging information, the pseudo range observation as auxiliary data, and established a positioning model based on Kalman filtering algorithm, which could realize the real-time estimation of moving target's position and limit the state space. Experimental results show that the proposed method can track the moving target's trajectory. There are a large number of visible satellites during tracking, which can avoid the problem of tracking loss caused by interference. The positioning errors in the east, north and zenith directions are significantly lower than those of the single navigation system, and the highest tracking accuracy is 98.46%.

Key words: GPS/BDS joint positioning, dynamic tracking, error correction, whole cycle ambiguity, Kalman filtering, state space

全球定位系统（GPS）[1]在车载导航定位等领域获得了高度关注[2-3]。北斗卫星导航系统（BDS）是中国自行研制的全球卫星导航系统[4-5]，自2020年实现全球组网以来，众多研究者将其与GPS相结合，以突破单导航系统对移动目标跟踪精度的限制，避免发生可见卫星数量过少而导致的定位盲区现象[6-8]。王阿昊[9]、曹多明[10]等联合运用GPS/BDS定位技术构建的移动目标单点定位模型，在移动目标动态定位精度上稍显不足，定位时间损耗高，定位误差也较大；高扬[11]、杨兴华[12]等为实现复杂环境下移动机器人的动态跟踪，首先利用基于误差校正的运动模型缩小机器人的动态定位误差，再通过无损卡尔曼滤波实现移动机器人位置的估计，但该方法存在定位盲区，在卫星信号干扰较大区域，会发生移动机器人定位中断问题。鉴于此，本文提出了基于GPS/BDS联合定位技术的移动目标动态跟踪方法，以完成移动目标的动态跟踪，提高跟踪精度。

1　移动目标高精度定位与追踪

为提高移动目标动态定位与跟踪精度，本文对GPS/BDS系统的伪距、载波相位量测数据进行联合定位解算。基于GPS/BDS联合定位技术的移动目标动态跟踪过程为：①构建单颗卫星导航系统伪距、载波相位量测模型；②通过误差校正模型消除卫星信号的多

收稿日期：2023-09-13。
作者简介：孙文俊（1992—），本科，工程师，研究方向为测绘地理信息，E-mail：tomtangtx@126.com。

通道误差，并将伪距、载波相位观测量作为依据，修正法方程，实现模糊度的快速收敛；③确定联合GPS/BDS导航系统的观测方程，通过解算观测参数，实现移动目标的实时定位，并根据获得的定位结果，完成动态跟踪。

1.1　GPS/BDS系统基本量测模型

实现移动目标的高精度定位不仅需要保证GPS与BDS时空基准的统一，而且需要确保移动目标接收机与卫星之间测距数据的准确性。利用全球卫星导航系统（GNSS）对移动目标进行定位时，连续获得的测距数据中均包含伪距、载波相位两部分内容。各种GNSS的定位差异不仅表现在物理结构上，所用观测模型和定位准确性也不尽相同。伪距将测距码作为计量标准量，CA码各码片约为300 m，因此对移动目标进行伪距单点定位时，定位准确度约为10 m。伪距是指自卫星信号发射开始至被接收机接收过程中，传播的有效距离，具有时间相关性。假设卫星在 t_s 时间点开始发射信号，接收机在 t_r 时间点接收到该信号，则伪距的计算公式为：

$$\rho = \mathrm{c}\left(t_{\mathrm{r}} - t_{\mathrm{s}}\right) \tag{1}$$

式中，c为真空环境下光的传播速度。

将卫星本身时间与参考时间的误差定义为卫星钟差（Δt_{s}），接收机本身时间与参考时间的误差定义为接收机钟差（Δt_{r}），卫星信号的真实传播时间为 τ，在考虑误差的情况下，可将式（1）写成：

$$\rho = \mathrm{c}\left(\tau + \Delta t_{\mathrm{r}} - \Delta t_{\mathrm{s}}\right) \tag{2}$$

卫星信号在大气层的传播过程中，电离层、对流层会使信号传播时间发生变化，则伪距观测模型的表达式为：

$$\rho = r + \mathrm{c}\left(\Delta t_{\mathrm{r}} - \Delta t_{\mathrm{s}}\right) + I_{\mathrm{iono}} + \varepsilon_{\rho} \tag{3}$$

式中，r 为卫星与接收机之间的几何距离；I_{iono} 为电离层影响而产生的延迟距离；ε_{ρ} 为伪距确定过程中产生的噪声。

假设接收机、卫星之间的信号收发具有同时性，在不考虑钟差的情况下，载波相位观测方程为：

$$\varphi = \varphi_{\mathrm{r}} - \varphi_{\mathrm{s}} \tag{4}$$

式中，φ_{r} 为因接收机振荡的相位；φ_{s} 为接收到的卫星信号相位。

1.2　误差校正

卫星信号在生成、发送、传播和收取阶段都可能产生误差，进而影响移动目标定位的准确度，因此本文构建了误差校正模型，以提高移动目标动态定位精度。移动目标动态定位精度最主要的影响因素为电离层延迟误差。校正电离层延迟误差既能使获得的测距数据更准确，也能加快整周模糊度的计算速率。误差修正公式为：

$$I'_{\mathrm{iono}} = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}\left[\lambda_1\left(\varphi_1 - N_1\right) - \lambda_2\left(\varphi_2 - N_2\right)\right] \tag{5}$$

式中，f_1、f_2 为两组不同频率的卫星信号频率；λ_1、λ_2 为两组卫星信号波长；φ_1、φ_2 为两组卫星信号载波相位。

1.3　基于载波相位与伪距观测量的整周模糊度计算

伪距双差误差方差的计算公式为：

$$\underset{m\times 1}{\boldsymbol{V}_{\nabla\Delta\rho}} = \underset{m\times u}{\boldsymbol{H}_1}\underset{u\times 1}{\boldsymbol{X}_1} - \underset{m\times 1}{\boldsymbol{L}_{\nabla\Delta\rho}}\underset{m\times m}{\boldsymbol{P}_{\nabla\Delta\rho}} \tag{6}$$

式中，$\boldsymbol{X}_1$ 为具有时间变化性的参数向量，数量为 u；$\boldsymbol{H}_1$ 为与 $\boldsymbol{X}_1$ 对应的系数矩阵；$\boldsymbol{L}_{\nabla\Delta\rho}$ 为伪距观测值与实际结果的差值向量；$\boldsymbol{P}_{\nabla\Delta\rho}$ 为伪距观测权值矩阵；m 为观测值总数。

在载波相位观测量法方程左右相应位置加入伪距分量，即可实现载波相位与伪距观测量的联合解算，即

$$\begin{bmatrix} U_{11} + U'_{11} & U_{12} \\ U_{21} & U_{22} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 + W'_1 \\ W_2 \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中，X_2 为参数变量，具有无时间变化性特点。

假设 k 为伪距观测量权重与载波相位观测量权重的比值，可得到 $U'_{11} = kU_{11}$。加入伪距观测量后，载波相位观测量的模糊度法方程可表示为：

$$\begin{cases} M'_2 X_2 = R'_2 \\ M'_2 = M_2 + \dfrac{k\left(U_{21}U_{11}^{-1}U_{12}\right)}{1+k} \\ R'_2 = R_2 + \dfrac{k\left(U_{21}U_{11}^{-1}W_1 - U_{21}U'^{-1}_{11}W'_1\right)}{1+k} \end{cases} \tag{8}$$

根据获得的历元数为 n 的伪距观测量与载波相位观测量，即可确定模糊度法方程：

$$\sum_{i=1}^{n}\left(M_2\right)_i X_2 + \sum_{i=1}^{n}\left(M_\rho\right)_i X_2 = \sum_{i=1}^{n}\left(R_2\right)_i + \sum_{i=1}^{n}\left(R_\rho\right)_i \tag{9}$$

1.4　基于GPS/BDS联合的移动目标定位模型

本文将载波相位观测量作为核心测距信息，利用卡尔曼滤波算法对移动目标的位置信息进行不断估计，将伪距观测量作为辅助数据，以限制状态空间，避免整周模糊度实时预估引起的状态空间维度过大的问题。在卡尔曼滤波算法中，离散化系统状态方程为：

$$\boldsymbol{X}_k = \boldsymbol{F}_{k,k-1}X_{k-1} + w_{k-1} \tag{10}$$

量测方程为：

$$\boldsymbol{Z}_k = H_k X_k + \theta_k \tag{11}$$

式中，$\boldsymbol{X}_k$、$\boldsymbol{Z}_k$ 为 k 时间点的状态、观测向量；H_k、θ_k 为观测函数、噪声；$\boldsymbol{F}_{k,k-1}$ 为状态转移矩阵；w_{k-1}

为前一时间点的系统噪声。

非差载波相位定位模型的状态空间表达式为：

$$\boldsymbol{X}_k=\left(x,y,z,t_{\mathrm{g}},f_{\mathrm{g}},t_{\mathrm{b}},f_{\mathrm{b}},\boldsymbol{N}\right)^{\mathrm{T}} \tag{12}$$

式中，$\boldsymbol{N}=\left(N_1,\cdots,N_i,\cdots,N_n\right)$ 为模糊度向量，对于第 i 颗卫星，其整周模糊度为 N_i；(x,y,z) 为接收机的定位估计结果；t_{g}、t_{b} 和 f_{g}、f_{b} 分别为GPS、BDS卫星的钟差和钟漂；n 为用于移动目标定位的卫星数量。

GPS、BDS卫星的测距信息由测距、载波相位构成，则非差载波相位定位模型的观测向量计算公式为：

$$\boldsymbol{Z}_k=\begin{bmatrix}\rho_{\mathrm{g}}^i-r_{\mathrm{g}}^i-t_{\mathrm{g}}\\ \rho_{\mathrm{b}}^j-r_{\mathrm{b}}^j-t_{\mathrm{b}}\\ \varphi_{\mathrm{g}}^i+N_{\mathrm{g}}^i-r_{\mathrm{g}}^i-t_{\mathrm{g}}\\ \varphi_{\mathrm{b}}^j+N_{\mathrm{b}}^j-r_{\mathrm{b}}^j-t_{\mathrm{b}}\end{bmatrix} \tag{13}$$

式中，ρ_{g}^i、φ_{g}^i、r_{g}^i、N_{g}^i 分别为第 i 颗GPS卫星测距信息修正后的伪距、载波相位、至接收机的几何距离和整周模糊度，$i=1,\cdots,n_{\mathrm{g}}$，$n_{\mathrm{g}}$ 为用于移动目标定位的GPS卫星数量；ρ_{b}^j、φ_{b}^j、r_{b}^j、N_{b}^j 分别为第 j 颗BDS卫星测距信息修正后的伪距、载波相位、至接收机的几何距离和整周模糊度，$j=1,\cdots,n_{\mathrm{b}}$，$n_{\mathrm{b}}$ 为用于移动目标定位的BDS卫星数量。

状态转移矩阵的表达式为：

$$\boldsymbol{F}_{k,k-1}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{I}_{3\times3} & 0 & 0 & 0\\ 0 & \boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{g}}^{\mathrm{c}} & 0 & 0\\ 0 & 0 & \boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{c}} & 0\\ 0 & 0 & 0 & \boldsymbol{I}_{n\times n}\end{bmatrix} \tag{14}$$

式中，$\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵；$\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{g}}^{\mathrm{c}}$、$\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{c}}$ 为GPS和BDS卫星的钟差矩阵。

假设GPS、BDS卫星钟差与钟漂的生成具有任意性特点，误差呈高斯分布特性，则离散状态模型的表达式为：

$$\boldsymbol{X}_k^{\mathrm{c}}=\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}^{\mathrm{c}}\boldsymbol{X}_{k-1}^{\mathrm{c}}+w_{k-1}^{\mathrm{c}} \tag{15}$$

$$\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}^{\mathrm{c}}=\begin{bmatrix}1 & \Delta t\\ 0 & 1\end{bmatrix} \tag{16}$$

式中，$\boldsymbol{X}_k^{\mathrm{c}}=\left(\Delta t_r,\Delta f_r\right)^{\mathrm{T}}$ 为 k 时间点接收机误差的状态空间，Δt_r 为钟差，Δf 为钟漂；$\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}^{\mathrm{c}}$ 为状态转移矩阵；w_{k-1}^{c} 为 $k-1$ 时间点的状态噪声；Δt 为时间变化量。

噪声协方差矩阵的计算公式为：

$$\boldsymbol{Q}_{k,k-1}^{\mathrm{c}}=\begin{bmatrix}\delta_t\Delta t+3^{-1}\delta_f(\Delta t)^3 & 2^{-1}\delta_f(\Delta t)^2\\ 2^{-1}\delta_f(\Delta t)^2 & \delta_f(\Delta t)\end{bmatrix} \tag{17}$$

式中，δ_t、δ_f 为钟差、钟漂。

观测转移矩阵的计算公式为：

$$\boldsymbol{H}_k=\begin{bmatrix}h_x^i & h_y^i & h_z^i & \boldsymbol{h}_{\mathrm{g}}^c & 0_{1\times n}\\ h_x^j & h_y^j & h_z^j & \boldsymbol{h}_{\mathrm{b}}^c & 0_{1\times n}\\ h_x^i & h_y^i & h_z^i & \boldsymbol{h}_{\mathrm{g}}^c & \boldsymbol{E}_{1\times n}^i\\ h_x^j & h_y^j & h_z^j & \boldsymbol{h}_{\mathrm{b}}^c & \boldsymbol{E}_{1\times n}^j\end{bmatrix} \tag{18}$$

式中，$\boldsymbol{h}_{\mathrm{g}}^c=(1,0,0,0)$；$\boldsymbol{h}_{\mathrm{b}}^c=(0,0,1,0)$；$\left(h_x^i,h_y^i,h_z^i\right)$、$\left(h_x^j,h_y^j,h_z^j\right)$ 和 $\boldsymbol{E}_{1\times n}^i$、$\boldsymbol{E}_{1\times n}^j$ 分别为第 i 颗GPS卫星和第 j 颗BDS卫星的方向余弦和位置向量，两个向量中代表卫星位置信息的元素为1，剩余皆为0。

$\boldsymbol{Q}_{k,k-1}=\boldsymbol{E}\left(\boldsymbol{w}_{k-1}\boldsymbol{w}_{k-1}^{\mathrm{T}}\right)$ 可反映移动目标定位模型的精度水平，可描述为：

$$\boldsymbol{Q}_{k,k-1}=\begin{bmatrix}3^{-1}\delta_P(\Delta t)^3\boldsymbol{I}_{3\times3} & 0 & 0 & 0\\ 0 & \boldsymbol{Q}_{\mathrm{g}}^{\mathrm{c}} & 0 & 0\\ 0 & 0 & \boldsymbol{Q}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{c}} & 0\\ 0 & 0 & 0 & \delta_F\boldsymbol{E}_{n\times n}\end{bmatrix} \tag{19}$$

式中，δ_P、δ_F 为位置和模糊度参数；$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{g}}^{\mathrm{c}}$、$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{c}}$ 为GPS、BDS卫星的钟差噪声协方差矩阵。

量测噪声协方差矩阵可评判与衡量卫星观测量的精确性，计算公式为：

$$\boldsymbol{R}_k=\begin{bmatrix}9\boldsymbol{E}_{n\times n} & 0\\ 0 & 0.04\boldsymbol{E}_{n\times n}\end{bmatrix} \tag{20}$$

基于GPS、BDS卫星的实时测距信息，通过卡尔曼滤波算法确定连续时间下的接收机定位估计结果后，即可绘制移动目标运动轨迹，从而实现移动目标的动态跟踪。

2 性能测试与分析

本文选取某辆运动中的汽车作为研究对象。该辆汽车上安装的NovAtel OEM6卫星信号接收设备可获取GPS/BDS联合定位测距信息。以2022年8月的汽车动态运行信息作为实验测试数据，测试时长为20 min，数据采样周期为0.5 s。采用本文方法对该汽车进行动态跟踪，并分析了定位与跟踪的效果。利用本文方法对行驶中的汽车进行定位跟踪，能确定不同运行时刻汽车的移动位置，再依据各位置坐标绘制运动轨迹，实现行驶汽车的动态跟踪。该辆汽车的运行起始位置为A，终止位置为D，由A到D的曲线即是其运动轨迹。实验结果表明，本文方法具有移动目标定位跟踪能力。

移动目标动态跟踪效果与可见卫星数量具有较大关系，因此将可见卫星数量作为移动目标跟踪结果的评判指标。采用本文方法跟踪行驶中的汽车，并与单一GPS、BDS定位结果进行对比。对不同定位模型下的可见卫星数量变化曲线进行分析，结果见图1，可以看

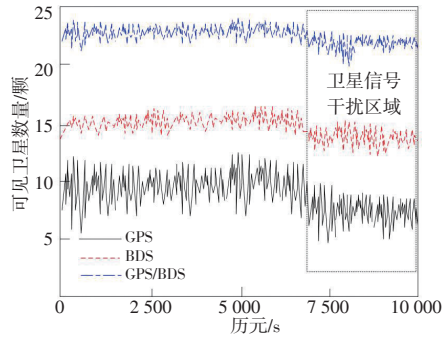
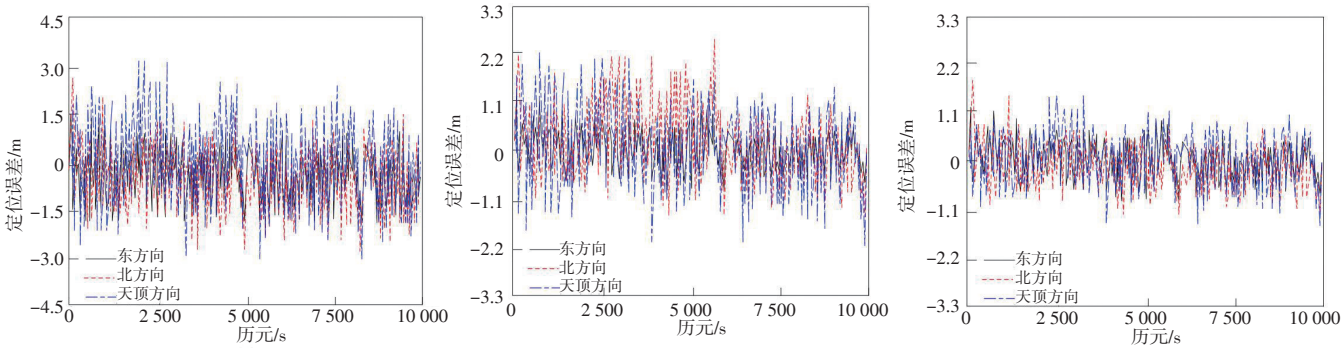


图1　历元观测数据与可见卫星数量关系分析

出，单独利用GPS模型对行驶汽车进行跟踪时，卫星信号良好的前6 000个历元的可见卫星数量最多为12颗，在卫星信号受到干扰的区域，可见卫星数量在5~10颗范围内波动；BDS的可见卫星数量高于GPS，最多可达17颗，干扰区域内的可见卫星数量最少为13颗；本文方法的可见卫星数量最多可达23颗，卫星信号较弱的干扰区域的可见卫星数量最少为20颗。

利用本文方法对行驶的汽车进行定位，并与单GPS、BDS定位结果进行对比。对不同定位模型在东、北、天顶方向的坐标误差进行分析，结果见图2，可以看出，本文方法在3个方向上的坐标误差均在−1.1~1.1 m范围内，小于单GPS、BDS定位模型。将均方根误差（RMSE）作为定位精度的评价指标，各定位模型在3个方向的RMSE变化见表1，可以看出，GPS定位模型在北方向与天顶方向具有较好的定位优势，效果优于BDS定位模型；BDS定位模型在东方向的定位效果突出，原因在于BDS东西方向的可见卫星呈均匀性分布，数量稳定，而卫星空间整体布局略逊于GPS；本文方法在不同方向上的RMSE值均为最低，说明GPS/BDS联合定位的效果更突出。



a BDS定位模型　b GPS定位模型　c 本文定位模型

图2　不同定位模型定位误差对比分析

表1　不同定位模型的定位RMSE分析/m

定位模型	东方向	北方向	天顶方向
GPS	0.375	0.463	1.125
BDS	0.311	0.84	1.446
GPS/BDS	0.274	0.412	0.896

为进一步验证本文方法的有效性，将本文方法与参考文献[9]~[12]的方法进行对比，测试指标为跟踪精度，结果见表2，可以看出，本文方法的跟踪精度最高为98.46%，参考文献[9]~[12]方法的跟踪精度最高分别为87.65%、87.46%、87.72%和88.36%。本文方法通过联合GPS、BDS的观测方程实现移动目标的实时定位，再根据获得的定位结果完成动态跟踪。

表2　不同方法的跟踪精度对比/%

迭代次数	本文方法	参考文献[9]方法	参考文献[10]方法	参考文献[11]方法	参考文献[12]方法
10	98.46	86.62	84.28	87.72	85.93
20	97.36	84.35	85.36	85.55	84.36
30	95.42	87.42	83.94	84.42	84.69
40	94.15	84.37	84.75	85.36	84.65
50	97.47	87.65	83.64	83.15	83.54
60	98.15	84.26	87.46	82.26	88.36

3　结　语

本文提出了一种基于GPS/BDS联合定位技术的移动目标动态跟踪方法，通过该方法对行驶汽车进行动态跟踪；并通过对比分析本文方法与单导航系统下的可见卫星数量，东、北、天顶方向定位误差以及RMSE，验证了本文方法的定位效果。结果表明，采用本文方法跟踪行驶汽车时，可见卫星数量最多可达23颗，卫星信号较弱的干扰区域也有20颗BDS卫星可提供测距信息；在3个方向上的定位误差均在−1.1~1.1 m范围内；本文方法提供的可见卫星数量高于单导航系统，且在3个方向上的定位误差均小于单导航系统，跟踪精度最高为98.46%。

参考文献

[1]　杨阳,孙建军. 卫星星历参考框架对GNSS相对定位解算的影响分析[J]. 地理空间信息,2021,19(1):35-37

（下转第82页）