

An Improved Marine Positioning Algorithm with Combined BDS/GPS/Galileo

Weiye SHUAI¹, Xurong DONG¹, Yang YANG², Jun WANG¹, Mingqi YANG¹

1. Space Engineering University, Beijing, China

2. Beijing Satellite Navigation Center, Beijing, China

1. 18803348431@163.com

Abstract: In order to improve the navigation and positioning accuracy of BDS on the sea, an improved marine positioning algorithm with combined BDS/GPS/Galileo is proposed. The algorithm reduces the complexity of the counting process and improve the positioning accuracy on the basis of ensuring optimal effect of satellite selection, which introduces satellite broadcast data quality and user equivalent distance error in satellite selection algorithm. The dynamic improved multipath model on the sea is established to realize the optimization of dynamic positioning accuracy with combined BDS/GPS/Galileo in marine environment. The results of data processing show that, the effect of the satellite selection is close to optimality. During the observation period, the average weighted PDOP values of the combined system are both below 2 and the average value is 1.24, and then the positioning accuracy is greatly improved. The improved multipath model obviously weakens the multipath effect and further improves the positioning accuracy. The RMS of positioning error obtained by the improved algorithm is 4.48m in the horizontal direction and 6.78m in the elevation direction, which is 53% and 60% lower than that of the traditional BDS positioning.

Keywords: Marine positioning; Multipath effect; Combined positioning; Satellite selection; Weighted PDOP; Accuracy

一种改进的海上BDS/GPS/Galileo组合定位算法研究

帅玮玮¹, 董绪荣¹, 杨洋², 王军¹, 杨茗棋¹

1. 航天工程大学, 北京, 中国, 101416

2. 北京卫星导航中心, 北京, 中国, 100094

1. 18803348431@163.com

【摘要】为提高北斗卫星导航系统海上导航定位精度,给出了一种改进的海上BDS/GPS/Galileo组合定位算法。将卫星播发数据质量和用户等效距离误差引入到选星算法中,在保证效果接近最优的基础上,降低了算法复杂程度,提高了定位精度;建立海面动态多路径改进模型,实现了海洋环境下的BDS/GPS/Galileo组合定位精度优化。海上实测数据处理结果表明,选星算法效果接近最优,观测时段内组合系统平均加权PDOP值均在2以下,PDOP均值为1.24,定位精度大幅提高;多路径改进模型明显削弱了多路径效应,进一步提高了定位精度;改进算法的定位误差RMS水平方向为4.48m、高程方向为6.78m,相比于传统BDS单系统定位,分别减小了53%、60%。

【关键词】海上定位;多路径效应;组合定位;选星;加权PDOP;精度

1 引言

北斗卫星导航系统(BDS)以其全天候定位授时、短报文通信等优势,在海上导航定位领域中地位日渐重要。但当前除了亚太区域外,很多海域仍存在可见星数量不足,卫星几何构型较差的问题,同时海面环境复杂多变,卫星信号多路径效应影响严重,导致系统定位精度无法满足部分海上应用需求。

随着各国卫星导航系统的持续发展,导航卫星可用数量也在不断增加,多星座兼容互操作已经成为世

界卫星导航发展的重要趋势之一^[1]。北斗作为第一个实现与其他三大全球系统兼容与互操作的系统^[2],多星座组合定位已成为其提高系统服务性能的重要途径之一。本文给出了一种改进的海上BDS/GPS/Galileo组合定位算法。算法将卫星播发数据质量和用户等效距离误差(User Equivalent Range Error, UERE)引入到组合定位卫星选取与加权矩阵的计算中,在保证选星效果接近最优的基础上,降低了算法的复杂程度;同时建立海面动态多路径改进模型,实现了海洋环境下的BDS/GPS/Galileo组合定位精度优化。

2 选星算法

文献[3][4]对现有选星算法进行了详细介绍与总结,从中可以看出,多数算法的研究重点都在于卫星几何构型和计算量的权衡上。在实际定位中,当某颗卫星观测值存在较大误差时,即便实现了最优的卫星几何构型,其定位结果也可能很差;同时传统组合定位采用的定权方法大多是基于经验值估计的系统级定权,并没有考虑同一系统内卫星测量误差对定位结果的影响,因此依然会存在某颗误差较大的卫星被赋予较大权值从而导致定位误差增大的情况。综上,这里给出一种基于卫星播发数据质量和UERE的选星算法。算法主要包含两部分,一是参与定位卫星的选取,二是参与定位卫星加权矩阵的计算。

2.1 卫星选取

卫星选取方法是以卫星播发数据质量为基础,通过对健康卫星进行数据质量检查,剔除数据质量不合格的卫星。数据质量检查主要包含三部分:

1) 卫星健康状况检查

首先根据广播星历中的卫星健康标识,剔除不健康卫星。

2) 信号信噪比检查

令任一导航系统的任一卫星信噪比为 S/N_0^i ,当前可见卫星总数为 n ,则

$$\begin{cases} \mu_{S/N_0} = \sum_{i=1}^n S/N_0^i / n \\ \sigma_{S/N_0} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S/N_0^i - \mu_{S/N_0})^2} \end{cases} \quad (1)$$

取阈值为 $T_{threshold,j} = \mu_j + k\sigma_j$ [5], k 根据具体用户类型来确定,本文取 $k=6$,排除信噪比低于阈值的卫星。

3) 广播星历质量检查

伪距单点定位中,广播星历的状态、质量对定位结果有着直接影响[6]。本文采用广播星历的完整性、正确性和一致性来评估广播星历质量。各项指标的定义及评估方法如下:

(1) 完整性:导航卫星在规定的時間间隔上是否能够播发相应的广播星历。本文取時間间隔为 $2T$, T 为星历更新周期,剔除完整性不足90%的卫星。

(2) 正确性:判断广播星历中每个字段长度、位置等与ICD规定的是否相符,剔除当前时刻广播星历不正确的卫星。

(3) 一致性:广播星历一致性反映了广播星历相邻历元轨道与钟差的跳变情况,反映了卫星星历本身的稳定性。计算方法如下:

● 判断是否存在数据播发错误

设卫星播发的最新星历时刻为 t ,星历更新周期为 T ,为了同时验证更新周期内以及更新前后星历一致性,采用 $[t-T, t]$ 区间内播发的星历参数计算 t 时刻卫星轨道 R_{eph} 和钟差 Δt 。假定在 $[t-T, t]$ 区间内,星历更新时刻为 t_f ,则在星历健康情况下,计算出的卫星轨道和钟差应如图1所示:

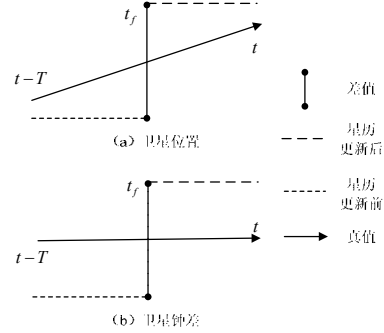


Figure 1. Satellite orbit and clock difference

图1 卫星轨道和钟差示意图

在整个 $[t-T, t]$ 区间内,只会出现一次卫星星历更新,即只有一组相邻星历参数计算出的卫星轨道和钟差会存在差异,如果多组数据存在差异,则视为该卫星播发了不健康星历。

● 星历更新前后卫星轨道和钟差差值比较

对于任一导航系统的任一卫星,卫星星历更新前后卫星轨道和钟差差值分别为 ΔR_i 和 Δclk_i ,当前可见卫星总数为 n ,则

$$\begin{cases} \mu_R = \sum_{i=1}^n \Delta R_i / n, \mu_{clk} = \sum_{i=1}^n \Delta clk_i / n \\ \sigma_R = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta R_i - \mu_R)^2}, \sigma_{clk} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta clk_i - \mu_{clk})^2} \end{cases} \quad (2)$$

取阈值为 $T_{threshold,j} = \mu_j + 6\sigma_j$,其中 j 取 R 或 clk ,排除星历更新前后轨道误差或钟差超限的卫星。

整个过程可用流程图表示:

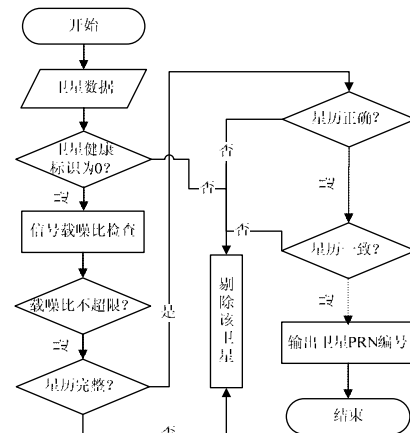


Figure 2. Process of selecting satellites

图2 卫星选择流程图

2.2 基于UERE的卫星加权矩阵

假设每颗卫星测量值中卫星到接收机的各部分误差相互独立,则在实时定位中,任一时刻任一卫星的用户等效距离误差的方差可表示为^[4]

$$\sigma_{URE}^2 = \sigma_{URE}^2 + \sigma_{Iono}^2 + \sigma_{Trop}^2 + \sigma_{Mp}^2 + \sigma_{noise}^2 \quad (3)$$

接收机在进行定位解算时,首先会对伪距测量值进行误差修正,从而消除大部分大气延迟误差、钟差、相对论误差等。下面给出式(3)中各项残余误差的简化计算模型^[4]:

(1) 用户测距误差

广播星历中播发的用户测距精度(User Range Accuracy, URA)为该卫星用户测距精度的短时间预测,为URE1 σ 统计意义上的估计,因此,可以用来表征 σ_{URE}^2 ,其计算公式为:

$$\sigma_{URE}^2 = \begin{cases} 2^{(2+n/2)}, n \leq 6 \\ 2^n, 6 < n < 15 \end{cases} \quad (4)$$

其中, n 为广播星历中给出的URA指数。

(2) 电离层延迟

电离层延迟关于仰角的估计模型可表示为:

$$\sigma_{Iono}^2 = \left[1 - \left(\frac{R_e \cos \phi}{R_e + h} \right) \right]^{-1} \cdot \sigma_I \quad (5)$$

其中, R_e 为地球半径, ϕ 为卫星仰角, h 为电离层电子密度最大是的高度,

$$\sigma_I = \begin{cases} 9m & 0^\circ \leq |B| \leq 20^\circ \\ 4.5m & 20^\circ \leq |B| \leq 55^\circ \\ 6m & |B| > 55^\circ \end{cases}, B \text{ 为用户所处的纬度。}$$

(3) 对流层延迟

对流层误差与频率无关,因此只能采用数学模型进行估计,下面给出一种对流层关于仰角的估计模型:

$$\sigma_{Trop}^2 = \frac{0.12012}{\sqrt{0.002001 + \sin^2(\phi)}} \quad (6)$$

$$a_i^j = \frac{\left(\frac{1}{\sigma_1}\right)^2 a_{1,i}^{1,j} + \cdots + \left(\frac{1}{\sigma_1}\right)^2 a_{1,i}^{m_1,j} + \left(\frac{1}{\sigma_2}\right)^2 a_{2,i}^{1,j} + \cdots + \left(\frac{1}{\sigma_2}\right)^2 a_{2,i}^{m_2,j} + \left(\frac{1}{\sigma_3}\right)^2 a_{3,i}^{1,j} + \cdots + \left(\frac{1}{\sigma_3}\right)^2 a_{3,i}^{m_3,j}}{\left(\frac{1}{\sigma_1}\right)^2 + \cdots + \left(\frac{1}{\sigma_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sigma_2}\right)^2 + \cdots + \left(\frac{1}{\sigma_2}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sigma_3}\right)^2 + \cdots + \left(\frac{1}{\sigma_3}\right)^2} \quad (12)$$

$a_i^{j,k}$ ($i=1,2,3; j=1,2,\dots; k=x,y,z$) 为第 i 个导航系统的第 j 颗卫星的方向余弦矢量在 x,y,z 方向上的分量,可见卫星总数 $m = m_1 + m_2 + m_3$ 。该方法可以将PDOP值得计算量从 $6m^2 + 36m + 237$ 降低为 $3m^2 + 12m + 36$ 。

2.3 选星算法性能分析

本文采用2017年6月12日24小时的

(4) 多路径

$$\sigma_{Mp}^2 = 0.5 + 1.64e^{-\left(\frac{\phi}{14.5^\circ}\right)} \quad (7)$$

(5) 噪声

这里的噪声主要考虑的是接收机跟踪环路所产生的热噪声和干扰,其计算公式为:

$$\sigma_{noise}^2 = cT_c \cdot \frac{B_n d}{2C/N_0} \left[1 + \frac{2}{(2-d)C/N_0 T} \right] \quad (8)$$

其中, c 为光速, T_c 为码片周期, B_n 为码环噪声带宽, d 为码相关器间隔, C/N_0 为载噪比, T 为积分时间。则任一时刻参与定位的所有卫星的加权矩阵可表示为:

$$W^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_{1,URE}^2} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_{2,URE}^2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_{i,URE}^2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, $\sigma_{i,URE}^2$ 为第 i 颗卫星用户等效测距误差的方差值。

在多星座组合导航时,通常采用加权精度因子(Weighted Dilution of Precision, WDOP)来衡量卫星几何构型的好坏。加权精度因子同时兼顾了卫星的几何构型和伪距观测误差对定位精度的影响,在实际工程中更为实用。WDOP可表示为:

$$WPDOP^2 = \text{Diag}_1(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} + \text{Diag}_2(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} + \text{Diag}_3(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \quad (10)$$

其中, $\mathbf{H} = \mathbf{W}^{-1/2} \mathbf{G}$, \mathbf{W} 为加权矩阵;将 \mathbf{H} 进行一系列转换以后,可以得到一种简单的PDOP计算方法:

$$WPDOP^2 = \text{trace}(\mathbf{H}_p^T \mathbf{H}_p)^{-1} \quad (11)$$

其中, $\mathbf{H}_p = \mathbf{W}^{-1/2} [\mathbf{a}^x - a_1^x \mathbf{I}_{m \times 1} \quad \mathbf{a}^y - a_2^y \mathbf{I}_{m \times 1} \quad \mathbf{a}^z - a_3^z \mathbf{I}_{m \times 1}]$, $\mathbf{a}^x, \mathbf{a}^y, \mathbf{a}^z$ 为观测矩阵 \mathbf{G} 的前三列,

BDS/GPS/Galileo三系统兼容接收机海上动态实测数据对选星算法进行验证分析,数据采样率为1Hz;选取最优选星算法定位结果作为对比,其中,最优选星算法通过遍历当前时刻所有卫星的可能组合来得到实现最小的PDOP的卫星组合,加权最小二乘定位时采取验后方差估计的系统级定权方法;定位基准数据为Novatel dlv3接收机提供的GPS事后PPP结果,两台接收机使用同一天线接收信号。

(1) 选星结果

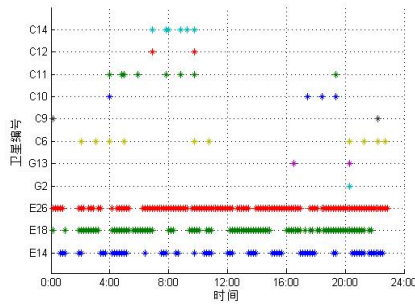


Figure 3. Excluded satellites
图3 剔除卫星示意图

图3列出了观测时段内每个历元上剔除的卫星，可以看出伽利略系统中第14、18、26号卫星频繁出现故障，其中第26号卫星官方公布在6月8日至27日内信号是不可用的，而14、18号为系统试验卫星，信号性能还不够稳定；北斗卫星的故障主要集中在第6号和第11号上，主要是两者均为GEO卫星，相比于其他卫星来说，信噪比较低。

(2) 卫星几何构型分析

由图4可以看出，组合系统的PDOP值要明显高于BDS单系统；本文选星算法的加权平均PDOP值整个观测时段内均在2以下，平均PDOP值为1.24，与最优PDOP非常接近，可以说明本文给出的选星算法在选星效果上接近最优。

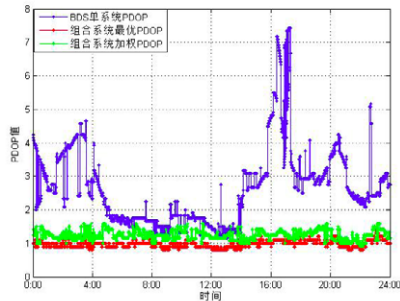


Figure 4. Comparison of PDOP
图4 PDOP值对比图

(3) 定位误差分析

为验证本文给出的选星算法定位性能，将其与最优选星算法定位结果进行对比，对比结果如图5所示。

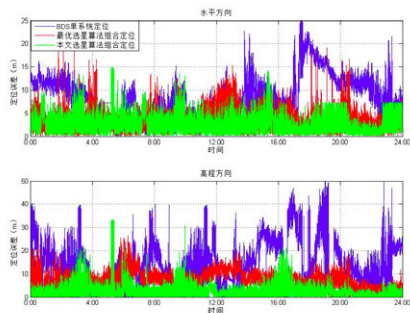


Figure 5 Comparison of positioning error
图5 定位误差对比图

定位结果表明，多星座组合定位结果明显优于BDS单系统定位结果；本文选星算法组合定位结果优于最优选星算法组合定位，水平方向定位误差降低了1.76m，高程方向降低了1.97m，验证本文给出的选星算法定位性能的优越性。三种方法水平、高程方向定位误差的RMS如表1所示。

Table 1. Positioning error RMS of three algorithms

方法	水平方向定位误差 RMS (m)	高程方向定位误差 RMS (m)
BDS单系统定位	9.57	17.12
最优选星算法组合定位	7.54	9.21
本文选星算法组合定位	5.78	7.24

表 1.三种算法定位误差RMS

3 海面动态多路径改进模型

海洋表面是一个动态变化的复杂环境，海浪变化与风场、重力、水下地形等息息相关，且变化规律十分复杂。GNSS海上定位领域中，由海面反射造成的多径效应，是定位的最主要的误差源之一，下面给出一种简化的海面动态多路径改进模型。

3.1 海面动态多路径模型算法

基于线性波理论，可以认为海浪模型是由许多不同频率、波长、相位和振幅的简单组成波形叠加而成的^[6]，每个简单波又可以描述为水面某一点的轨迹，如图6所示：

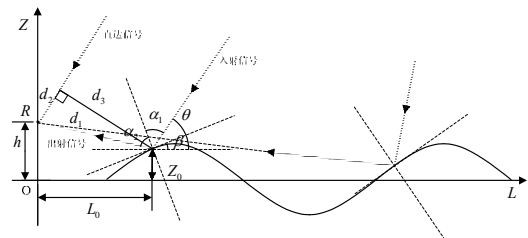


Figure 6. Sea surface dynamic multipath effect
图6 海面动态多路径效应示意图

图中 LOZ 平面为卫星入射信号矢量与接收机 R 所在平面，横轴表示海浪在水平面上与接收机的距离大小，纵轴表示为海浪相对于海平面的高度，假设海浪波形函数为 $Z = A \cos(\omega L + \varphi_0)$ ，在 $L = L_0$ 对卫星信号产生了多路径效应。卫星高度角为 θ ， L_0 处切线与水平方向夹角为 β ，入射角为 α_1 ，出射角为 α_2 ， $\alpha_1 = \alpha_2$ 。由图中各夹角关系可得：

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{\pi}{2} - (\theta - \beta) \\ \alpha_2 = \frac{\pi}{2} - (\arctan \frac{h - A \cos(\omega L_0 + \varphi_0)}{L_0} + \beta) \end{cases} \quad (13)$$

其中， $\beta = \arctan(-A\omega \sin(\omega L_0 + \varphi_0))$ ，可以推出：

$$\theta - 2 \arctan(-A\omega \sin(\omega L_0 + \varphi_0)) = \arctan \frac{h - A \cos(\omega L_0 + \varphi_0)}{L_0} \quad (14)$$

本文只考虑接收机100m范围内反射波产生的多路径效应。根据式(14)通过逐值法可以求出产生多路径效应的位置 L_0 ，即 L_0 取0~100m，取值间隔为0.05m，当式(14)左右两边差值小于 10^{-4} 时，认为在 L_0 处发生了多路径效应。进而求出多路径信号相对于直达信号的距离延迟：

$$d_{multi} = d_1 - d_2 = \sqrt{L_0^2 + [h - A \cos(\omega L_0 + \varphi_0)]^2} - \sqrt{L_0^2 + [h - A \cos(\omega L_0 + \varphi_0)]^2} - \frac{[L_0 \tan \theta - Z_0 + h]}{\tan^2 \theta + 1} \quad (15)$$

从而在直达信号与出射信号组成的复合信号中消除多路径影响，进而对观测值进行改正。同时，海浪波形数据为当地海洋部门掌握的保密数据，因此，本文采用模拟仿真的方法求取海浪波形参数：假设海上用户在水平面上的位移是由自身动力产生的，垂直方向上的位移是随海浪波动而产生的，因此，海浪波形函数中的振幅 A 、周期 ω 以及初始相位 φ_0 可以通过用户过去历元上的位置信息拟合得到，同时为了体现海浪动态变化，设定每30s φ_0 增加0.1m。

3.2 模型性能分析

多路径模型改正前后的定位结果如图7和表3所示：

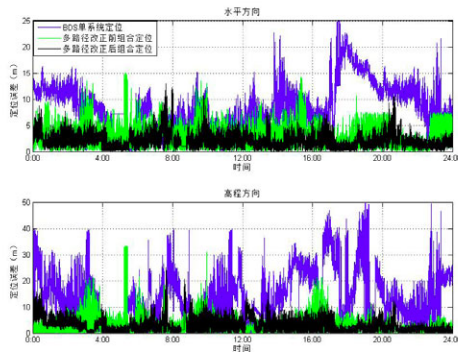


Figure 7. Comparison of positioning error
图7 定位误差对比图

Table 2. RMS of positioning error before and after multipath correction

方法	水平方向 (m)	高程方向 (m)
多路径改正前	5.78	7.24
多路径改正后	4.48	6.78

表 2.多路径改正前后定位误差RMS

通过多路径改正前后定位误差对比可知，上述多路径改进模型可以明显削弱多路径效应，实现了定位精度的优化；改进算法水平方向定位误差RMS为4.48m、高程方向定位误差RMS为6.78m，相比于传统BDS单系统定位，分别减小了53%、60%。

5 结论

针对BDS系统在部分海域定位精度无法满足实际需求的问题，本文给出了一种改进的海上

BDS/GPS/Galileo组合定位算法，并利用海上实测数据进行了算法验证分析。结果表明，本文给出的改进算法适用于海上动态定位环境。其中，选星算法效果接近最优，加权矩阵的选取及海面动态多路径模型的建立，都在一定程度上提高了定位精度。相比于传统BDS单系统定位方法，改进的海上BDS/GPS/Galileo组合定位算法在定位精度和效率上都有较大提升，具有一定的工程实用性。

致谢

在此要特别清华大学提供的兼容接收机及相关试验设备，同时要感谢中国卫星海上测控部飞行器海上测量与控制联合实验室的提供的数据技术支持。

References (参考文献)

- [1] YANG Yuanxi, LU Mingquan, HAN Chunhao, "Some Notes on Interoperability of GNSS[J].Acta Geodaetica Sinica, 2016, 45(3),P253-258.
杨元喜,陆明泉,韩春好,GNSS互操作若干问题[J].测绘学报,2016, 45(3),P253-258.
- [2] TAN Shusen, Innovative Development and Forecast of BeiDou System[J].Acta Geodaetica Sinica, 2017, 46(10),P1285-1289.
谭述森,北斗系统创新发展与前景预测[J].测绘学报, 2017, 46(10),P1285-1289.
- [3] Yahao Cheng, Johann Dambeck, Florian Holzapfel, Satellite Selection in Multi-GNSS Positioning[C].Proceedings of ION GNSS+ 2016:140-151.
- [4] ZHANG Hui,Key Algorithms of the Information Processing in the Multi-constellation Integrated Navigation[D].Changsha, Graduate School of National University of Defense Technology,2012.
张辉,多星座组合导航信息处理关键算法研究[D].长沙：国防科学技术大学研究生院,2012.
- [5] An-Lin Tao, Shau-Shiun Jan, Optimal Navigation with Multi-constellation GNSS:A Satellite Selection Algorithm[C]. Proceedings of ION GNSS+ 2016:128-139.
- [6] LI Bo. Research on Ocean Surface Modeling and Simulation in Complex Environment in Real-time[D].Wuhan: Huanzhong University of Science and Technology,2010.
李波.复杂环境下的海面实时建模与仿真研究[D].武汉:华中科技大学,2010.