

多卫导组合系统的快速选星算法研究

金 玲, 黄智刚, 李 锐, 马颖莉

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 分析了多卫导组合系统几何精度因子(GDOP)与可见星仰角和方位角的关系, 并由此提出了一种适用于多卫导组合系统的快速选星算法, 首先提出了选星前后 GDOP 相对比值随选星数增加的负指数衰减模型, 使用户可根据对定位精度的具体需求实时确定所需次优星数, 其次基于可见星的仰角将所有可见星进行分类: 低仰角区、中仰角区和高仰角区, 最后通过可见星方位角的排序、作差, 给出了中仰角区被排除卫星的分布规律, 实现间接选星. 仿真结果表明, 该算法相对于传统的选星算法计算量大大减小, 并在损失约 12% 的 GDOP 值的情况下, 可有效减少近 50% 的导航运算量.

关键词: 全球导航卫星系统; 组合导航; 快速选星算法; 几何精度因子

中图分类号: TN96 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 09-1932-06

Study on Fast Satellite Selection Algorithm for Integrated Navigation

JIN Ling, HUANG Zhigang, LI Rui, MA Yingli

(School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the analysis of relationship between the geometry dilution of precision(GDOP) and satellite elevation as well as azimuth, a new fast satellite selection algorithm applicable to GNSS receiver was presented. In this algorithm, firstly the exponent attenuation model of relationship is built between pre and post GDOP and optimal satellites number, through which the number of selecting satellites was decided according to the precision of user's requirement. Then all visible satellites are classified by elevation into three sections: low elevation, medium elevation and high elevation. Finally parts of satellites in medium elevation section are excluded through sorting, differentiating to fulfill satellite selection. The computer simulations demonstrate that this method introduces much lower complexity compared to conventional algorithms, and decreases by about 50% the navigation computation with only 12% positioning accuracy descending.

Key words: global navigation satellite system(GNSS); integrated navigation; fast satellite selection algorithm; geometry dilution of precision(GDOP)

1 引言

目前世界上已经存在的两大全球卫星导航系统是美国 GPS 和俄罗斯的 GLONASS 系统, 正在建设中的有欧洲的 Galileo 系统和中国北斗二代系统, 多卫星导航系统组合导航在精度、完好性、可用性等方面性能明显优于单系统, 将成为今后发展的必然趋势. 由于多卫星导航系统的组合, 同一历元时刻可见星从单 GPS 的 8、9 颗上升到近 40 颗, 观测信息的增加使得定位精度、完好性、可用性等导航性能都有较大的改善. 但过多的冗余信息并不能太多地提高定位精度, 反而使导航解算运算量随之成几十倍增长, 严重影响导航定位解算的

实时性, 也提高了工程上对多系统接收机的通道数和处理速度的要求, 这会大大增加了接收机硬件设计难度和成本.

对此, 实时选择空间位置合适的卫星至关重要, 在保证选取卫星几何分布较优情况下, 减少过多冗余信息, 在定位精度和导航运算量之间均衡处理. 在 GPS 单系统中, 一般通过最小 GDOP 法^[1]或最大体积法^[2]选取 4 至 5 颗最优星进行定位. 而当将 GPS、GALILEO、GLONASS、北斗四系统进行组合导航时, 可见星数将增加到平均 35 颗左右, 由于要引入各系统间的钟差, 状态变量增加到 7 维, 即至少需要选出 7 颗可见星进行定位. 最佳选星法就需要进行 $C_{35}^m (m \geq 7)$ 次 GDOP 运算,

收稿日期: 20090327; 修回日期: 20090624

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国民用航空总局联合资助(No. 60672181); 国家 863 高科技研究发展计划(No. 2006AA12A108); 国家 863 高科技研究发展计划(No. 2006AA12A101)

占用的时间太长,而最大体积法由于涉及的卫星数目较多,计算量也很大且体积难以计算,因此组合系统很难利用传统的方法进行选星。

本文基于多卫导组合系统 GDOP 的分析,提出了一种新的快速选星算法,只对可见星仰角和方位角进行判断、筛选,间接选出多颗次优星,并对该算法进行了仿真验证。

2 多卫导组合系统 GDOP 的分析

多卫星导航组合导航并不是对现有 GPS 导航算法的机械扩展,它需要考虑各个系统的兼容性和互操作问题,其主要体现在不同参考坐标系和时间系统的统一及通道的硬件偏差等,目前基本已得到充分解决,见文献[3]。多卫导系统组合导航的工作流程如图 1 所示。本文在解算导航电文和时空统一的基础上,研究多卫导组合系统的快速选星算法,将所得次优星信息反馈到接收机通道以降低对通道数的要求,并送入定位解算模块,来有效减少导航运算量。

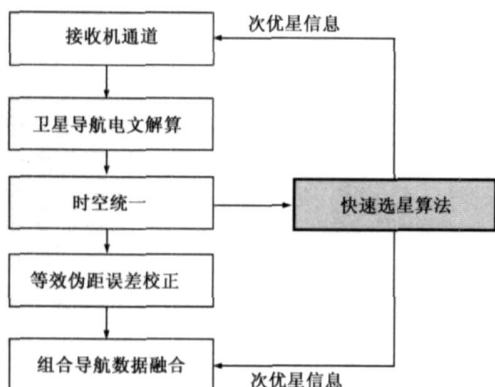


图1 多卫导组合导航工作流程

卫星导航在一定的测距误差下, GDOP 值表征了定位精度的大小,它反映了由于卫星几何关系的影响造成的伪距测量误差与用户位置误差间的比例系数,是对用户测距误差的放大程度,因此本文建立了多卫导组合系统的几何精度因子(GDOP)分析模型。

在 GNSS 系统中,精度可表示为几何精度因子和用户测距误差的乘积^[4],即:

$$R_A = \text{GDOP} \# R_{\text{USER}} \quad (1)$$

R_{USER} 为用户测距误差,取消 SA 后,电离层误差是卫星导航系统对定位精度影响最大的误差因素,电离层误差的大小跟卫星到用户的仰角和方位角密切相关,与系统无关,所以各个系统的单频测距误差的差异较小。本文为了不失一般性,采用和文献[5, 6]中的相同分析方法,假设各个系统的等效测距误差近似一致,则 GDOP 值的大小便表征了定位精度的大小。

考虑到几何精度因子是卫星/用户几何布局的函

数,组合系统的几何精度因子为:

$$\text{GDOP} = \sqrt{\text{trace}(\mathbf{H}_{\text{comb}}^T \mathbf{H}_{\text{comb}})^{-1}} \quad (2)$$

式(2)中 \mathbf{H}_{comb} 为 GPS/Galileo/GLONASS/北斗 (COMPASS) 组合系统的观测矩阵。

$$\mathbf{H}_{\text{comb}} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{\text{GPS}} & \mathbf{1}_{\text{GPS}} & \mathbf{0}_{\text{GPS}} & \mathbf{0}_{\text{GPS}} & \mathbf{0}_{\text{GPS}} \\ \mathbf{H}_{\text{Galileo}} & \mathbf{0}_{\text{Galileo}} & \mathbf{1}_{\text{Galileo}} & \mathbf{0}_{\text{Galileo}} & \mathbf{0}_{\text{Galileo}} \\ \mathbf{H}_{\text{GLONASS}} & \mathbf{0}_{\text{GLONASS}} & \mathbf{0}_{\text{GLONASS}} & \mathbf{1}_{\text{GLONASS}} & \mathbf{0}_{\text{GLONASS}} \\ \mathbf{H}_{\text{COMPASS}} & \mathbf{0}_{\text{COMPASS}} & \mathbf{0}_{\text{COMPASS}} & \mathbf{0}_{\text{COMPASS}} & \mathbf{1}_{\text{COMPASS}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3) \mathbf{H}_{CS} ($S = \text{GPS, Galileo, GLONASS, COMPASS}$) 为第 S 个系统的卫星观测矩阵 \mathbf{H} 的前 3 列,且 \mathbf{H}_{CS} 为 $k \times 3$ 维的矩阵, $\mathbf{0}_S$ 、 $\mathbf{1}_S$ 分别表示 $k \times 3$ 维的矩阵, k 为每个系统的可见星数。则 \mathbf{H}_{CS} 的第 i 列表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{\text{CS}} &= (\mathbf{e}_x \quad \mathbf{e}_y \quad \mathbf{e}_z) \\ &= (\cos \text{EL}_i \sin A_i \quad \cos \text{EL}_i \cos A_i \quad \sin \text{EL}_i) \end{aligned} \quad (4)$$

$i = 1, 2, \dots, k$ 为每个系统的可见星编号。

设第 i 颗可见星在当地用户水平坐标系下的位置为 (x_{Li}, y_{Li}, z_{Li}) , 则该卫星的仰角 EL_i 、方位角 A_i 分别为:

$$\text{EL}_i = \tan^{-1} \left(\frac{z_{Li}}{\sqrt{x_{Li}^2 + y_{Li}^2}} \right) \quad (5)$$

$$A_i = \tan^{-1} \left(\frac{x_{Li}}{y_{Li}} \right) \quad (6)$$

可见多卫导系统的 GDOP 值只与可见星的仰角和方位角有关,可通过可见星的仰角和方位角的分布规律选出一组次优分布的可见星。

3 快速选星算法

选星的第一步便是确定选取卫星数,本算法设计为在定位精度和导航运算量之间均衡处理,基于用户对组合系统定位精度的要求实时确定所需选取次优星的数目。

3.1 GDOP 相对比值与选星数的负指数衰减模型

本文根据多卫导组合系统选星前后 GDOP 值的变化情况确定所需选取的次优星数。由各系统星历参数建立 GPS/Galileo/GLONASS/北斗组合系统仿真平台,遮蔽角设为 5° , 北京地区最小 GDOP 法选星前后 GDOP 值随选星数 m 增加的变化情况如表 1, 该历元时刻 $t = 12\text{h}$, 总的可见数 $K = 33$, 组合系统的 GDOP 值为 1142。西安地区选星前后 GDOP 值随选星数 m 增加的变化情况如表 2, 历元时刻为 $t = 4\text{h}$, 总的可见数 $K = 29$, 组合系统的 GDOP 值为 1158。表 1、2 中的选星比值为选星数 m 与总可见星数 K 的比值, SGDOP 为选星前后 GDOP 相对比值。

由表 1 和表 2 可见,多卫导系统的 GDOP 随着选星

数目的增加而减小,但二者并不成线性关系,当选星数较小时, GDOP 值下降得较快,当选星数目过多时(选星比值大于 0.85), GDOP 值变化很缓慢,并不能提高太多的定位精度.这与文献[7]结论一致.由此猜想选星前后 GDOP 相对比值 \overline{GDOP} 随所选定位卫星数目 m 增加逼近负指数衰减规律,假设其模型如下:

$$\overline{GDOP} = k_1 \exp(-k_2 * m) + k_3 \tag{7}$$

式(7)中系数 k_1 、 k_2 、 k_3 与导航系统和总可见数有关,当四大卫星导航系统完全建成时,可根据大量先验实测数据确定.

表 1 北京地区选星前后 GDOP 值与选星数 m 的变化关系

选星比值	0.25	0.35	0.45	0.55	0.65	0.75	0.85	0.95
选星数 m	8	12	15	18	21	25	28	31
GDOP 值	2.53	2.02	1.76	1.63	1.56	1.50	1.46	1.43
\overline{GDOP}	0.79	0.43	0.24	0.15	0.10	0.05	0.03	0.01

表 2 西安地区选星前后 GDOP 值与选星数 m 的变化关系

选星比值	0.25	0.35	0.45	0.55	0.65	0.75	0.85	0.95
选星数 m	7	10	13	16	19	22	25	28
GDOP 值	2.93	2.32	2.03	1.86	1.76	1.68	1.63	1.59
\overline{GDOP}	0.85	0.47	0.28	0.17	0.11	0.06	0.03	0.01

本文通过最小 GDOP 法对 24h 不同时刻不同用户的遍历仿真,对大量数据进行统计分析,得到式(7)的一种确定模型如下:

$$\overline{GDOP} = K / 8.5 * \exp(-0.2 * K * p(1 - 0.15p))$$

$$p = m / K, \quad 0.25 \leq p \leq 0.85 \tag{8}$$

式中, m 为选星数目, p 为选星比值, K 为总的可见星数. 并对该模型进行了验证,如图 2,模型仿真结果与最小 GDOP 法得到的仿真数据吻合,因此用户可通过该模型按照定位精度的需求实时确定选星数,最大误差不超过 2 颗星,对定位结果不会有较大影响.

由 \overline{GDOP} 模型及图 2 知,选星数目较少时,牺牲了太多的定位精度,严重降低了组合系统的导航性能.下文研究的选星算法是在保证损失较少的定位精度的前

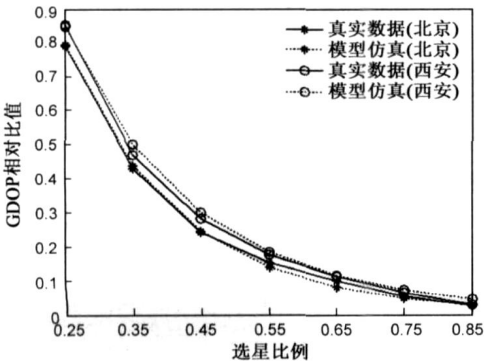


图2 模型数据与仿真数据比较

提下,所需选星数目不能少于 60% 总可见星.

3.1.2 快速选星算法准则

为了达到对组合系统的性能要求,所需选出的可见星数目仍然较多.若按照传统的思维方式,通过找出所选星的分布规律以实现选星,会加大选星算法的复杂度.因此本文采用逆向思维方式,通过分析数目相对较少的被排除卫星的仰角和方位角的分布规律,确定对冗余卫星的排除方法,保留分布次优星,从而实现间接选星.四星座组合导航,遮蔽角设为 $3b$,仿真时间 $t=12h$ 时得出的北京地区某用户的可见星方位角/仰角图,见图 3.

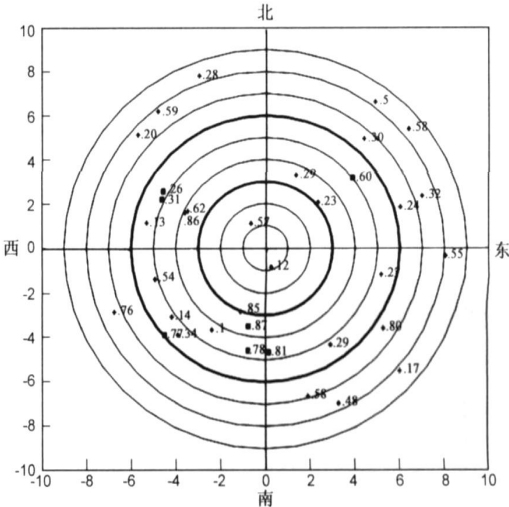


图3 用户可见星方位/仰角图

图 3 中,对各个系统的卫星进行编号为, GPS: 124, GLONASS: 25248, GALILEO: 49275, 北斗: 76287. 用正方形标出的卫星是采用最小 GDOP 法所排除的 20% 可见星. 由图 3 的排除星在整体中的分布情况及遍历设置的任意时刻、任意用户位置的仿真结果均表明: 排除星均处于 $3b \sim 6b$ 仰角范围内,且有一个或多个方位角邻近的其它星. 由最大体积法原理知,所选择的定位卫星到用户的单位矢量组成的体积 V 应尽可能接近所有卫星和用户的单位矢量组成的多面体体积,因此对处于仰角 $3b \sim 6b$ 范围内的可见星而言,如果其中某两颗卫星的方位角较接近,再结合整体可见星仰角分布信息,排除其中的一颗,对所有卫星和用户所组成的多面体体积影响会很小,因而可以保证获得次优的 GDOP 值.

通过以上对多卫星系统 GDOP 模型的仿真及分析,可以得出如下快速选星准则:

(1) 基于多卫星系统 GDOP 相对比值随选星数增加的负指数衰减模型,根据用户对组合卫星导航系统定位精度要求确定所需选取的次优星数 m .

(2) 将可见星的仰角划分为三个区域: $0b \sim 3b$ 、 $3b \sim 6b$ 、 $6b \sim 9b$, 分别称为低仰角区、中仰角区和高

仰角区,并计算出高仰角区和低仰角区的卫星数目 k_1 、 k_2 及其比例,得到整体可见星仰角的分布信息。

(3)在中仰角区可见星中,对其方位角进行排序,计算出前后两颗卫星的方位角之差,再对方位角的差值进行从小到大排序,选择出方位角差值最小的前 $K/2$ 组卫星,每组中有两颗卫星。

(4)最后依据 k_1 、 k_2 的比例关系,排除中仰角区中方位角邻近的两颗卫星中的一颗。根据本文的先验实验统计,遮蔽角设为 5° 时,高仰角区卫星和低仰角区卫星的平均数目比 $k_1/k_2 \approx 1.5$ (假设卫星分布均匀,该结论和高仰角区球冠的侧面积与低仰角区球台的侧面积比是一致的)。若某时刻 $k_1/k_2 < 1.5$,则选择每组中偏高仰角卫星,排除偏低仰角卫星,补充高度方向信息;反之,选择偏低仰角卫星,补充水平方向信息。

(5)最终得出被排除卫星的编号,并以此得出选取的次优星编号,实现间接选星。

此快速选星算法的具体流程图如图 4。

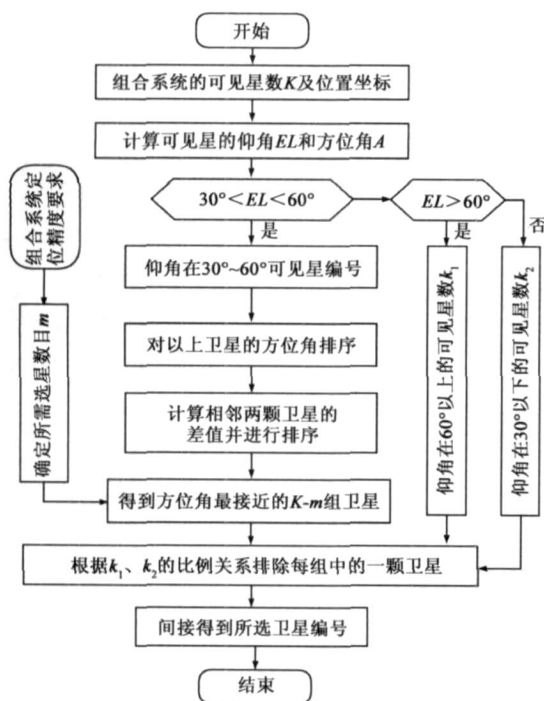


图4 快速选星算法流程图

4 仿真实验及结果分析

基于 GPS/Galileo/GLONASS/北斗组合系统的仿真平台,验证该算法的可行性和稳定性,及其在降低较少GDOP的情况下对导航运算量的减少情况。

4.1 快速选星算法 GDOP 的仿真

依据 RTCA DO229D 的标准^[9],遮蔽角设为 5° ,用户分别选用北京、厦门地区,对快速选星算法选星前后的 GDOP 进行仿真,仿真时间为 24h 时间间隔 60s,仿真

结果见图 5~8。

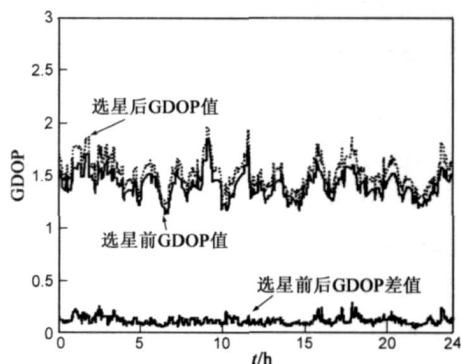


图5 选取80%次优星时GDOP曲线（北京）

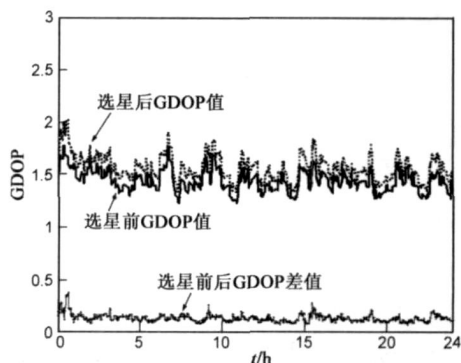


图6 选取80%次优星时GDOP曲线（厦门）

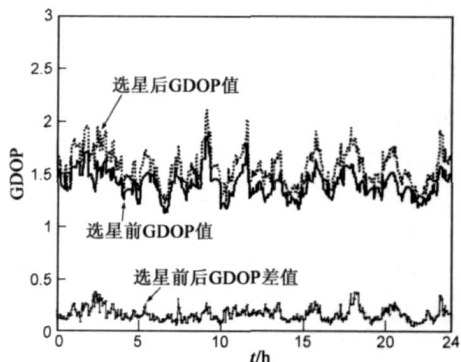


图7 选取70%次优星时GDOP曲线（北京）

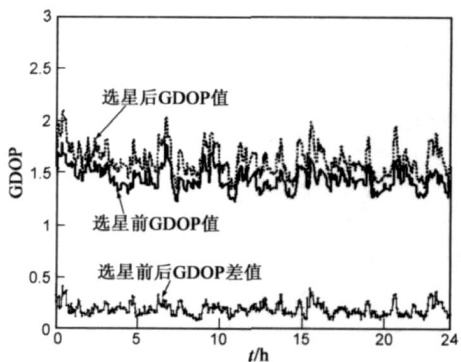


图8 选取70%次优星时GDOP曲线（厦门）

图 5、6 是北京、厦门地区采用快速选星算法选取 80% 次优星后 GDOP 值的变化情况,表 3 是对其进行统

计分析。

北京、厦门地区利用快速选星算法选取 70% 次优星后 GDOP 的变化情况见图 7、8, 表 4 是对其进行统计分析。

表 3 选取 80% 次优星的 GDOP 值统计分析

地区		GDOP			
		最小值	最大值	均值	方差
北京	选星前	1. 129	1. 847	1. 408	0. 123
	选星后	1. 212	1. 966	1. 521	0. 142
	差值	0. 050	0. 285	0. 113	0. 035
厦 门	选星前	1. 220	1. 778	1. 441	0. 104
	选星后	1. 314	2. 008	1. 565	0. 125
	差值	0. 068	0. 323	0. 117	0. 037

表 4 选取 70% 次优星的 GDOP 值统计分析

地区		GDOP			
		最小值	最大值	均值	方差
北京	选星前	1. 129	1. 847	1. 408	0. 123
	选星后	1. 221	2. 112	1. 567	0. 163
	差值	0. 050	0. 364	0. 158	0. 061
厦 门	选星前	1. 220	1. 778	1. 441	0. 104
	选星后	1. 343	2. 091	1. 623	0. 141
	差值	0. 078	0. 403	0. 182	0. 057

从图 5~ 8 结果曲线、表 3~ 4 可得出以下结论:

(1) 快速选星算法选取 80% 可见星, 北京地区选星前后 GDOP 值平均增大了 8%, 厦门地区选星前后 GDOP 值平均增大了 81 1%。

(2) 快速选星算法选取 70% 可见星, 北京地区选星前后 GDOP 值平均增大了 111 2%, 厦门地区选星前后 GDOP 平均增大了 121 1%。

(3) 与上文的 \$GDOP 模型相比, 该算法选星后的 GDOP 值比最小 GDOP 仅增大了近 2%, 但算法自身的计算量相对于传统的选星算法可忽略。

(4) 选星后各个地区任意时刻 GDOP 变化值都比较稳定, 证明了算法的可行性及鲁棒性。

本文在其它地区的用户仿真也证实了以上结论, 下文在此基础上讨论导航定位解算计算量的减少情况。

412 导航运算量的统计分析

导航定位的观测方程为:

$$y=Hx+E \tag{9}$$

其中 $H \in R^{K \times n}$ 为量测矢量, $x \in R^n$ 为用户状态矢量, $E \in R^K$ 为系统量测误差, $y \in R^K$ 为观测矢量, K 为可见星数, n 为状态变量维数。

若用户选用最小二乘方法进行定位, 公式^[8]为:

$$\hat{x}=(H^TH)^{-1}H^Ty \tag{10}$$

对于追求高精度定位的用户可选用加权最小二乘法, 其定位解算公式^[8]为:

$$\hat{x}=(H^TWH)^{-1}H^TWy \tag{11}$$

其中 $W \in R^{K \times K}$ 为加权因子, 其值:

$$W=\begin{bmatrix}R_1&0&&0\\0&R_2&&0\\s&s&w&0\\0&0&0&R_K\end{bmatrix}^{-1} \tag{12}$$

式(12)中, $R_i(i=1,2,\dots,K)$ 为各颗可见星的测距误差, 由于电离层是导航系统中影响最大的误差因素, 且其和卫星的仰角和方位角密切相关, 将卫星测距误差分为电离层残差 S_{iono} 和其他误差 S_{other} , 即:

$$R_i^2=S_{iono}^2+S_{other}^2 \tag{13}$$

电离层误差可通过对广域差分系统(WASS)提供的网格点电离层垂直改正误差(GIVE)进行计算, 导航系统的其他误差可以根据其定位服务性能标准和接口控制文档确定^[9]。

考虑到组合系统有 7 维状态变量, $n=7$, 总的平均可见星数 $K \in [35]$ 。据上节仿真, 当快速选星算法选取 70% 可见星时, $m=24$ 。用户选用最小二乘算法或加权最小二乘法定位解算(假设迭代 50 次)的计算量统计如表 5。

表 5 选星前后导航运算量的统计

计算量		浮点加	浮点乘	浮点除
最小二乘	选星前	170500	185550	2450
	选星后	116600	127800	2450
	减少量	31. 6%	31. 1%	0
加权最小二乘	选星前	1003500	1043350	2450
	选星后	503000	531300	2450
	减少量	49. 9%	49. 1%	0

可见, 此时若用户选用加权最小二乘定位, 浮点加相对减少 49 19% 计算量, 浮点乘相对减少 49 11%, 而 GDOP 值仅增大了 12% 左右。

5 结论

通过对组合系统定位精度和导航运算量的综合分析, 本文提出了一种适用于大卫星数的选星算法, 基于组合系统 GDOP 分析模型及可见星仰角、方位角的分布, 给出了选星规则和算法流程, 仿真结果表明, 算法准确、稳定, 以较少的定位精度损失换取导航运算量的大幅度减少。采用此算法不仅能降低多系统接收机对处理器速度的要求, 提高了高动态用户的实时性, 更降低接收机的捕获跟踪通道数及成本, 对多系统接收机的开发具有参考价值。

参考文献:

[1] 白雅庆, 陈栋. 卫星导航精度因子的计算及选星方法[J]. 导航, 2006, 42(3): 88- 94.

- Bai Yaqing, Chen Dong. The computation of GDOP and satellite selecting algorithm[J]. Navigation, 2006, 42(3): 88-94. (in Chinese)
- [2] 言中, 丁子明. 卫星无线电导航[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989. 227-231.
Yan Zhong, Ding Ziming. Satellite Wireless Navigation[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1989. 227-231. (in Chinese)
- [3] Alexei E. Zinoviev. Using GLONASS in combined GNSS receivers: current status[A]. ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division[C]. Long Beach: The Institute of Navigation, 2005. 1046-1057.
- [4] Pratap Misra, Per Enge, 罗鸣等译. 全球定位系统))) 信号、测量和性能(第二版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008. 112-139.
- [5] Yongchao Wang. FDE and positioning performance in a multi-fault scenario using GPS and Galileo[A]. ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division[C]. Long Beach: The Institute of Navigation, 2005. 1772-1780.
- [6] Ronald Braff, Integrated GNSS/ALTIMETER landing system[A]. ION GNSS 20th International Technical Meeting of the Satellite Division[C]. Fort Worth: The Institute of Navigation, 2007. 2034-2049.
- [7] 张强, 张晓林等. 组合卫星接收机中的选星算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(12): 1424-1427.
Zhang Qiang, Zhang Xiaolin. Satellite selection algorithm for combined satellite receivers[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(12): 1424-1427. (in Chinese)
- [8] Elliott D. Kaplan, Christopher J. Hegarty. Understanding GPS Principles and Applications[M]. Second Edition. London: Artech House, 2006. 325-333.
- [9] RTCA DO-229D, Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment[S].

作者简介:



金玲女, 1985年8月生于安徽安庆, 北京航空航天大学通信与信息系统专业硕士研究生, 主要从事卫星组合导航、多传感器组合导航、信息融合技术等研究。
Email: lingj07@163.com



黄智刚男, 1962年生于河北邢台, 北京航空航天大学教授、博士生导师, 从事无线电导航、卫星导航应用、自动测试技术和故障诊断、航空电子等方面的教学与研究。
Email: baahzg@163.com

李锐男, 1976年生, 博士后, 主要从事无线电导航、卫星导航及组合导航等研究。

马颖莉女, 1983年生, 硕士研究生, 主要从事卫星组合导航、完好性监测等研究。