

引用格式:胡朝阳,裴炳南,程诚.一种GPS/BDS双模导航系统的选星算法[J].电光与控制,2019,26(6):49-53. HU C Y, PEI B N, CHENG C. A satellite selection algorithm for GPS/BDS integrated navigation[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(6):49-53.

一种GPS/BDS双模导航系统的选星算法

胡朝阳^{a,b}, 裴炳南^{a,b}, 程诚^{a,b}

(大连大学, a. 辽宁省北斗高精度位置服务技术工程实验室;
b. 大连市环境感知与智能控制重点实验室, 辽宁 大连 116622)

摘要:为解决传统选星算法中定位精度与计算GDOP复杂度之间的矛盾,提出一种改进的快速卫星选择算法。通过利用卫星的高度角和方位角信息划分区域,剔除信噪比小于一定门限的卫星,应用牛顿恒等式的GDOP计算方法,最终确定选择6颗卫星进行定位。用于较少周期计算的最佳卫星几何分布划分区域可以极大减少运算量,理论分析和实验结果表明,与最小GDOP算法相比,在略微牺牲定位精度的情况下,所提算法计算量显著降低,而定位精度优于Quasi-Optimal算法,证明了该算法的有效性。

关键词:选星算法;几何精度因子;高度角;方位角

中图分类号: TN961 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.06.010

A Satellite Selection Algorithm for GPS/BDS Integrated Navigation

HU Chao-yang^{a,b}, PEI Bing-nan^{a,b}, CHENG Cheng^{a,b}

(Dalian University, a. Liaoning Engineering Laboratory of BeiDou High-Precision Location Service;
b. Dalian Key Laboratory of Environmental Perception and Intelligent Control, Dalian 116622, China)

Abstract: In order to solve the contradiction between the positioning accuracy in the traditional star selection algorithm and the complexity for calculating the Geometric Dilution of Precision (GDOP), an improved fast satellite selection algorithm is proposed. By using the elevation angle and azimuth information of the satellite to divide the region, the satellite with signal-to-noise ratio less than a certain threshold is eliminated, and the GDOP calculation method of Newton's identity is used to finally determine the selection of six satellites for positioning. The optimal satellite geometric distribution region for less period calculation can greatly reduce the amount of computation. Theoretical analysis and experimental results show that: Compared with the minimum GDOP algorithm, the proposed algorithm has a significant reduction on computation amount when the positioning accuracy is slightly sacrificed, and the positioning accuracy is higher than that of the Quasi-Optimal algorithm, which proves the effectiveness of the algorithm.

Key words: satellite selection algorithm; GDOP; elevation angle; azimuth

0 引言

迄今为止,太空存在的导航卫星星座中已有超过70颗卫星,随着GPS的升级改造以及北斗导航系统(BDS)、GLONASS和Galileo卫星星座布设的完成,空间星座将会有超过120颗导航卫星^[1]。充分利用这些卫星服务信息可以大大提高位置服务的精度及系统的

稳定性和可靠性^[2],但接收机面临极其繁重的计算压力而难以满足实时、鲁棒定位的要求。因此,如何从大量的可见卫星中选择合适的卫星参与定位解算具有重要意义^[3]。选星算法大多从以下两个方面进行。第一个方面是试图找到计算几何精度因子(GDOP)封闭形式的公式。传统的GDOP计算涉及矩阵求逆和矩阵乘法运算,近年来也有学者对GDOP公式进行改进。文献[4]提出一种基于行列式值的改进选星算法;文献[5]通过引入L-M算法和神经网络算法进行选星;文献[6]总结了神经网络的缺点,在GDOP计算的基础上利用模拟退火算法进行选星。相比传统的GDOP计

收稿日期:2018-06-06 修回日期:2018-07-27

基金项目:国家自然科学基金(61271379)

作者简介:胡朝阳(1994—),男,河南安阳人,硕士生,研究方向为GNSS卫星导航高精度定位。

算方法,以上算法避免了矩阵求逆运算,但算法复杂,难以满足实时要求。第二个方面是试图根据空间的几何分布从所有可见星中选择可用卫星。文献[7]通过引入代价函数和卫星仰角分区进行快速选星;文献[8]提出一种仰角分区和四面体体积最大法相结合的方法选取空间分布较好的4颗卫星进行选星;文献[9]以最佳星座配置法和底座中心法为基础,针对多系统的特点制定选星策略。这些算法能够快速选星,保证了实时性,但牺牲了一部分定位精度。

本文根据卫星信号信噪比提出一种改进算法,基本思想是:设定一个阈值,剔除信噪比小于该阈值的卫星,利用对称矩阵的特性和牛顿恒等式降低计算复杂度,通过寻找最接近最优卫星分布的子集减少GDOP的计算周期,从而实现GPS/BDS双模接收机的快速选星。

1 定位模型与误差分析

1.1 定位的数学模型

虽然GPS与BDS的时间和坐标系统是不相同的,但它们的时间系统均基于UTC,坐标系统均为笛卡尔坐标系,因此可以从一个系统转换为另一个系统。本文将BDS的CGCS-2000坐标系转换为GPS系统下的WGS-84坐标系开展研究。

系统的伪距观测方程为

$$r^{(n)} + c \cdot \delta t_u = \rho^{(n)} + \varepsilon_\rho^{(n)} \quad (1)$$

式中: $r^{(n)}$ 表示卫星 n (BDS或者GPS)到接收机间的真实几何距离; c 表示光速,取299 792 458 m/s; δt_u 表示接收机钟差; $\rho^{(n)}$ 表示卫星 n (BDS或GPS)到接收机间的伪距; $\varepsilon_\rho^{(n)}$ 表示未知的测量噪声,包括天线相位噪声、多径效应、相对论效应和电磁干扰噪声等。其中,电离层延迟和对流层延迟可通过成熟的模型进行消除,在此不考虑误差。 $r^{(n)}$ 定义为: $r^{(n)} = \| \mathbf{X}^{(n)} - \mathbf{X} \| = \sqrt{(x^{(n)} - x)^2 + (y^{(n)} - y)^2 + (z^{(n)} - z)^2}$ 。其中: $\mathbf{X}^{(n)}$ 表示卫星位置向量; \mathbf{X} 表示未知接收机位置向量。

通过最小二乘法可计算出定位的最小二乘解为

$$\begin{bmatrix} \Delta x + \varepsilon_x \\ \Delta y + \varepsilon_y \\ \Delta z + \varepsilon_z \\ \Delta t_{u\text{GPS}} + \varepsilon_{t_{u\text{GPS}}} \\ \Delta t_{u\text{BDS}} + \varepsilon_{t_{u\text{BDS}}} \end{bmatrix} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{b} + (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \boldsymbol{\varepsilon}_\rho \quad (2)$$

$$[\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \varepsilon_{t_{u\text{GPS}}} \quad \varepsilon_{t_{u\text{BDS}}}]^T = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \boldsymbol{\varepsilon}_\rho \quad (3)$$

式中: $\boldsymbol{\varepsilon}_\rho = [\varepsilon_{\rho\text{GPS}}^{(1)} \quad \varepsilon_{\rho\text{GPS}}^{(2)} \quad \cdots \quad \varepsilon_{\rho\text{GPS}}^{(N)} \quad \varepsilon_{\rho\text{BDS}}^{(1)} \quad \varepsilon_{\rho\text{BDS}}^{(2)} \quad \cdots \quad \varepsilon_{\rho\text{BDS}}^{(N)}]$;矩阵 \mathbf{G} 和矩阵 \mathbf{b} 的定义分别为

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} -I_x^{(1)} & -I_y^{(1)} & -I_z^{(1)} & k_G & k_B \\ -I_x^{(2)} & -I_y^{(2)} & -I_z^{(2)} & k_G & k_B \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -I_x^{(M)} & -I_y^{(M)} & -I_z^{(M)} & k_G & k_B \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \rho_{\text{GPS}}^{(1)} - r^{(1)} - \delta t_{u\text{GPS}} \\ \rho_{\text{GPS}}^{(2)} - r^{(2)} - \delta t_{u\text{GPS}} \\ \vdots \\ \rho_{\text{BDS}}^{(M)} - r^{(M)} - \delta t_{u\text{BDS}} \end{bmatrix}。$$

其中: $\delta t_{u\text{GPS}}$ 为GPS卫星和接收机间的钟差; $\delta t_{u\text{BDS}}$ 为BDS卫星和接收机间的钟差; M 为BDS和GPS可见卫星总数; k_G 表示GPS卫星和接收机之间的钟差系数, k_B 表示BDS卫星和接收机间的钟差系数, k_G 和 k_B 同一时间只有一个为1,另一个为0; $-I$ 表示使用泰勒级数展开的偏导数,以 $-I_x^{(n)}$ 为例, $-I_x^{(n)} = \frac{-(x^{(n)} - x)}{r^{(n)}}$ 。

1.2 定位误差分析

从式(2)和式(3)可看出定位误差与测量误差间的关系,通常可以做如下假设^[10]:1)各卫星的测量误差 $\boldsymbol{\varepsilon}_\rho$ 均呈均值为0、方差为 σ_{URE}^2 的正态分布;2)不同卫星间的测量误差互不相关。

对于假设1),实际应用中,接收机必须根据卫星信号强弱、卫星仰角高低和接收机跟踪环路运行状态等指标,对不同时刻、不同卫星测量值的 σ_{URE} 进行估算。本文在选星过程中,加入卫星信号强弱(信噪比)分析,综合分析卫星信号强弱对定位误差的影响^[11],根据选定卫星数目和定位精度要求,设置卫星信噪比阈值为37 dB。

对于假设2),测量误差向量 $\boldsymbol{\varepsilon}_\rho$ 的协方差矩阵为

$$\mathbf{K}_{\text{COV}} = E(\boldsymbol{\varepsilon}_\rho^T \boldsymbol{\varepsilon}_\rho) \quad (4)$$

将式(2)和式(3)代入式(4),可得

$$\mathbf{K}_{\text{COV}} = \begin{bmatrix} \sigma_{\text{URE}}^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma_{\text{URE}}^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \sigma_{\text{URE}}^2 \end{bmatrix} = \sigma_{\text{URE}}^2 \mathbf{I},$$

其中, \mathbf{I} 为 $N \times N$ 的单位矩阵。

根据假设1)、假设2)可以极大简化定位误差协方差矩阵的推导。由此,式(4)的协方差矩阵为

$$\mathbf{K}_{\text{COV}} = E \left(\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_{\delta t_{u\text{GPS}}} \\ \varepsilon_{\delta t_{u\text{BDS}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_y & \varepsilon_z & \varepsilon_{\delta t_{u\text{GPS}}} & \varepsilon_{\delta t_{u\text{BDS}}} \end{bmatrix} \right) = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \sigma_{\text{URE}}^2 \circ$$

通常情况下,GDOP作为定位误差的影响因子,

GDOP 越小,定位精度越好。对 GDOP 的定义为

$$P_{\text{GDOP}} = \sqrt{\text{tr}((\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1})} = \sqrt{\frac{\text{tr}[\text{adj}(\mathbf{G}^T \mathbf{G})]}{\det(\mathbf{G}^T \mathbf{G})}} \quad (5)$$

式中:tr 表示矩阵的迹;adj 表示伴随矩阵;det 表示矩阵的行列式。

2 快速选星算法

2.1 牛顿恒等式

定理:设 x_1, x_2, \dots, x_n 是方程 $x^n + a_1 x^{n-1} + \dots + a_{n-1} x + a_n = 0$ 的 n 个根,记 $S_k = x_1^k + x_2^k + \dots + x_n^k$ ($k \in \mathbf{N}$),则有:

1) 当 $k \leq n$ 时, $S_k + a_1 S_{k-1} + a_2 S_{k-2} + \dots + a_{k-1} S_1 + a_k k = 0$;

2) 当 $k > n$ 时, $S_k + a_1 S_{k-1} + a_2 S_{k-2} + \dots + a_n S_{k-n} = 0$ 。

传统求解 GDOP 需用到矩阵求逆和矩阵乘法运算,尤其是组合定位系统中随着可见卫星数增加, GDOP 计算量成倍增加,从而给接收机造成严重的计算负担。本文针对 GPS/BDS 双模定位系统进行选星研究,考虑 GPS 和 BDS 卫星钟差,选择 6 颗卫星进行定位,并改进 GDOP 封闭方程。首先选择 4 颗卫星对 GDOP 范围进行估计。当用 4 颗卫星计算接收机位置时, GDOP 的边界范围满足^[12]: $P_{\text{GDOP}} \geq \sqrt{2}$, $P_{\text{GDOP}} \geq \frac{2}{(\det(\mathbf{G}^T \mathbf{G}))^{1/8}}$ 。

随着参与定位解算可见卫星数目的增加, GDOP 呈下降趋势,而且 GDOP 降低的幅度随着参与定位解算卫星数目的增加而减小,当卫星数目超过 6 颗后, GDOP 递减的幅度会很小^[13]。参考文献[14-15]给出了运用牛顿恒等式改进的 GDOP 计算方法,其中适用于 4 颗卫星的计算 GDOP 封闭公式为: $E_{ij} = e_{i1} e_{j1} + e_{i2} e_{j2} + e_{i3} e_{j3} + 1, 1 \leq i \leq j \leq 4$ 。其中, $e_{i1}, e_{i2}, e_{i3}, e_{j1}, e_{j2}, e_{j3}$ 是矩阵 \mathbf{G} 的方向向量,满足 $e_{i1}^2 + e_{i2}^2 + e_{i3}^2 = 1$ 。经过一系列简化,最终得到 GDOP 的封闭方程^[14]为

$$P_{\text{GDOP}} = \sqrt{\frac{16+b+c}{a+b+2c}} \quad (6)$$

式中, a, b, c 是中间变量,分别定义为 $a = (E_{12} E_{34} + E_{13} E_{24} - E_{14} E_{23})^2 - 4(E_{12} E_{34} E_{13} E_{24})$, $b = 16 - 4(E_{12}^2 + E_{13}^2 + E_{14}^2 + E_{23}^2 + E_{24}^2 + E_{34}^2)$, $c = 2[E_{12}(E_{13} E_{23} + E_{14} E_{24}) + E_{34}(E_{13} E_{14} + E_{23} E_{24})]$ 。

处理多于 4 颗卫星的 GDOP 封闭方程的代数多项式为^[14]

$$P_{\text{GDOP}} = \sqrt{\frac{0.5 f_1^3 - 1.5 f_1 f_2 + f_3}{3 f_4}} \quad (7)$$

其中,用特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ 来计算 GDOP 值,记: $f_1(\lambda) = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = \text{tr}(\mathbf{G}^T \mathbf{G})$, $f_2(\lambda) = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 + \lambda_4^2 = \text{tr}((\mathbf{G}^T \mathbf{G})^2)$, $f_3(\lambda) = \lambda_1^3 + \lambda_2^3 + \lambda_3^3 + \lambda_4^3 = \text{tr}((\mathbf{G}^T \mathbf{G})^3)$,

$f_4(\lambda) = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 = \det(\mathbf{G}^T \mathbf{G})$ 。

为确保 GDOP 处理速度,处理 4 颗卫星时使用式(6),处理多于 4 颗卫星时选择式(7),与 GDOP 直接矩阵求逆相比,计算复杂度显著降低。

2.2 改进的选星算法

本文针对 GPS/BDS 双模定位系统进行选星算法的研究,采用从所有可见卫星中选择 6 颗卫星进行定位解算。所提改进选星算法步骤如下。

1) 根据卫星广播星历信息,计算 WGS-84 和 CGCS-2000 坐标系下卫星的坐标、仰角和方位角。虽然 GPS/BDS 两个系统的星座分布不同,但是通过 1.1 节分析可以将两个系统转化到同一个参考坐标系下进行定位解算。两个系统的卫星截止高度角设置为 10° ^[16],根据接收机接收卫星信号信噪比的大小排除信噪比低于 37 dB 的卫星。因此,高度角小于 10° 、信噪比低于 37 dB 的卫星均被排除。

2) BDS 系统含有 GEO 和 IGSO 卫星,根据卫星仰角对卫星进行分区,并按照 $[65^\circ \sim 90^\circ]$, $[30^\circ \sim 65^\circ]$, $[10^\circ \sim 30^\circ]$ 的规律将卫星分布区域划分为高、中、低 3 个高度角区域。

3) 从所有可见卫星中选择高度角最大的卫星作为第 1 颗卫星,选择高度角最小的卫星作为第 2 颗卫星,选择第 3 颗卫星时,分以下 4 种情况:

① 低高度角区域没有卫星时,在中高度角区域选择高度角最小和倒数第二小的两颗卫星,且两颗卫星的方位角差异大于 60° ;

② 在低高度角区域只有 1 颗卫星时,在中高度角区域选择高度角最小且方位角与第 2 颗卫星的差异大于 60° 的卫星作为第 3 颗卫星;

③ 在低高度角区域有 2 颗卫星时,在方位角差异大于 60° 的情况下,在低仰角区选择另一颗卫星作为第 3 颗卫星;

④ 在低高度角区域有 3 颗以上卫星时,选择与第 2 颗卫星方位角差最大的低高度角区域卫星作为第 3 颗卫星。

4) 基于前 3 个选择的卫星,从剩余卫星中根据式(6)选择具有最小 GDOP 的卫星作为第 4 颗卫星。

5) 在前 4 颗卫星的选择基础上,根据式(7)选择 GDOP 最小的第 5 和第 6 颗卫星。

3 数据采集与分析

本文实验采用国内某公司的 K 系列 OEM 板卡,具备 GPS/BDS 双模接收导航卫星信号的能力,同时可以实时输出信号的信噪比。接收机天线放置在 $(39.10^\circ \text{N}, 121.82^\circ \text{E})$ 位置。为验证本文改进的选星算法的有效

性,选择 2017 年 12 月 14 日 9:00 ~ 15:00 进行选星实验,数据采样间隔为 5 min,接收到的卫星个数在 15 ~ 20 颗之间,对这些可见卫星进行选择,并与最佳 GDOP 选星算法以及根据卫星仰角和方位角选星的算法 (Quasi-Optimal) 进行比较,来验证本算法的定位精度及定位的快速性和有效性。

首先,对这 3 种算法的计算量进行对比分析,如表 1 所示。

表 1 3 种选星算法的计算量比较

Table 1 Computation amount of three algorithms for satellite selection

选星算法	矩阵乘法	矩阵转置	矩阵求逆
最小 GDOP 算法	C_N^k	C_N^k	C_N^k
快速选星算法	$N - k$	$N - k$	0
本文算法	$C_N^{N-k-3-a}$	0	0

表 1 中,可见卫星总数为 N ,根据信噪比遮蔽掉的卫星数为 a ,选星数目为 k 。

从表 1 可以发现,对于最小 GDOP 算法,从 15 ~ 20 颗卫星中选择 5 颗卫星,需要进行 3003 ~ 15 504 次遍历计算,同时涉及到 $C_{15}^5 \sim C_{20}^5$ 次的矩阵求逆,严重增加了接收机的运算负载,虽然保证了误差最小,但是很难保证定位的实时性;而快速选星算法,针对卫星的仰角和方位角的分布,运用代价函数法^[9]排除方位角相近的卫星,但是定位结果误差较大,选择 6 颗卫星时,必定包含仰角最大和次大的卫星,同时也需要一颗仰角最小且信噪比大于 37 dB 的卫星,排除并选择出这些卫星之后,在剩下的卫星中进行遍历,同样的情况下,只需要进行 45 ~ 105 次遍历,大大减小了计算量,并保证了定位精度。

按照本文提出的改进的选星算法,在 GPS/BDS 双模接收机上进行验证,选星之前接收机接收到的卫星分布和选星后的卫星分布如图 1 所示。

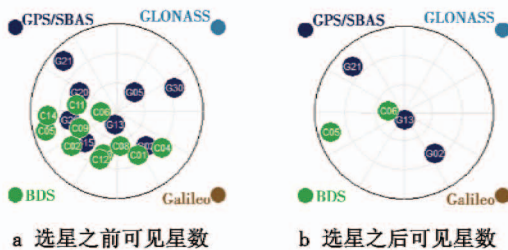


图 1 实验结果

Fig. 1 Experimental results

图 1 中:G 代表 GPS 卫星;C 代表北斗卫星。

通过卫星星历计算的卫星的高度角和方位角,并通过本文改进的 GDOP 计算方法,可以计算出几何分布因子 GDOP,通过 Matlab 计算可以得到 GDOP 的值,如图 2 所示。

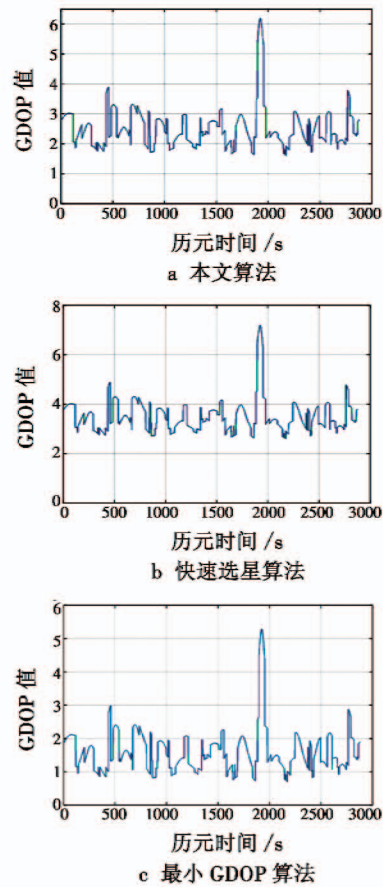


图 2 不同算法计算出的 GDOP 值

Fig. 2 GDOP values obtained by different algorithms

表 2 显示了不同选星算法的对比分析,包括平均值、方差和计算量的对比。可以看出:最小 GDOP 算法的平均值和方差最小,但是需要计算 3003 ~ 15 504 次矩阵求逆,计算量巨大;而快速选星算法虽然保证了选星的快速性,但是牺牲了定位精度;本文算法在保证快速性的同时,兼顾 GDOP 的计算,且不用求逆,使得定位精度有所保障。通过图 2a、图 2b、图 2c 的对比以及表 2 可以看出,本文算法兼顾了计算量和定位精度,能够在实时定位等定位动态要求较高的领域应用,在略微牺牲定位精度的情况下,保证定位实时性和鲁棒性。

需要说明的是,在历元时间 2000 s 左右的时间段内,实测数据的误差导致 GDOP 的计算存在很大的偏差,这在实际测量中是不可避免的。

表 2 不同选星算法的对比

Table 2 Comparison of different satellite selection algorithms

选星算法	GDOP 值		
	平均值	方差	计算量
最小 GDOP 算法	2.411 86	0.061 73	3003 ~ 15 504
快速选星算法	5.697 68	1.927 83	10 ~ 15
本文算法	3.304 15	0.235 09	105 ~ 190

4 结论

本文针对 GPS/BDS 双模卫星导航系统提出了一种改进的快速卫星选择算法,该算法有效地运用 GDOP 快速计算的优点,并对卫星的信噪比情况加以利用。实验结果表明,所提选星算法满足定位实时性、精度和鲁棒性的要求,在此基础上极大减少了 GDOP 的计算量,为多星座导航系统卫星选择提供了一个新方法。

参考文献

- [1] MENG F C, WANG S, ZHU B C. Research of fast satellite selection algorithm for multi-constellation [J]. Chinese Journal of Electronics, 2016, 25(6):1172-1178.
 - [2] 黄继拯,刘红,赵艳,等. GPS/北斗的组合选星算法研究[J]. 舰船电子工程,2011,31(8):81-83.
 - [3] KONG J H, MAO X C, SHAO Y. BDS/GPS satellite selection algorithm based on polyhedron volumetric method [C]//IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2014:340-345.
 - [4] 田安红,付承彪,董德春,等. 一种改进的选星算法在 GPS 定位系统中的应用[J]. 海军工程大学学报,2014,26(2):45-48.
 - [5] AZAMI H, SANEI S, ALIZADEH H. GPS GDOP classification via advanced neural network training[C]//International Conference on Contemporary Issues in Computer and Information Sciences, 2012. doi:10.13140/2.1.3368.5769.
 - [6] RANJBAR M, MOSAVI M R. Simulated annealing clustering for optimum GPS satellite selection [J]. International Journal of Computer Science Issues, 2012, 9(3):100-104.
 - [7] 刘帅,赵国荣,高超,等. GPS/北斗组合卫星导航系统快速选星算法[J]. 电光与控制,2017,24(3):32-35.
 - [8] 张文炳,刘以安,薛松,等. 北斗/GPS 卫星导航系统选星算法研究[J]. 计算机仿真,2016,33(5):84-87,130.
 - [9] 公才赫,茅旭初,李少远. 一种 BDS/GPS 双系统融合导航的快速选星方法[J]. 上海交通大学学报,2017,51(6):641-646.
 - [10] 谢钢. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京:电子工业出版社,2015.
 - [11] 张兆龙,王跃钢,腾红磊,等. 一种基于遗传算法和 BP 神经网络的选星方法[J]. 物探与化探,2017,41(5):946-950.
 - [12] MENG F, ZHU B, WANG S. A new fast satellite selection algorithm for BDS-GPS receivers [C]//SiPS Proceedings, 2013:371-376.
 - [13] 黄健,巴晓辉,刘海洋,等. 一种基于定位误差的多星座快速选星算法[J]. 科学技术与工程,2015,15(13):87-91.
 - [14] 冯彪,柴洪洲,潘宗鹏,等. 一种改进的组合导航系统选星算法[J]. 测绘工程,2018,27(2):26-31.
 - [15] DAN S, EL-SHERIEF H. Navigation satellite selection using neural networks [J]. Neurocomputing, 1995, 7(3):247-258.
 - [16] WEI M M, WANG J, YANG X B. An improved satellite selection algorithm [C]//The 11th International Conference on Signal Processing, IEEE, 2012:2258-2261.
-
- (上接第 48 页)
- [7] RONCAGLIOLO P A, GARCIA J G, MURAVCHIK C H. Pull-out probability and tracking threshold analysis for high dynamics GNSS carrier loops [C]//Proceedings of the 21th International Technical Meeting of the Satellite Division of the U. S. Institute of Navigation, 2008:221-228.
 - [8] 程乃平,任宇飞,吕金飞. 高动态扩频信号的载波跟踪技术研究[J]. 电子学报,2003,31(12A):2147-2150.
 - [9] 姜毅,张淑芳,胡青. 一种低复杂度 GPS 载波跟踪环路设计[J]. 电子学报,2010,38(12):2822-2826.
 - [10] HE Z, PETOVELLO M. Performance comparison of Kalman filter and maximum likelihood carrier phase tracking for weak GNSS signal [C]//International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), IEEE, 2015. doi:10.1109/IPIN.2015.7346959.
 - [11] WON J H, PANY T, ELSSFELLER B. Noniterative filter-based maximum likelihood estimators for GNSS tracking [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(2):1100-1114.
 - [12] 郇浩,陶选如,陶然. 多普勒频率变化率快速最大似然估计辅助的高动态载波跟踪环路[J]. 电子与信息学报,2014,36(3):577-582.
 - [13] PSIAKI M L, JUNG H. Extended Kalman filter methods for tracking weak GPS signals [C]//Proceedings of 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of the U. S. Institute of Navigation, 2002:2539-2553.
 - [14] 欧春湘,杨嘉伟,胡强. 基于卡尔曼滤波的锁频环改进算法[J]. 系统工程与电子技术,2014,36(12):2371-2375.
 - [15] TANG X H, FALCO G, FALLETTI E, et al. Theoretical analysis and tuning criteria of the Kalman filter-based tracking loop [J]. GPS Solutions, 2015, 19(3):489-503.
 - [16] MEHRABI H, VOOSOGHI B. Recursive moving least squares [J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2015, 58:119-128.