

文章编号:1671-1637(2016)01-0149-10

# 大型舰船编队相对导航方法比较

周红进, 钟云海, 李 伟

(海军大连舰艇学院 航海系, 辽宁 大连 116018)

**摘 要:**基于导航卫星伪距双差建立了相对导航模型, 设计了基于伪距单差的最小二乘算法、基于伪距双差的最小二乘算法、基于伪距单差的EKF算法与基于伪距双差的EKF算法, 并通过试验进行对比分析。研究表明: 基于伪距双差的相对导航模型可以消除电离层、对流层、多路径误差、卫星钟差与接收机钟差; 与最小二乘算法相比, EKF算法能够显著提高相对导航信息的解算精度; EKF算法下伪距双差的解算精度比伪距单差提高约10%; 在几何精度因子最小的原则下, 卫星个数增多, 距离解算精度提高; 基线为2 m时, 基于伪距双差的EKF算法所得距离解算精度可达到0.10 m以内, 方位角解算精度可达到4.0°, 因此, EKF算法的精度和频率可满足大型舰船编队保持准动态的相对导航需求。

**关键词:**船舶工程; 大型舰船编队; 相对导航; 伪距单差; 伪距双差; EKF

**中图分类号:**U666.1

**文献标志码:**A

## Comparison of relative navigation methods for large vessel formation

ZHOU Hong-jin, ZHONG Yun-hai, LI Wei

(Department of Navigation, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, Liaoning, China)

**Abstract:** A relative navigation model based on the pseudo-range double-difference of navigation satellite was built. Pseudo-range single difference based least square algorithm, pseudo-range double-difference based least square algorithm, pseudo-range single difference based EKF algorithm and pseudo-range double-difference based EKF algorithm were designed and were compared by tests. Analysis result shows that pseudo-range double-difference based relative navigation model can eliminate ionosphere, troposphere, multi-path, satellite clock error and receive clock error. EKF algorithm can significantly improve the resolution accuracy of relative navigation information compared with least square algorithm. Under EKF algorithm, the resolution accuracy of pseudo-range double-difference is 10% better than pseudo-range single difference. Under the minimum GDOP value principle, when the number of satellites increases, the distance resolution accuracy becomes better. When baseline length is 2 m, the distance resolution accuracy of pseudo-range double-difference based EKF algorithm can reach within 0.10 m, azimuth resolution accuracy can reach 4.0°, so the test accuracy and frequency in this paper can satisfy the relative navigation demand of keeping quasi dynamic for large vessel formation. 3 tabs, 27 figs, 20 refs.

**Key words:** ship engineering; large vessel formation; relative navigation; pseudo-range single difference; pseudo-range double-difference; EKF

收稿日期:2015-10-10

基金项目:国家自然科学基金项目(41374018);海军大连舰艇学院2110工程三期资助学术预研课题(DLJY-XY2014007)

作者简介:周红进(1978-),男,湖北咸宁人,海军大连舰艇学院讲师,工学博士,从事惯性导航和卫星导航技术研究。

**Author resume:** ZHOU Hong-jin(1978-), male, lecturer, PhD, +86-411-80856223, zhou\_hongjin@126.com.

## 0 引 言

相对导航是指测量解算当前位置到目标点或者另一个参考位置的距离、速度、加速度、姿态与方位等相对导航信息,不需要当前位置、目标点在绝对坐标系的坐标信息。李伟等利用简化差分插值滤波方法研究了编队卫星相对导航<sup>[1]</sup>;武瑾媛等基于扩维卡尔曼滤波对火星探测器脉冲星的相对导航方法进行了研究<sup>[2]</sup>;刘雪奎等基于粒子滤波提出了一种通信保障航天器的相对导航方法<sup>[3]</sup>;李轶等建立了基于视线测量的观测方程,研究了航天器相对导航滤波方法<sup>[4]</sup>;王楷等提出了基于双视线测量的相对导航方法<sup>[5]</sup>,通过数值仿真验证了导航方法的有效性;Lee 等对用于相对导航的自适应滤波算法进行了设计<sup>[6]</sup>。

相对导航方法及应用研究主要集中在航天器交汇对接或拦截过程中<sup>[7-18]</sup>,大型舰船编队的相对导航方法研究比较少。大型舰船编队在队形保持、变换与舰载机着舰过程中,都迫切需要编队舰船间或舰机间的相对导航信息。当前主要使用导航雷达测量相对导航信息,但精度较低,视距有限,近距存在盲点,且易受天气环境影响。王秀森等提出了基于 GPS 伪距单差的相对导航模型<sup>[19]</sup>,首次应用于舰船相对导航领域,采用了最小二乘算法解算相对导航信息;宋伟等设计了 Kalman 滤波方法解算相对导航信息<sup>[20]</sup>。

由于伪距单差模型中仍然存在分布在不同舰船上的两个接收机的钟差和观测误差,虽然可以通过 Kalman 滤波进行估计,但仍然影响相对导航的精度。基于此,本文提出一种基于导航卫星伪距双差的相对导航模型,完全消除电离层、对流层、多路径误差、卫星钟差、接收机钟差和接收机观测噪声误差,设计了基于扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)的相对导航信息算法,并与基于伪距双差的最小二乘算法、基于伪距单差的最小二乘算法、基于伪距单差的 EKF 算法进行了比较研究,明确了按照几何精度因子(Geometric Dilution of Precision, GDOP)值最小的选星原则。

## 1 基于伪距差分的相对导航模型

### 1.1 基于伪距单差的相对导航模型

基于伪距单差的相对导航模型见图 1,目标船

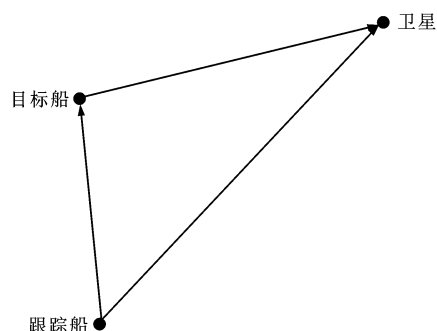


图 1 基于伪距单差的相对导航模型

Fig. 1 Relative navigation model based on pseudo-range single difference

观测到卫星的伪距为  $\rho$ ,跟踪船观测到卫星的伪距为  $\sigma$ ,地心地固(Earth-Centered Earth-Fixed, ECEF)坐标系下跟踪船到目标船的位置向量为  $(a, b, c)^T$ 。目标船和跟踪船的伪距方程为

$$\rho = \sqrt{(d-x)^2 + (e-y)^2 + (f-z)^2} + C(\delta + p) + \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 + \epsilon_4 \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{(g-x)^2 + (h-y)^2 + (i-z)^2} + C(\delta + q) + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 \quad (2)$$

式中:  $(x, y, z)^T, (d, e, f)^T, (g, h, i)^T$  分别为卫星、目标船、跟踪船在 ECEF 坐标系下的坐标;  $C$  为光速;  $\delta, p, q$  分别为卫星、目标船、跟踪船在 GPS 时统下的卫星钟差和接收机钟差;  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$  分别为目标船观测卫星的电离层、对流层、多路径与接收机观测噪声误差;  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  分别为跟踪船观测卫星的电离层、对流层、多路径与接收机观测噪声误差。

将跟踪船和目标船观测卫星的伪距进行差分,当目标船和跟踪船距离在 100 km 之内时,可以认为目标船和跟踪船观测同一颗卫星的电离层、对流层、多路径误差相同。可得单差  $\tau$  为

$$\tau = \rho - \sigma = \sqrt{(d-x)^2 + (e-y)^2 + (f-z)^2} - \sqrt{(g-x)^2 + (h-y)^2 + (i-z)^2} + C(p-q) + \epsilon_4 - \alpha_4 \quad (3)$$

在 ECEF 坐标系下跟踪船到目标船的位置向量为  $(a, b, c)^T$ ,可得

$$\tau = \sqrt{(d-x)^2 + (e-y)^2 + (f-z)^2} - \sqrt{(d-a-x)^2 + (e-b-y)^2 + (f-c-z)^2} + C(p-q) + \epsilon_4 - \alpha_4 \quad (4)$$

式(4)为基于伪距单差的相对导航方程,已知目标船的位置,通过观测 4 颗卫星的伪距信息,即可解

算目标船相对于跟踪船的位置。

### 1.2 基于伪距双差的相对导航模型

基于伪距双差的相对导航见图 2,跟踪船和目标船同时观测卫星 1、卫星 2,观测卫星 1 的单差为  $\tau_1$ ,则有

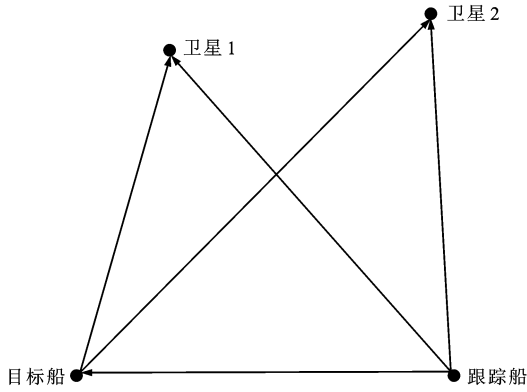


图 2 基于伪距双差的相对导航模型

Fig. 2 Relative navigation model based on pseudo-range double-difference

$$\tau_1 = \sqrt{(d-x_1)^2 + (e-y_1)^2 + (f-z_1)^2} - \sqrt{(g-x_1)^2 + (h-y_1)^2 + (i-z_1)^2} + C(p-q) + \epsilon_4 - \alpha_4 \quad (5)$$

式中:  $(x_1, y_1, z_1)^T$  为卫星 1 在 ECEF 坐标系下的坐标。

将目标船和跟踪船观测卫星 1 的伪距差与观测卫星 2 的伪距差进行差分,得到双差  $D_1$  为

$$D_1 = \sqrt{(d-x_1)^2 + (e-y_1)^2 + (f-z_1)^2} - \sqrt{(g-x_1)^2 + (h-y_1)^2 + (i-z_1)^2} - \left[ \sqrt{(d-x_2)^2 + (e-y_2)^2 + (f-z_2)^2} - \sqrt{(g-x_2)^2 + (h-y_2)^2 + (i-z_2)^2} \right] \quad (6)$$

式中:  $(x_2, y_2, z_2)^T$  为卫星 2 在 ECEF 坐标系下的坐标。

在 ECEF 坐标系下跟踪船到目标船的位置向量为  $(a, b, c)^T$ , 可得

$$D_1 = \sqrt{(d-x_1)^2 + (e-y_1)^2 + (f-z_1)^2} - \sqrt{(d-a-x_1)^2 + (e-b-y_1)^2 + (f-c-z_1)^2} - \left[ \sqrt{(d-x_2)^2 + (e-y_2)^2 + (f-z_2)^2} - \sqrt{(d-a-x_2)^2 + (e-b-y_2)^2 + (f-c-z_2)^2} \right] \quad (7)$$

式(7)为基于伪距双差的相对导航方程。已知目标船的位置,通过观测获得至少 4 颗卫星的伪距信息即可解算目标船相对于跟踪船的位置。

## 2 相对导航信息解算方法比较

### 1.1 基于伪距单差的最小二乘算法

在  $(a, b, c)^T = (0, 0, 0)^T$  处对式(4)进行泰勒级数展开,忽略高次项,可得

$$\tau = \tau|_{(0,0,0)} + \frac{a\partial\tau}{\partial a}\bigg|_{(0,0,0)} + \frac{b\partial\tau}{\partial b}\bigg|_{(0,0,0)} + \frac{c\partial\tau}{\partial c}\bigg|_{(0,0,0)} = \beta + v + \frac{d-x}{j}a + \frac{e-y}{j}b + \frac{f-z}{j}c \quad (8)$$

$$\beta = C(p-q)$$

$$j = \sqrt{(d-x)^2 + (e-y)^2 + (f-z)^2}$$

$$v = \epsilon_4 - \alpha_4$$

式中:  $\beta$  为目标船与跟踪船接收机钟差引起的伪距观测误差之差;  $v$  为目标船和跟踪船的观测噪声之差。

选择状态变量为  $\mathbf{X}_1 = (a, b, c, \beta)^T$ , 观测变量为  $\mathbf{Z}_1$ , 若跟踪船和目标船同时获得 4 颗以上卫星的伪距观测值,可得

$$\mathbf{Z}_1 = \mathbf{H}_1 \mathbf{X}_1 + \mathbf{V} \quad (9)$$

$$\mathbf{Z}_1 = [\tau_1 \quad \tau_2 \quad \cdots \quad \tau_n]$$

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} \frac{d-x_1}{j_1} & \frac{e-y_1}{j_1} & \frac{f-z_1}{j_1} & 1 \\ \frac{d-x_2}{j_2} & \frac{e-y_2}{j_2} & \frac{f-z_2}{j_2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{d-x_n}{j_n} & \frac{e-y_n}{j_n} & \frac{f-z_n}{j_n} & 1 \end{bmatrix}$$

$$j_n = \sqrt{(d-x_n)^2 + (e-y_n)^2 + (f-z_n)^2}$$

式中:  $\tau_n$  为第  $n$  颗卫星的单差;  $(x_n, y_n, z_n)^T$  为第  $n$  颗卫星在 ECEF 坐标系下的坐标;  $\mathbf{V}$  为误差矩阵。

跟踪船相对目标船的位置矢量以及跟踪船和目标船接收机钟差的差分组合  $\hat{\mathbf{X}}_1$  为

$$\hat{\mathbf{X}}_1 = (\mathbf{H}_1^T \mathbf{H}_1)^{-1} \mathbf{H}_1^T \mathbf{Z}_1 \quad (10)$$

其中观测卫星的坐标信息可以通过卫星广播星历计算得到,跟踪船和目标船相对观测卫星的伪距信息可以通过导航电文获取,目标船的观测伪距信息及坐标信息可以通过通信链发送到跟踪船。

### 2.2 基于伪距双差的最小二乘算法

在  $(a, b, c)^T = (0, 0, 0)^T$  处对式(7)进行泰勒级数展开,得到

$$D_1 = D_1|_{(0,0,0)} + \frac{a\partial D_1}{\partial a}\bigg|_{(0,0,0)} + \frac{b\partial D_1}{\partial b}\bigg|_{(0,0,0)} + \frac{c\partial D_1}{\partial c}\bigg|_{(0,0,0)} = \left( \frac{x_2-d}{j_2} - \frac{x_1-d}{j_1} \right) a +$$

$$\left(\frac{y_2-e}{j_2}-\frac{y_1-e}{j_1}\right)b+\left(\frac{z_2-f}{j_2}-\frac{z_1-f}{j_1}\right)c \quad (11)$$

选择状态变量为  $\mathbf{X}_2 = (a, b, c)^T$ , 观测变量为  $\mathbf{Z}_2$ , 若跟踪船和目标船同时获得 4 颗以上卫星的伪距观测值, 可得

$$\mathbf{Z}_2 = \mathbf{H}_2 \mathbf{X}_2 \quad (12)$$

$$\mathbf{Z}_2 = (D_1, D_2, \dots, D_{n(n-1)/2})^T$$

$$\mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} \frac{x_2-d}{j_2}-\frac{x_1-d}{j_1} & \frac{y_2-e}{j_2}-\frac{y_1-e}{j_1} & \frac{z_2-f}{j_2}-\frac{z_1-f}{j_1} \\ \frac{x_3-d}{j_3}-\frac{x_1-d}{j_1} & \frac{y_3-e}{j_3}-\frac{y_1-e}{j_1} & \frac{z_3-f}{j_3}-\frac{z_1-f}{j_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_n-d}{j_n}-\frac{x_{n-1}-d}{j_{n-1}} & \frac{y_n-e}{j_n}-\frac{y_{n-1}-e}{j_{n-1}} & \frac{z_n-f}{j_n}-\frac{z_{n-1}-f}{j_{n-1}} \end{bmatrix}$$

式中:  $D_{n(n-1)/2}$  为基于第  $n-1, n$  颗卫星的伪距双差。

可得式(12)的最小二乘解  $\hat{\mathbf{X}}_2$  为

$$\hat{\mathbf{X}}_2 = (\mathbf{H}_2^T \mathbf{H}_2)^{-1} \mathbf{H}_2^T \mathbf{Z}_2 \quad (13)$$

### 2.3 基于伪距单差的 EKF 算法

基于伪距单差模型的观测方程直接根据式(4)建立, 可得

$$Z_3 = \tau + A \quad (14)$$

式中:  $Z_3$  为基于伪距单差的 EKF 算法中的观测变量;  $A$  为基于伪距单差的 EKF 算法中的误差。

### 2.4 基于伪距双差的 EKF 算法

基于伪距双差模型的观测方程根据式(7)建立, 可得

$$Z_4 = D_1 + B \quad (15)$$

式中:  $Z_4$  为基于伪距双差的 EKF 算法中的观测变量;  $B$  为基于伪距双差的 EKF 算法中的误差。

建立状态方程和观测方程后, EKF 算法解算状态变量的步骤如下。

Step 1: 状态变量一步预测。

Step 2: 均方误差一步预测。

Step 3: 滤波增益。

Step 4: 状态估计。

Step 5: 均方误差估计。

## 3 试验结果分析

本文采用上海司南公司的 K501 OEM 板进行试验, 同步采集记录 2 个天线观测卫星的伪距信息与广播星历, 采集频率为 1 Hz, 并记录主天线的位置信息。事先测定 2 个天线之间的距离为 1.96 m, 方位角为  $309.3^\circ$ 。试验装置见图 3。

试验当天可观测卫星个数为 8 颗, 在解算中按



(a) 天线



(b) OEM 板

图 3 试验装置

Fig. 3 Test devices

照 GDOP 值最小的原则分别选择由 4、6、8 颗卫星组成的星座。基于伪距单差的最小二乘算法、基于伪距双差的最小二乘算法、基于伪距单差的 EKF 算法、基于伪距双差的 EKF 算法分别记为算法 1~4。基于 4、6、8 颗卫星观测数据应用不同方法解算的距离和方位角曲线见图 4~27。基于 4、6、8 颗卫星的计算结果分别见表 1~3。

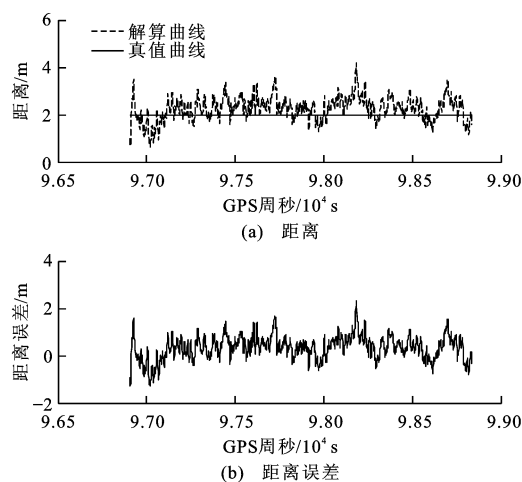


图 4 算法 1 基于 4 颗卫星观测数据的距离曲线

Fig. 4 Distance curves of algorithm 1 based on observation data of four satellites

由表 1~3 可知, 无论是对于单差模型还是双差模型, 最小二乘算法解算相对导航信息误差较大, 相比最小二乘算法, EKF 算法能够显著提高相对导

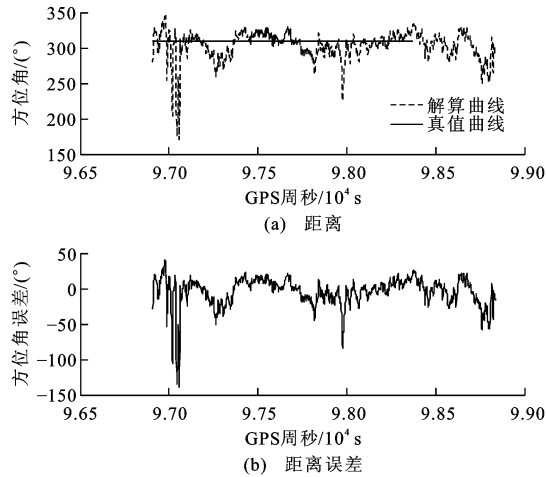


图 5 算法 1 基于 4 颗卫星观测数据的方位角曲线

Fig. 5 Azimuth curves of algorithm 1 based on observation data of four satellites

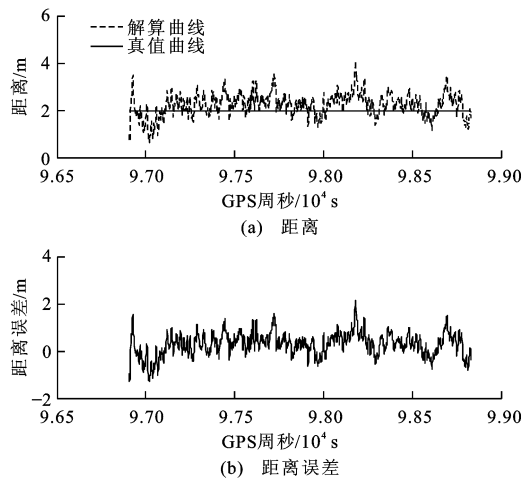


图 6 算法 2 基于 4 颗卫星观测数据的距离曲线

Fig. 6 Distance curves of algorithm 2 based on observation data of four satellites

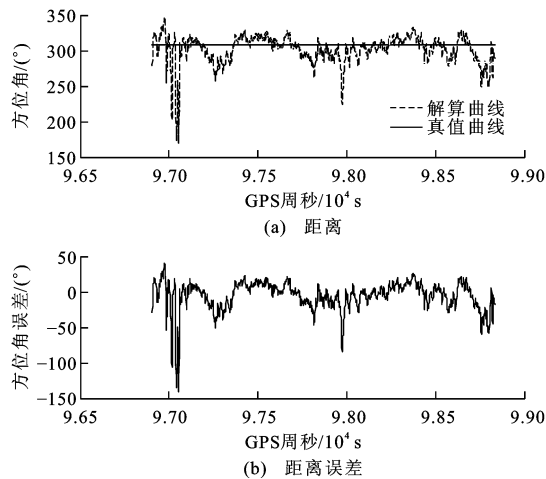


图 7 算法 2 基于 4 颗卫星观测数据的方位角曲线

Fig. 7 Azimuth curves of algorithm 2 based on observation data of four satellites

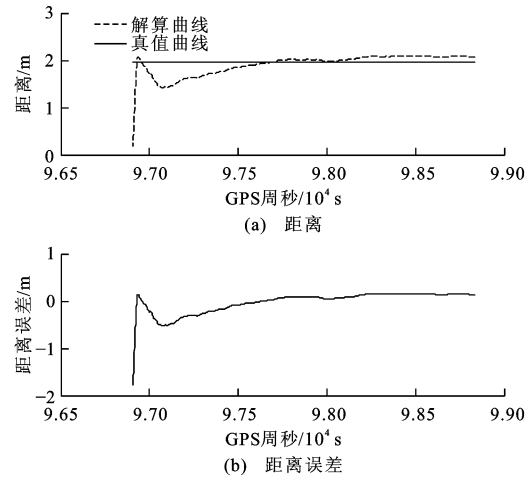


图 8 算法 3 基于 4 颗卫星观测数据的距离曲线

Fig. 8 Distance curves of algorithm 3 based on observation data of four satellites

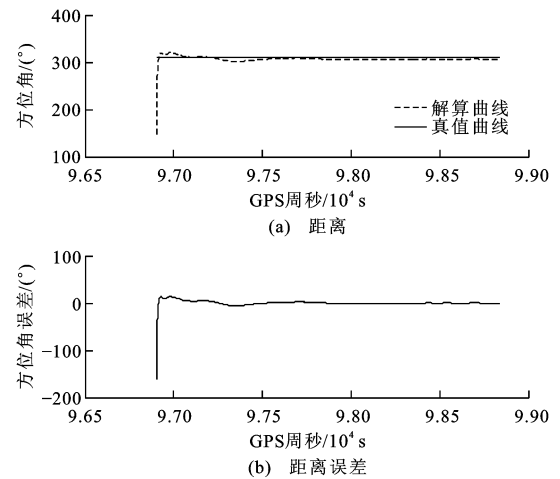


图 9 算法 3 基于 4 颗卫星观测数据的方位角曲线

Fig. 9 Azimuth curves of algorithm 3 based on observation data of four satellites

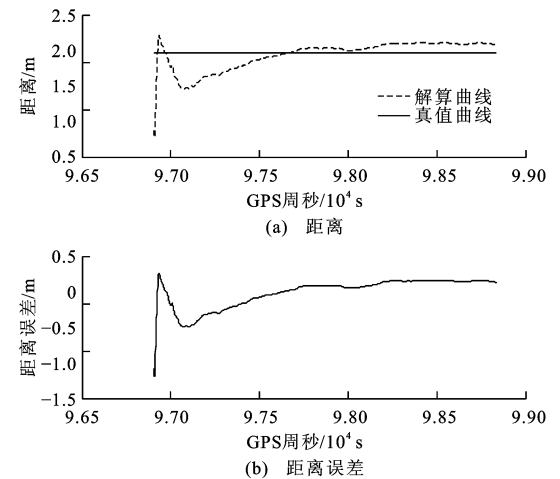


图 10 算法 4 基于 4 颗卫星观测数据的距离曲线

Fig. 10 Distance curves of algorithm 4 based on observation data of four satellites

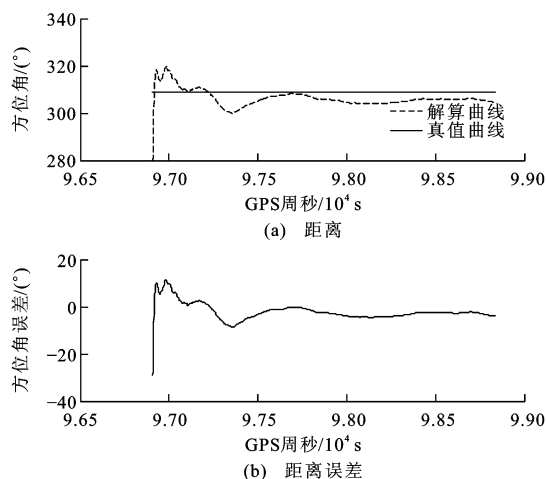


图 11 算法 4 基于 4 颗卫星观测数据的方位角曲线  
Fig. 11 Azimuth curves of algorithm 4 based on observation data of four satellites

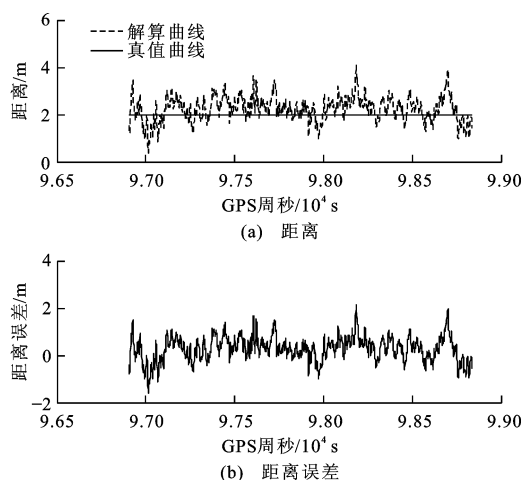


图 12 算法 1 基于 6 颗卫星观测数据的距离曲线  
Fig. 12 Distance curves of algorithm 1 based on observation data of six satellites

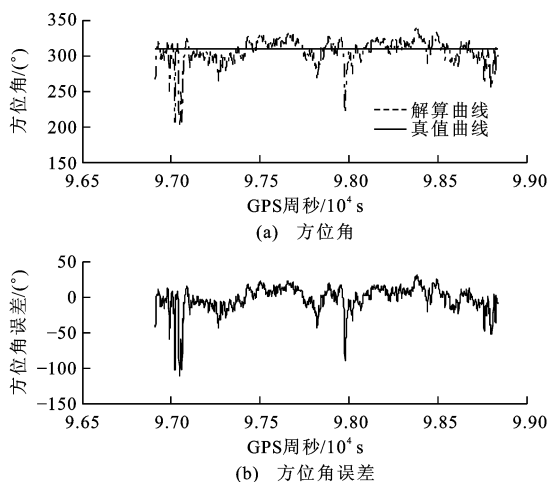


图 13 算法 1 基于 6 颗卫星观测数据的方位角曲线  
Fig. 13 Azimuth curves of algorithm 1 based on observation data of six satellites

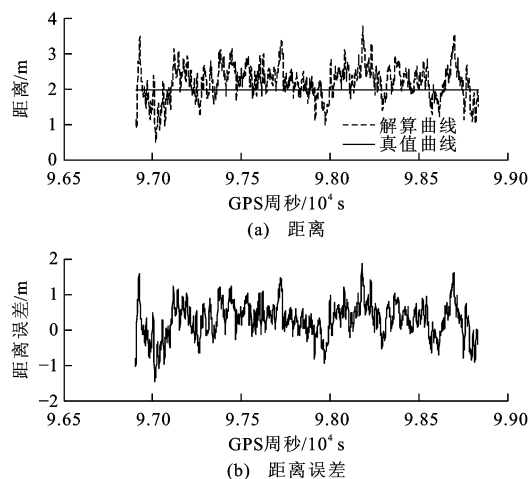


图 14 算法 2 基于 6 颗卫星观测数据的距离曲线  
Fig. 14 Distance curves of algorithm 2 based on observation data of six satellites

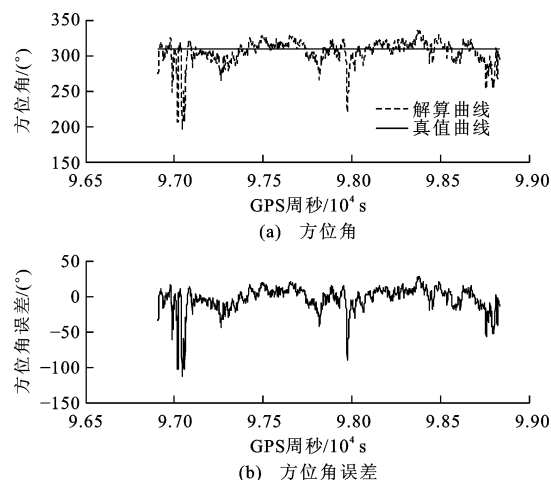


图 15 算法 2 基于 6 颗卫星观测数据的方位角曲线  
Fig. 15 Azimuth curves of algorithm 2 based on observation data of six satellites

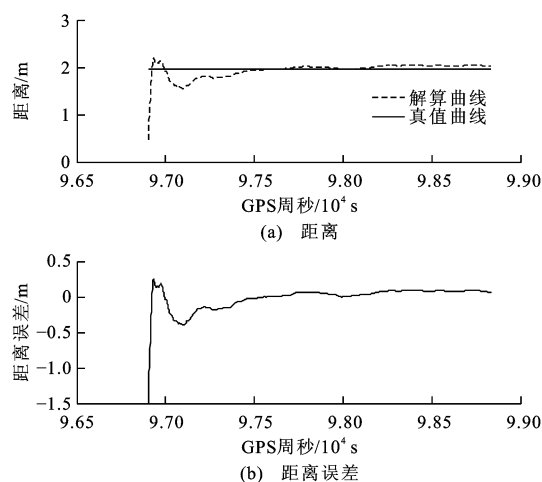


图 16 算法 3 基于 6 颗卫星观测数据的距离曲线  
Fig. 16 Distance curves of algorithm 3 based on observation data of six satellites

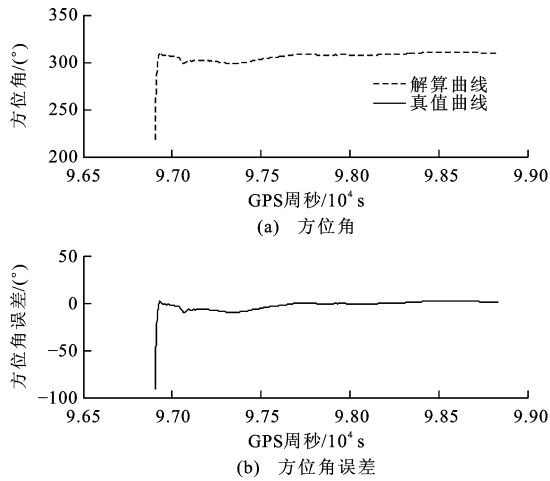


图 17 算法 3 基于 6 颗卫星观测数据的方位角曲线  
Fig. 17 Azimuth curves of algorithm 3 based on observation data of six satellites

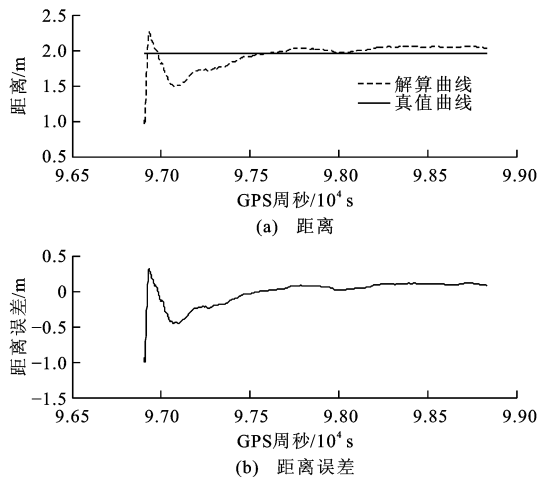


图 18 算法 4 基于 6 颗卫星观测数据的距离曲线  
Fig. 18 Distance curves of algorithm 4 based on observation data of six satellites

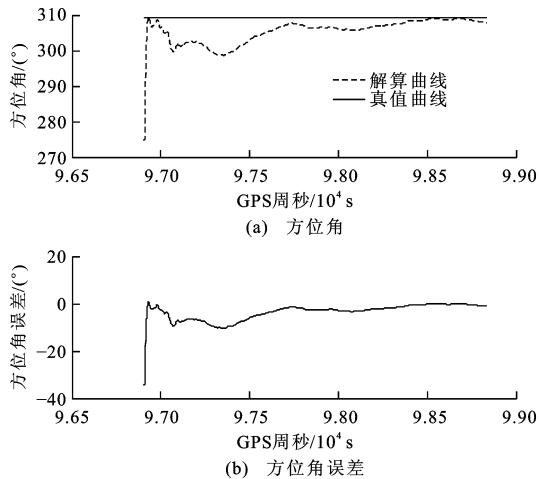


图 19 算法 4 基于 6 颗卫星观测数据的方位角曲线  
Fig. 19 Azimuth curves of algorithm 4 based on observation data of six satellites

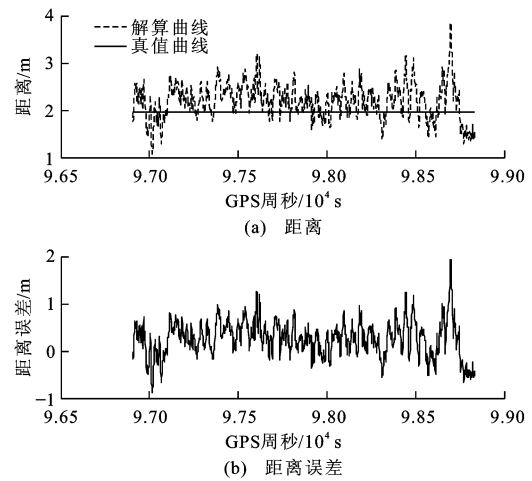


图 20 算法 1 基于 8 颗卫星观测数据的距离曲线  
Fig. 20 Distance curves of algorithm 1 based on observation data of eight satellites

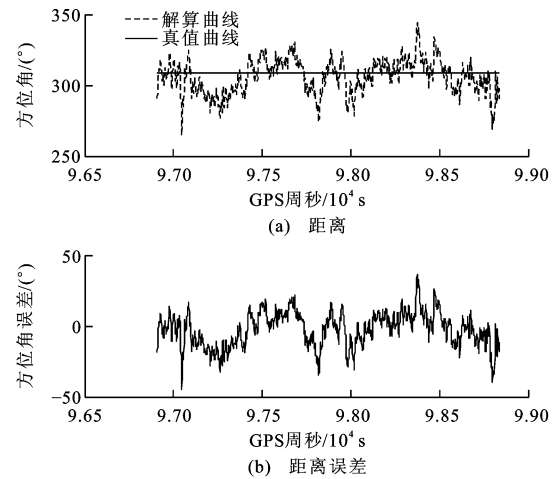


图 21 算法 1 基于 8 颗卫星观测数据的方位角曲线  
Fig. 21 Azimuth curves of algorithm 1 based on observation data of eight satellites

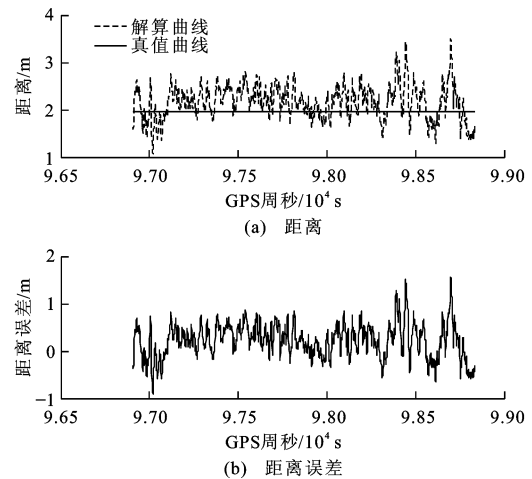


图 22 算法 2 基于 8 颗卫星观测数据的距离曲线  
Fig. 22 Distance curves of algorithm 2 based on observation data of eight satellites

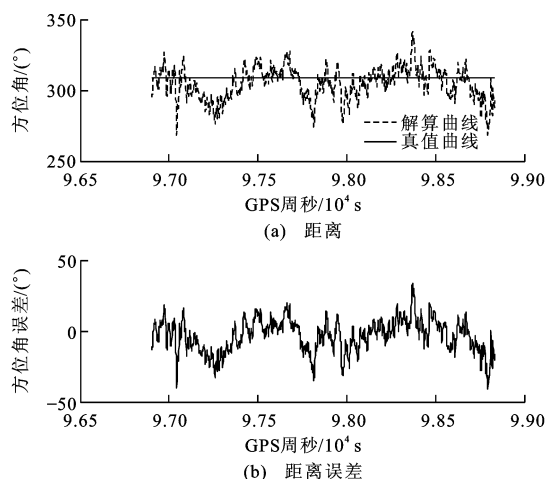


图 23 算法 2 基于 8 颗卫星观测数据的方位角曲线  
Fig. 23 Azimuth curves of algorithm 2 based on observation data of eight satellites

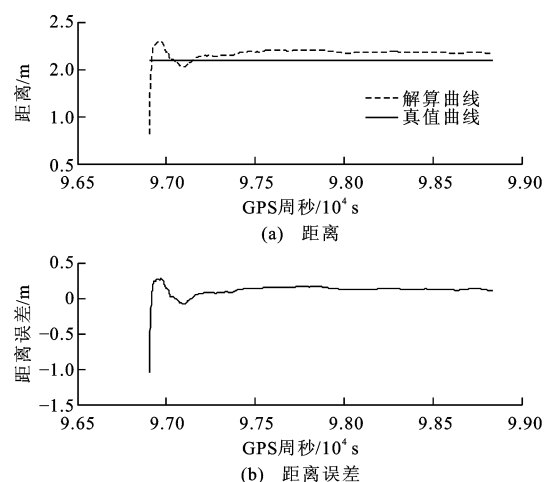


图 24 算法 3 基于 8 颗卫星观测数据的距离曲线  
Fig. 24 Distance curves of algorithm 3 based on observation data of eight satellites

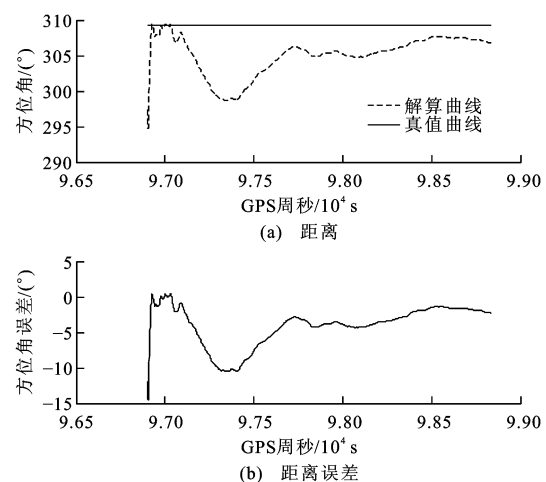


图 25 算法 3 基于 8 颗卫星观测数据的方位角曲线  
Fig. 25 Azimuth curves of algorithm 3 based on observation data of eight satellites

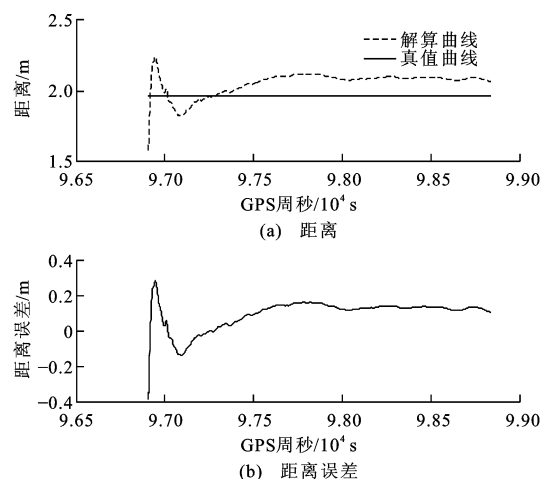


图 26 算法 4 基于 8 颗卫星观测数据的距离曲线  
Fig. 26 Distance curves of algorithm 4 based on observation data of eight satellites

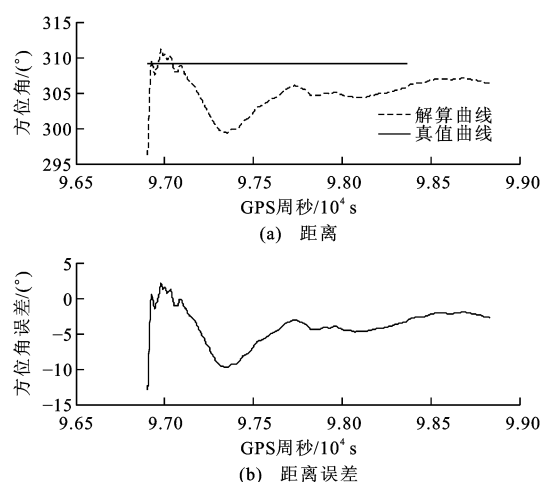


图 27 算法 4 基于 8 颗卫星观测数据的方位角曲线  
Fig. 27 Azimuth curves of algorithm 4 based on observation data of eight satellites

表 1 基于 4 颗卫星的计算结果

Tab. 1 Calculated result based on four satellites

算法	距离解算精度/m	方位角解算精度/(°)
算法 1	0.58	17.4
算法 2	0.55	17.5
算法 3	0.14	4.0
算法 4	0.13	4.0

表 2 基于 6 颗卫星的计算结果

Tab. 2 Calculated result based on six satellites

算法	距离解算精度/m	方位角解算精度/(°)
算法 1	0.58	15.0
算法 2	0.51	14.9
算法 3	0.08	4.9
算法 4	0.08	4.5



表 3 基于 8 颗卫星的计算结果  
Tab. 3 Calculated result based on eight satellites

算法	距离解算精度/m	方位角解算精度/(°)
算法 1	0.45	12.3
算法 2	0.43	12.3
算法 3	0.12	5.2
算法 4	0.12	5.0

航信息的解算精度。同样在采用 EKF 算法的前提下,单差模型和双差模型所得距离解算精度相当,方位角解算精度也相当,双差模型相比单差模型的解算精度提高约 10%。

在 GDOP 值最小的原则下,卫星个数增多,距离解算精度提高。8 颗卫星对应 GDOP 值并非最小,故而同样采用 EKF 算法的前提下,采用 8 颗卫星解算的精度有所下降。

当基线为 2 m 时,基于伪距双差的 EKF 算法所得距离解算精度可达到 0.10 m 以内,方位角解算精度可达到 4.0°。基线为 20 m 时,估计方位角解算精度可达到 0.4°。大型舰船编队舰船间安全距离远超 20 m,故而本文的试验精度和解算频率完全满足大型舰船编队保持准动态的相对导航需求。

## 4 结 语

基于导航卫星伪距双差建立了相对导航模型,设计了基于伪距单差的最小二乘算法、基于伪距双差的最小二乘算法、基于伪距单差的 EKF 算法与基于伪距双差的 EKF 算法,并对其性能进行比较。

(1)基于伪距双差的相对导航模型可以消除电离层、对流层、多路径误差、卫星钟差与接收机钟差。

(2)与最小二乘算法相比,EKF 算法能够显著提高相对导航信息的解算精度。EKF 算法下双差模型相比单差模型的解算精度提高约 10%。在 GDOP 值最小的原则下,卫星个数增多,距离解算精度提高。

(3)当基线为 2 m 时,基于伪距双差的 EKF 算法所得距离解算精度可达到 0.10 m 以内,方位角解算精度可达到 4.0°。本文的试验精度和解算频率满足大型舰船编队保持准动态的相对导航需求。

## 参考文献:

## References:

- [1] 李 伟,刘美红,段登平. 基于简化差分插值滤波的编队卫星相对导航[J]. 上海交通大学学报,2014,48(2):229-233.  
LI Wei, LIU Mei-hong, DUAN Deng-ping. Relative navigation

- for spacecraft formation based on simplified divided difference filter[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2014, 48(2): 229-233. (in Chinese)
- [2] 武瑾媛,房建成,杨照华. 基于扩维卡尔曼滤波的火星探测器脉冲星相对导航方法[J]. 仪器仪表学报,2013,34(8): 1711-1716.  
WU Jin-yuan, FANG Jian-cheng, YANG Zhao-hua. ASUKF based relative navigation method for mars probe using pulsar[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(8): 1711-1716. (in Chinese)
- [3] 刘雪奎,孙兆伟,张 健,等. 基于粒子滤波的通信保障航天器相对导航方法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2012,44(11): 27-30,80.  
LIU Xue-kui, SUN Zhao-wei, ZHANG Jian, et al. Relative navigation method of communication supporting space-craft base-on particle filter[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(11): 27-30, 80. (in Chinese)
- [4] 李 轶,张善从. 基于视线测量的航天器相对导航滤波方法研究[J]. 仪器仪表学报,2012,33(6):1201-1209.  
LI Yi, ZHANG Shan-cong. Relative navigation filter algorithm for spacecrafts based on line-of-sight[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(6): 1201-1209. (in Chinese)
- [5] 王 楷,陈 统,徐世杰. 基于双视线测量的相对导航方法[J]. 航空学报,2011,32(6):1084-1091.  
WANG Kai, CHEN Tong, XU Shi-jie. A method of double line-of-sight measurement relative navigation[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(6): 1084-1091. (in Chinese)
- [6] LEE J Y, KIM H S, CHOI K H, et al. Design of adaptive filtering algorithm for relative navigation[C]//IAENG. Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2013. Hong Kong: Newswood Limited, 2013: 892-896.
- [7] D'AMICO S, LARSSON R. Navigation and control of the PRISMA formation: in-orbit experience[J]. Journal of Mechanics Engineering and Automation, 2012, 2(5): 312-320.
- [8] CHAMON L F O, LOPES C G. Combination of adaptive filters for relative navigation[C]//EURASIP. 19th European Signal Processing Conference. Warsaw: EURASIP, 2011: 1771-1775.
- [9] RENGA A, GRASSI M, TANCREDI U. Relative navigation in LEO by carrier-phase differential GPS with intersatellite ranging augmentation[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2013, 2013: 1-11.
- [10] LEISHMAN R C. A vision-based relative navigation approach for autonomous multirotor aircraft[D]. Provo: Brigham Young University, 2013.
- [11] LI R, JIAO Y Y, LI Y, et al. Simulation platform for relative navigation using GPS carrier phase measurements for satellite formation flying missions[C]//IGNSS. International Global Navigation Satellite Systems Society IGNSS Symposium

2011. Tweed Heads: IGNS, 2011: 1-13.
- [12] 张共愿,程咏梅,程 承,等. 基于相对导航的多平台 INS 误差联合修正方法[J]. 航空学报, 2011, 32(2): 271-280.  
ZHANG Gong-yuan, CHENG Yong-mei, CHENG Cheng, et al. A joint correcting method of multi-platform INS error based on relative navigation[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(2): 271-280. (in Chinese)
- [13] 邓 泓,仲惟超,孙兆伟,等. 拦截卫星相对导航算法研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(2): 83-87.  
DENG Hong, ZHONG Wei-chao, SUN Zhao-wei, et al. Relative navigation research of intercepting satellite[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(2): 83-87. (in Chinese)
- [14] 吕纪远,周 军,刘莹莹. 自适应滤波在空间机动目标相对导航中的应用[J]. 西北工业大学学报, 2011, 29(4): 564-568.  
LU Ji-yuan, ZHOU Jun, LIU Ying-ying. Applying auto-adaptation filter to tracking of maneuvering target in special relative navigation[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2011, 29(4): 564-568. (in Chinese)
- [15] 王小刚,郭继峰,崔乃刚. 一种鲁棒 Sigma-point 滤波算法及其在相对导航中的应用[J]. 航空学报, 2010, 31(5): 1024-1029.  
WANG Xiao-gang, GUO Ji-feng, CUI Nai-gang. Robust Sigma-point filtering and its application to relative navigation[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(5): 1024-1029. (in Chinese)
- [16] 刘承奇,贾宏英,徐世杰. 四种卡尔曼滤波器在仅视线测量相对导航中的性能比较[J]. 空间控制技术与应用, 2014, 40(1): 52-57.  
LIU Cheng-qi, JIA Ying-hong, XU Shi-jie. Comparison of four different Kalman filters for relative navigation based on line-of-sight-only measurement[J]. Aerospace Control and Application, 2014, 40(1): 52-57. (in Chinese)
- [17] 刘 勇,徐 鹏,徐世杰. 航天器自主交会对接的视觉相对导航方法[J]. 中国空间科学技术, 2013, 33(6): 33-40.  
LIU Yong, XU Peng, XU Shi-jie. Vision-based relative navigation for rendezvous and docking of spacecraft[J]. Chinese Space Science and Technology, 2013, 33(6): 33-40. (in Chinese)
- [18] WANG Da. Cooperative V2X relative navigation using tight-integration of DGPS and V2X UWB range and simulated bearing[D]. Calgary: University of Calgary, 2015.
- [19] 王秀森,周红进,张尚悦. 基于 GPS 伪距单差的舰船相对导航方法[J]. 中国惯性技术学报, 2012, 20(4): 464-467.  
WANG Xiu-sen, ZHOU Hong-jin, ZHANG Shang-yue. Relative navigation between vessels based on GPS single difference[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2012, 20(4): 464-467. (in Chinese)
- [20] 宋 伟,周红进,王秀森. Kalman 滤波应用于 GPS 相对导航信息解算方法[J]. 舰船科学技术, 2013, 35(6): 65-68.  
SONG Wei, ZHOU Hong-jin, WANG Xiu-sen. Research on relative navigation method based on GPS using Kalman filter[J]. Ship Science and Technology, 2013, 35(6): 65-68. (in Chinese)

## 《中国公路学报》2016 年征订通知

《中国公路学报》(Ei Compendex 收录, ISSN 1001-7372, CN 61-1313/U)是由中国公路学会主办,长安大学承办的公路交通行业权威的学术刊物,主要刊载道路工程、桥梁与隧道工程、交通工程、汽车与汽车运用工程、工程机械、物流、经济与管理等领域的学术论文,并适当报道有关公路交通的新技术、新材料、新工艺以及国内外重大学术活动、工程建设与科技动态信息等。

《中国公路学报》现为月刊,大 16 开本,主要读者对象为公路交通领域的科研人员、工程技术人员、经济管理人员及大专院校的师生。编辑部于 2014 年初开通了网络在线投稿系统,欢迎广大读者踊跃投稿!

2016 年,《中国公路学报》页码增至每期 144 页,每期定价为 100.00 元,全年共 1 200.00 元,国内邮发代号:52-194,国外发行代号:M7917。欢迎订阅!

地 址:西安市南二环路中段长安大学杂志社

联系人:马 勇

网 址: <http://zgglxb.chd.edu.cn>

邮 编:710064

电 话:(029)82334387

邮 箱: [zgglxb@163.com](mailto:zgglxb@163.com)