

卫星导航几何因子的分析和仿真

丛 丽, Ahmed I Abidat, 谈展中
(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 根据卫星导航几何因子 GDOP 在具体课题中的应用, 从五个主要方面对其进行了研究, 可知不同星座配置参数对不同纬度地区 GDOP 会产生影响; 坐标转换时 GDOP、PDOP 和 TDOP 不变, HDOP、VDOP 变化; GDOP 随卫星数目增加单调递减, 但递减幅度变小; 卫星对 GDOP 贡献越大, 其故障产生的定位误差越大; 使用加权 GDOP 可有效的减小定位误差。

关键词: 卫星导航; DOP; 星座配置参数; 定位精度; 加权 GDOP

中图分类号: TN967.1 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2006)12-2204-05

Analysis and Simulation of the GDOP of Satellite Navigation

CONG Li, Ahmed I Abidat, TAN Zhanzhong

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

Abstract: Based on the application of Geometry Dilution of Precision (GDOP), 5 main aspects of GDOP are studied. It is concluded that different constellation parameters influence GDOP of different latitude. GDOP, PDOP and TDOP are not changed but HDOP and VDOP are changed by coordinate conversion. GDOP decreases along with the number of satellites, but the decreasing extent reduces too. The more a satellite contributes to GDOP, the more the positioning error it produces when it has fault. Using weighted GDOP reduces the positioning error effectively.

Key words: satellite navigation; dilution of precision; constellation deploy parameter; precision of positioning; weighted GDOP

1 引言

卫星导航系统已应用于飞机、舰船和车辆定位导航, 授时和守时, 大地和大气测量等领域。几何因子(GDOP)表征用户和可见卫星在空间几何分布的好坏。本文结合 GDOP 在卫星星座检验、完好性监测技术、飞机精密着陆以及战术信息系统(TIS)相对定位等方面的应用, 对 GDOP 进行了比较全面的研究, 列出了 GDOP 的定义和几何意义, 分析了星座配置参数、坐标系、卫星数目和一颗卫星对 GDOP 的影响以及加权 GDOP, 给出相关的结论。

2 GDOP 的定义及其几何意义

GDOP 包括位置、水平、垂向和时间精度衰减因子(PDOP、HDOP、VDOP 和 TDOP)四个参数, 这 5 个 DOP 分别表示定位定时总误差 σ_g 、位置误差 σ_p 、水平位置误差 σ_h 、垂直位置误差 σ_v 和时钟误差 σ_t 对测距误差 σ 的放大倍数, 即:

$$\begin{aligned} GDOP &= (g_{11} + g_{22} + g_{33} + g_{44})^{1/2} = \sigma_g / \sigma \\ PDOP &= (g_{11} + g_{22} + g_{33})^{1/2} = \sigma_p / \sigma \\ HDOP &= (g_{11} + g_{22})^{1/2} = \sigma_h / \sigma \\ VDOP &= (g_{33})^{1/2} = \sigma_v / \sigma \\ TDOP &= (g_{44})^{1/2} = \sigma_t / \sigma \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $g_{ii} (i = 1, \dots, 4)$ 是 $G = (H^T \cdot H)^{-1}$ 的对角线元素, H 是观

测矩阵。

卫星导航系统至少要有 4 颗卫星来进行定位计算, 典型情况采用 4 星定位, 此时 GDOP 还可表示为^[1]:

$$|GDOP| = \left| \frac{[\text{Trace} H^* (H^T)]^{1/2}}{6V} \right| = \frac{A^{1/2}}{6} \frac{1}{V} \quad (2)$$

其中 H^* 是 H 的伴随矩阵, V 是用户到卫星的单位矢量末端四点联成的四面体体积。采用更多星定位的情况类似, 只是公式较为复杂。

由式(2)可知随 V 的增大 GDOP 将减小, 虽然 A 也随之变化, 但变化较小。当 V 达到最大时 GDOP 最小, 由于正四面体的体积最大, 可知一颗卫星在用户头顶, 另外三颗星在用户与地面相切平面上的投影互隔 120° , 卫星仰角等于接收机屏蔽角, 这四颗卫星与用户的相对几何位置最佳。

3 星座配置参数对 GDOP 的影响

卫星星座是指所有导航卫星在空间的拓扑结构, 主要考虑的星座配置参数有轨道数、轨道面倾角 i 和轨道上的卫星数。为分析每个参数对 GDOP 的影响, 假设基准星座有 24 颗卫星, 6 个近圆轨道, 各轨道面升交点赤经均匀分布, 卫星在轨道上均匀分布, $i = 55^\circ$, 相邻轨道上相应两卫星近点角的夹角为 15° , 卫星运行周期 12 小时, 轨道半径 26400 千米, 接收机屏蔽角 7.5° 。观测时间取 24 小时, 1 分钟采样一次。在地理坐标系下, 得到地球表面 6 个不同观测点的 GDOP 值和可见星

统计数据如表 1 所示.

表 1 基准星座配置的 GDOP 和可见星数据

用户位置 (E, N)	GDOP		可见星数	
	最大值	≤3 的百分比	平均值	≥8 的百分比
116°, 0°	2.56	100%	8.18	86.6%
116°, 20°	2.94	100%	7.44	39.2%
116°, 40°	3.40	87.6%	7.05	22.2%
116°, 60°	4.81	78.1%	7.90	69.3%
116°, 80°	4.75	82.7%	8.42	82.7%
116°, 90°	2.75	100%	8.50	100%

3.1 轨道数对 GDOP 的影响

24 颗星, 轨道数变为 3 个, $i = 55^\circ$, 其他条件不变, 得到相应数据如表 2 所示.

表 2 改变轨道数的星座配置的 GDOP 和可见星数据

用户位置 (E, N)	GDOP		可见星数	
	最大值	≤3 的百分比	平均值	≥8 的百分比
116°, 0°	3.08	98.6%	8.26	95.5%
116°, 20°	3.72	95.7%	7.52	52.9%
116°, 40°	2.83	100%	7.19	43.9%
116°, 60°	2.94	100%	7.90	74.6%
116°, 80°	4.04	85.9%	8.42	85.9%
116°, 90°	2.72	100%	8.50	100%

卫星总数不变, 轨道数减少, 则每条轨道上的卫星数增多, 不同纬度地区可见卫星数会有一些改善. 表 2 数据显示不小于 8 颗可见星的百分比在不同纬度地区均提高; GDOP 的变化与纬度有关, 低纬地区 GDOP 变得稍差, 最大值超过 3; 中高纬尤其是中纬地区 GDOP 改善明显, 最大值小于 3, 但在极区变化很小.

3.2 轨道面倾角对 GDOP 的影响

24 颗星, 6 条轨道, 改变轨道面倾角 $i = 65^\circ$, 统计数据如表 3 所示.

表 3 改变的星座配置的 GDOP 和可见星数据

用户位置 (E, N)	GDOP		可见星数	
	最大值	≤3 的百分比	平均值	≥8 的百分比
116°, 0°	5.37	89.1%	7.37	48.7%
116°, 20°	9.87	76.2%	7.24	39.9%
116°, 40°	4.26	75.0%	7.43	53.5%
116°, 60°	4.15	77.5%	8.48	77.5%
116°, 80°	4.03	95.2%	8.79	95.2%
116°, 90°	2.50	100%	8.83	100%

轨道面倾角增大, 高纬地区可见星数和卫星的几何特性将变好, 低纬地区则会变差. 由表 3 可知低纬地区尤其是赤道附近可见卫星数不小于 8 的百分比减少, 中高纬地区则明显提高. 中低纬地区 GDOP 变差, 最大值增大, 特别是低纬地区, 在特殊纬度(北纬 20°) 还出现 GDOP 很差的情况, 据统计占总仿真时间的 1.1%, 虽然是短暂的现象, 设计星座时还是要加以排除; 高纬地区的 GDOP 有所改善, 最大值变小.

3.3 轨道上的卫星数对 GDOP 的影响

30 颗星, 6 条轨道, 每条轨道 5 颗卫星, $i = 55^\circ$, 相应数据如表 4 所示.

表 4 改变卫星数的星座配置的 GDOP 和可见星数据

用户位置 (E, N)	GDOP		可见星数	
	最大值	≤3 的百分比	平均值	≥8 的百分比
116°, 0°	2.62	100%	10.31	100%
116°, 20°	2.70	100%	9.32	97.1%
116°, 40°	3.26	98.4%	8.89	99.7%
116°, 60°	2.94	100%	9.88	100%
116°, 80°	3.80	83.4%	10.53	100%
116°, 90°	2.95	100%	10.62	100%

轨道上卫星数增加, 卫星总数也增加, 不同纬度地区的可见卫星数和 GDOP 均会有所改善. 表 4 中数据显示, 不同纬度地区的可见星数增加, 不小于 8 的百分比明显提高, GDOP 不大于 3 的百分比增大.

GPS, GLONASS 和 Galileo 是三个主要的全球卫星导航定位系统, 它们的主要星座配置参数^[2]如表 5 所示, 为验证上述结论, 仿真得到相应星座配置下的 GDOP 和可见星统计数据如表 6 和表 7 所示.

表 5 三个卫星导航定位系统的主要星座配置参数

	轨道数	i	轨道上的卫星数
GPS	6	55°	4
GLONASS	3	64.8°	8
Galileo	3	56°	10

表 6 三种卫星导航系统星座配置的 GDOP 数据

用户位置 (E, N)	GDOP					
	GPS		GLONASS		Galileo	
	最大值	≤3 的百分比	最大值	≤3 的百分比	最大值	≤3 的百分比
116°, 0°	2.98	100%	4.89	72.2%	2.45	100%
116°, 20°	4.39	85.8%	4.64	79.5%	3.28	99.2%
116°, 40°	5.62	79.3%	4.46	87.2%	2.58	100%
116°, 60°	5.23	79.0%	3.84	93.7%	2.59	100%
116°, 80°	4.74	71.0%	3.64	96.2%	2.86	100%
116°, 90°	4.35	93.8%	2.72	100%	2.54	100%

表 7 三种卫星导航系统星座配置的可见星数据

用户位置 (E, N)	GDOP					
	GPS		GLONASS		Galileo	
	最大值	≤3 的百分比	最大值	≤3 的百分比	最大值	≤3 的百分比
116°, 0°	8.27	76.0%	7.51	47.3%	10.6	100%
116°, 20°	7.48	44.9%	7.11	39.6%	9.58	94.3%
116°, 40°	7.10	30.4%	7.36	53.0%	9.26	91.9%
116°, 60°	7.93	71.6%	8.43	94.3%	10.4	100%
116°, 80°	8.44	77.0%	8.74	96.2%	10.9	100%
116°, 90°	8.50	93.9%	8.77	100%	11.0	100%

分析表 6 和表 7 中数据可知, GPS 低纬度覆盖较好, GLONASS 中高纬度较好, 而 Galileo 系统建成后, 可见星数、不同纬度的覆盖以及 GDOP 均比前两个系统有一定程度的改善. 通过仿真分析可知其他 DOP 也将得到改善. 因此 Galileo 系统的全球覆盖面更广, 导航定位精度更高.

4 不同坐标系下的 DOP

DOP 通常是在地心地固(ECEF)坐标系中计算的, 表示 E-

CEF 坐标系中的定位误差因子,但地球上的用户常要确定其在某一特定坐标系中的位置及位置误差,例如地理坐标系、机场跑道坐标系,这种情况下,DOP 表示的定位误差因子与用户的定位误差不对应,作为选星依据的 DOP 是否需要转换到定位所在的坐标系中,因此要分析不同坐标系下 DOP 之间的关系。

根据第 2 小节中给出的 G 的表达式,得到地理坐标系下的 G_e 与 ECEF 坐标系下的 G_c 之间的关系式为:

$$G_e = (H_g^T \cdot H_g)^{-1} = T_c^e (H_c^T \cdot H_c)^{-1} T_c^{eT} = T_c^e G_c T_c^{eT} \quad (3)$$

其中 T_c^e 是用户状态由 ECEF 坐标系到地理坐标系的转换矩阵,它是一个正交矩阵,可以表示为:

$$T_c^e = \begin{bmatrix} C_e^e & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中 C_e^e 是用户位置矢量的转换矩阵,它也是一个正交矩阵,可表示为:

$$C_e^e = \begin{bmatrix} -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ -\sin L \cos\lambda & -\sin L \sin\lambda & \cos L \\ \cos L \cos\lambda & \cos L \sin\lambda & \sin L \end{bmatrix}$$

其中 λ, L 为用户的经纬度。

将 T_c^e 代入式(3)计算出 G_g 的对角线元素,根据(1)式把与不同 DOP 相关的元素相加后,和 G_e 的对应值相比较可得:

$$\begin{aligned} g_{11}^e + g_{22}^e + g_{33}^e + g_{44}^e &= g_{11}^c + g_{22}^c + g_{33}^c + g_{44}^c \\ g_{11}^e + g_{22}^e + g_{33}^e &= g_{11}^c + g_{22}^c + g_{33}^c \\ g_{11}^e + g_{22}^e &\neq g_{11}^c + g_{22}^c \\ g_{33}^e &\neq g_{33}^c \quad g_{44}^e = g_{44}^c \end{aligned} \quad (4)$$

由式(4)可知,在两个坐标系下,GDOP、PDOP 和 TDOP 相同,而 HDOP 和 VDOP 不同。

一般而论,坐标转换包括平移和旋转,平移不会改变 DOP 的值,而旋转对应的矩阵是正交矩阵,因此 GDOP、PDOP 和 TDOP 具有不变性,HDOP 和 VDOP 则会变化.在实际定位过程中,如果是 HDOP 或 VDOP 作为选星依据,主要考虑水平或垂向的定位精度,就应该在定位所在的坐标系中计算 HDOP 或 VDOP,而其它 DOP 对坐标系没有限制。

5 卫星数目及一颗卫星对 GDOP 的影响

5.1 卫星数目对 GDOP 的影响

从可见卫星中选择参加导航定位计算的卫星数目不同,GDOP 的取值也不相同,GDOP 与卫星数目之间有一定的变化规律。

设 H_m 为选择 m 颗卫星定位时的观测矩阵,从 m 颗卫星中去掉第 i 颗星($i = 1, \dots, m$),得到 $m-1$ 颗卫星的观测矩阵 H_{m-1}^i ,两者有如下关系:

$$H_m^T H_m = H_{m-1}^{iT} H_{m-1}^i + h_i^T h_i \quad (5)$$

其中 $h_i = [e_{i1} \ e_{i2} \ e_{i3} \ 1]$ 为第 i 颗星的观测矢量。

由 Sherman Morrison 公式可得:

$$\begin{aligned} G_{m-1}^i &= (H_{m-1}^{iT} H_{m-1}^i)^{-1} = (H_m^T H_m - h_i^T h_i)^{-1} \\ &= G_m + G_m h_i^T (1 - h_i G_m h_i^T)^{-1} h_i G_m \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $(1 - h_i G_m h_i^T)$ 是一标量,记为 S_{ii} ,因此有:

$$\begin{aligned} GDOP_{m-1}^i &= \text{trace} G_{m-1}^i = \text{trace} G_m + \text{trace} \left(\frac{G_m h_i^T h_i G_m}{S_{ii}} \right) \\ &= GDOP_m^2 + \text{trace} \left(\frac{G_m h_i^T h_i G_m}{S_{ii}} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

去掉一颗卫星后的 $GDOP_{m-1}^i$ 比 $GDOP_m^2$ 多出一项,为确定 $\text{trace} \left(\frac{G_m h_i^T h_i G_m}{S_{ii}} \right)$ 的正负,将 H_{m-1}^i 进行奇异值分解得到:

$$H_{m-1}^i = U S V^T \quad (8)$$

其中 U 和 V 分别为 $(m-1) \times (m-1)$ 和 4×4 的正交矩阵, S 是 $(m-1) \times 4$ 对角线矩阵。

将式(8)代入式(5),并将等式两边进行相同的正交变换^[3,4],再使用 Sherman Morrison 公式得出:

$$\begin{aligned} \{ V^T (H_m^T H_m) V \}^{-1} &= \{ V^T (U S V^T)^T U S V^T \}^{-1} = \{ V^T h_i^T h_i V \}^{-1} \\ &= (Z + W^T)^{-1} = Z^{-1} - \frac{1}{1 + U^T Z^{-1} U} \\ &\quad \cdot Z^{-1} W^T Z^{-1} \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $Z = S^T S = \text{diag}(z_{11}, z_{22}, z_{33}, z_{44})$, $U = V^T h_i^T = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4]^T$ 。

正交变换不改变矩阵的迹,于是可得:

$$\begin{aligned} \text{trace}((H_{m-1}^{iT} H_{m-1}^i)^{-1}) &= \text{trace}(Z^{-1}) = \text{trace}\{ (V^T (H_m^T H_m) \\ &\quad V)^{-1} \} + \text{trace}(k U_2 U_2^T) \\ &= \text{trace}((H_m^T H_m)^{-1}) + \text{trace} \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $U_2 = Z^{-1} U$, $\text{trace}(k U_2 U_2^T) = k \sum_{i=1}^4 \left(\frac{U_i}{z_{ii}} \right)^2 \equiv q > 0$, $k = 1/(1 + \sum_{i=1}^4 \frac{U_i^2}{z_{ii}})$,因此有:

$$GDOP_{m-1}^i = GDOP_m^2 + q > GDOP_m^2 \quad (11)$$

式(11)表明 GDOP 随卫星数目的增加而单调递减,因此在导航定位过程中,如果卫星无故障,应尽可能选择全部可见星进行定位计算.然而 GDOP 并不是随着卫星数目的增加而无限的减小,当卫星数目增加到一定程度时,GDOP 的递减幅度已不是很明显,下面通过仿真加以验证。

设用户在北京地区

(116° E, 40° N), GPS 星座

下,24 小时内可见星数的

变化范围是 6~9,选择

GDOP 值最小的 4 颗、6 颗

以及全部可见星,得到分

别用 4、6 和 all 标出的

GDOP 的变化曲线如图 1

图 1 选星数不同的 GDOP 变化曲线所示。

曲线表明,6 颗星比 4 颗星的 GDOP 值小,全部可见星的 GDOP 比 6 颗星的稍好,但差别已不明显.因此 GDOP 的递减幅度随卫星数目增加而变小,当卫星数目超过 6 以后,GDOP 递减很小.因此,实际定位过程中,可根据可见星的数目以及对定位精度的要求等方面,确定选择的卫星数目。

5.2 一颗卫星对 GDOP 的影响

参加定位计算的卫星数目确定后,如果要从可见星中选择 GDOP 最小的定位星组,就要考虑每一颗卫星对 GDOP

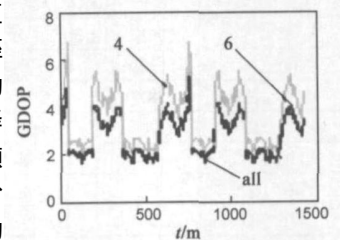


图 1 选星数不同的 GDOP 变化曲线所示。

的影响. 为便于分析和计算, 根据式(7)定义第 i 颗卫星对 GDOP 的贡献表示为:

$$\Delta G_i = \text{trace} \left(\frac{G_m h^T h_i G_m}{S_{ii}} \right)$$

ΔG 越大表示将 GDOP 减小的越大, 而 ΔG 较小的卫星将不会被选中参加定位计算. 此外, 分析定位星组中每一颗卫星对 GDOP 的影响, 能更好的解释某颗卫星进入或走出视野时 GDOP 的变化以及某颗卫星发生故障时引起定位误差的大小. 仿真条件与

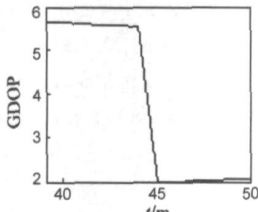


图 2 一段时间内 GDOP 的变化曲线

5.1 节相同, 采用 6 星定位, 选取采样时间从第 39 分钟到第 50 分钟, 得到 GDOP 的

采样点范围	具有最小 GDOP 的 6 颗卫星
39- 44	4, 7, 10, 11, 14, 23
45- 50	4, 7, 10, 11, 14, 22

变化曲线如图 2 所示, GDOP 最小的 6 颗卫星如表 8 所示. 采样点为 45 时 GDOP 从 5.5 变为 2.0, 参加定位计算的卫星 23 消失, 卫星 22 进入. 由于采样间隔很短, 其他 5 颗星的位置变化很小, 表 9 中数据显示, 采样点 44 时, 卫星 4 和 7 的 ΔG 很大, 而在采样点 45 时它们的 ΔG 比卫星 22 的小很多, 卫星 22 的 ΔG 最大, 这说明卫星 22 的进入, 明显改善了定位星座的几何位置关系.

表 9 不同采样时刻每颗卫星的贡献

采样点	相应卫星的 ΔG						
	4	7	10	11	14	22	23
44	57.01	30.36	7.31	8.84	1.64	-	4.89
45	2.12	0.64	6.27	0.40	1.59	29.61	-

采样时刻为 45, 分别给每个卫星加入故障偏差 300 米, 在地理坐标系下得到相应的总的定位误差如表 10 所示.

表 10 每颗卫星故障产生的总的定位误差

采样点	偏差加入相应卫星后总的定位误差(米)					
	4	7	10	11	14	22
45	230.5	177.3	273.7	138.5	212.9	335.1

分析表 9 和表 10 的数据可知, 当故障偏差相同时, 发生故障的卫星对 GDOP 贡献越大, 产生的总的定位误差越大. 每颗卫星的 ΔG 随卫星的运动而变化, 若在某一采样时刻 ΔG 最大的那颗卫星发生故障, 将会给导航定位系统带来很大的定位误差.

6 加权 GDOP

在计算 GDOP 时通常假设所有卫星的测距误差相同, 并且统计独立, 但是实际情况下, 不同卫星的测距误差不可能完全相同, 有时由于存在反射、遮挡等现象, 差别会较大. 此时将定位方程两边同时乘以一个加权矩阵 λ , 即为:

$$\lambda y = \lambda H X \quad (12)$$

其中 $\lambda = \text{diag} \left(\frac{1}{\sigma_1}, \frac{1}{\sigma_2}, \dots, \frac{1}{\sigma_m} \right)$, σ_i 是第 i ($i = 1, \dots, m$) 颗卫星的测距均方差值.

权值大小反比于卫星数据的测距均方差, 目的就是通过改变定位方程组中不同卫星定位方程的权重, 减小定位误差. 由(12)式求得加权最小二乘解为:

$$X = [(\lambda H)^T \lambda H]^{-1} (\lambda H)^T \lambda y \quad (13)$$

由此求出状态估计值的协方差为:

$$R_X = \text{COV} X = (H^T W H)^{-1} \quad (14)$$

其中 $W = \lambda^T \lambda$ 加权 GDOP 的定义^[4]如下:

$$WDOP_1 = \sqrt{\text{trace}(R_X)} \quad (15)$$

使用加权 GDOP 可改善用户的定位精度. 设飞机在海拔 9 千米的高度上, 从北京出发平行赤道向东飞行, 速度为 340 米/秒, 仿真时间为 24 小时. 采用 6 星定位, 设卫星的测距均方差依次为 33、20、30、15、40、25 米, 分别以 $WDOP_1$ 和 GDOP 最小作为选星依据, 计算出卫星无故障的前提下用户总的定位误差, 得到采样点范围为 191~ 240(50 分钟)的统计数据如表 11 所示.

表 11 根据 $WDOP_1$ 和 GDOP 选星后总的定位误差统计

选星依据	总的定位误差(米)			
	最大值	最小值	平均值	< 50 的百分比
$WDOP_1$	80.87	13.02	43.61	68%
GDOP	91.32	15.62	46.85	62%

从表 11 数据可知, 卫星的测距误差不同时, 根据 $WDOP_1$ 选星得到的总的定位误差较小. 加权以后, 增加了测距误差小的定位方程的比例, 从而提高了定位精度; GDOP 是在等权的情况下得到的, 因此定位误差较大.

另一种常用的加权 GDOP 可表示为:

$$WDOP_2 = K_1 g_{11} + K_2 g_{22} + K_3 g_{33} + K_4 g_{44} \quad (16)$$

其中 $K_1 + K_2 + K_3 + K_4 = 1$.

这种加权方法是根据对定位误差的具体要求来选择权值的. GDOP、PDOP、HDOP、VDOP 和 TDOP 就是在一定的定位误差要求下对 $WDOP_2$ 的等价表示. 与 $WDOP_1$ 的仿真条件相同, 设卫星的测距均方差为 33 米, 分别以 5 个 DOP 最小作为选星

表 12 不同选星依据下的 6 星组合和不同定位误差结果

选星依据	6 星组合	定位误差(米)					
		总的	位置	水平	垂直	时钟	
GDOP	2, 3, 6, 9, 10, 16(191~ 209)	最大值	108.93	98.72	63.88	84.51	53.06
	2, 3, 6, 9, 13, 16(210~ 232)	最小值	11.04	8.66	6.92	3.39	0.66
	2, 6, 9, 13, 16, 19(233~ 240)	平均值	55.10	50.79	35.28	31.78	21.13
PDOP	2, 3, 6, 9, 10, 16(191~ 209)	最大值	108.93	98.72	63.88	84.51	53.06
	2, 3, 6, 9, 13, 16(210~ 231)	最小值	11.04	8.66	6.92	3.39	0.66
	2, 6, 9, 13, 16, 19(232~ 240)	平均值	55.74	50.41	34.97	31.55	21.14
HDOP	2, 3, 9, 10, 12, 16(191~ 209)	最大值	119.15	112.35	63.57	107.85	49.62
	2, 3, 9, 12, 13, 16(210~ 231)	最小值	19.75	15.69	7.15	3.74	0.10
	2, 3, 12, 13, 16, 19(232~ 240)	平均值	65.25	59.41	32.93	43.75	23.77
VDOP	2, 3, 6, 9, 10, 16(191~ 209)	最大值	111.54	99.42	75.61	68.41	59.13
	2, 3, 6, 9, 12, 13(210~ 231)	最小值	13.84	10.49	7.06	2.82	0.66
	2, 6, 9, 12, 13, 19(232~ 240)	平均值	57.20	52.17	38.60	29.84	22.23
TDOP	2, 3, 6, 9, 10, 13(191~ 209)	最大值	108.93	98.72	63.88	84.51	48.90
	2, 3, 6, 9, 13, 16(210~ 232)	最小值	11.04	8.66	6.92	0.73	0.51
	2, 6, 9, 13, 16, 19(233~ 240)	平均值	58.37	51.21	33.28	31.06	20.31

依据^[5],得到采样点范围 191~240 对应的 6 星组合以及不同的定位误差结果如表 12 所示。

表 12 中数据可知根据 VDOP 进行选星对应的垂直定位误差最小,据此分析其他定位误差的数据,可知使用 WDOP₂ 选星得到的相应定位误差结果是比较理想的。分析表 12 中数据还可发现不同选星依据下的 6 星组合是不相同的,这其实就是第二种加权方法的根本目的,即根据 WDOP₂ 选择可有效减小相应定位误差的卫星组合,从而改善定位精度。

7 结束语

通过五个方面的研究把与 GDOP 相关的知识点进行了归纳和总结,结论如下:①不同的星座配置参数会对可见星数和 GDOP 的分布产生影响;②GDOP、PDOP 和 TDOP 具有坐标变换不变性,而 HDOP 和 VDOP 不具备这种性质,这主要是由坐标变换的物理意义决定的;③GDOP 随卫星数目的增加而单调递减,但是当卫星数目 ≥ 6 时, GDOP 的改善很小,实际应用中要根据可见星数目以及定位精度要求合理选择;④分析每颗卫星与 GDOP 的关系能更好的解释某颗卫星进入或走出视野时 GDOP 的变化,卫星的 ΔG 越大,其发生故障时引起的定位误差越大;⑤采用加权 GDOP 可改善卫星导航系统的定位精度。

以上结论已在具体课题中得到了应用。在检验 Galileo 系统星座时,根据星座配置参数与 GDOP 的关系,可知其选择的星座配置,使可见星数和 GDOP 优于 GPS;在卫星导航接收机自主完好性监视技术(RAIM)^[6]的研究过程中,采用了地理坐标系下的 GDOP,选择 6 颗卫星进行定位计算以及故障卫星的检测和隔离,将卫星 ΔG 与定位误差的关系用于故障卫星的估计,减少了故障检测时间;对 TIS 以及 TIS/INS/GPS 多传感器组合导航系统进行研究时,用户相对定位的源选择采用了第一种加权方法,通过抑制测距误差来减小总的定位误差;GPS 进近、着陆演示系统中为保证垂直定位误差较小,采用 VDOP 最小作为选星依据,从而选出可有效减小垂直误差的定位星组。

参考文献:

[1] 言中,丁子明. 卫星无线电导航[M]. 北京:国防工业出版社

社,1989. 171-173.

Yan Zhong, Ding Zi ming. Satellite Radio Navigation[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1989. 171-173. (in Chinese)

- [2] Ahmed El Rabbany. Introduction to GPS The Global Positioning System[M]. London: Artech House, 2002. 155-159.
- [3] Yang Yong, Miao Ling juan. GDOP results in all in view positioning and in four optimum satellites positioning with GPS PRN codes ranging[J]. IEEE Position Location and Navigation Symposium, 2004. 723-727.
- [4] H Sairo, D Akopian, J Takala. Weighted dilution of precision as quality measure in satellite positioning[J]. IEEE Radar, Sonar and Navigation, 2003, 150(6): 430-436.
- [5] Masahiko Kihara. Study of a GPS satellite selection policy to improve positioning accuracy[J]. IEEE Position Location and Navigation Symposium, 1994. 267-273.
- [6] 范慧琴. GPS 自主完好性监测技术研究[D]. 北京:北京航空航天大学电子信息工程学院, 2000.
- Fan Hui qin. GPS Autonomous Integrity Monitoring Research [D]. Beijing: College of Electronics and Information Engineering of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2000. (in Chinese)

作者简介:

丛 丽 1981 年出生于黑龙江安达, 2004 年毕业于哈尔滨工程大学自动化学院, 获硕士学位。现为北京航空航天大学电子信息工程学院博士生, 专业为通信与信息系统, 主要研究方向为卫星导航、战术综合电子系统等。E-mail: congli_hlj@163.com

Ahmed I Abidat 利比亚国籍, 北京航空航天大学电子信息工程学院 2002 级博士留学生, 研究方向是卫星导航, 主要从事 GPS 完好性监测技术方面的研究。

展展中 北京航空航天大学教授, 主要从事卫星导航、组合导航、战术综合电子系统和机载设备自动测试系统等方面的教学与研究工