0254-6124/2012/32(6)-887–06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Wu Huiying, Chen Hongyu. Directional detection of the quasi-inertial satellite GPS receiver antenna installation angle. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(6): 887-892

准惯性定向探测卫星 GPS 接收天线安装角度研究*

吴会英　陈宏宇

(上海微小卫星工程中心　上海 200050)

摘　要　研究了准惯性定向探测卫星 GPS 接收天线的安装角度问题. 根据卫星任务需求分析其姿态需求, 再由姿态需求对 GPS 接收天线的安装方式进行理论分析和仿真计算, 通过 GDOP 值优选了安装角度方案. 仿真结果表明, GPS 接收天线的轴向在本体 $\pm y$ 轴即轨道面法向或负法向方向附近.

关键词　探测卫星, GPS 接收天线, 准惯性定向, GDOP 值

中图法分类号　V 44

Directional Detection of the Quasi-inertial Satellite GPS Receiver Antenna Installation Angle

WU Huiying　　CHEN Hongyu

(*Shanghai Engineering Center for Microsatellites, Shanghai* 200050)

Abstract　The GPS (Global Positioning System) receiving antenna installation angle on a quasi-inertial orientation of the exploration-satellite is studied. Firstly, according to the mission requirements, the satellite attitude requirements are analyzed. Secondly, theoretical analysis and simulation were conducted according to the attitude requirements of posture on the installation of the GPS receiver antenna installation angle, preferably by the GDOP (Geometric Dilution of Precision) values. Finally, conclusion is drawn based on the simulation results that the GPS receiving antenna axial is near to the $\pm y$ axis of body reference frame, *i.e.* the orbital plane normal or negative normal direction.

Key words　Exploration satellites, GPS receiver antenna, Quasi-inertial orientation, GDOP value

* 十二五预研课题项目资助

2011-06-27 收到原稿, 2012-03-26 收到修定稿

E-mail: wuhuiying79@163.com

0 引言

GPS 卫星导航系统的空间部分是由轨道高度 20 230 km 的 24 颗工作卫星和在轨热备份卫星组成的卫星星座. 其卫星分布在 6 个等间隔、倾角 55° 的近圆轨道上, 运行周期为 718 min. 卫星发布的导航电文包括卫星星历、时钟偏差校正参数、信号传播延迟参数、卫星状态信息、时间同步信息和全部卫星的概略星历. 通过对导航电文解码, 可以得到以上参数, 进行定位计算 [1].

随着 GPS 卫星导航系统不断完善, 其定位精度不断提高. 目前, 在轨卫星大都在尝试使用 GPS 定位得到的卫星实时轨道作为相关系统输入. 对于一般对地观测卫星, 姿态定向为对地定向, GPS 接收天线安装在卫星的对天面最利于接收 GPS 卫星信号; 但是, 对于以卫星为观测目标的探测卫星, 其观测目标为卫星, 探测图像背景为恒星, 如果卫星的指向相对惯性空间不变或者变化缓慢 (准惯性定向), 对精确提取目标是非常有利的. 因此, 对卫星的姿态要求为惯性定向或相对惯性空间变化极小的准惯性定向, 这对卫星的 GPS 接收天线安装角度提出了要求.

1 卫星姿态指向需求

探测卫星任务目标为观测卫星, 卫星姿态指向可采用两种设计方式. 一种为常规对地定向设计, 便于对地测控通信和数据传输, 用于卫星上天初期, 同时可以开展目标探测试验, 以验证地面高动态恒星背景情况下目标的提取能力; 另一种考虑对轨道面法向天区进行惯性定向详查, 是在降低目标提取难度的前提下提高目标提取精度, 以更好地定位目标卫星.

以探测卫星为降交点 06:30 LT 的晨昏太阳同步轨道为例, 光学探测载荷安装在本体 y 面, 光轴沿 y 轴, 由于光学载荷的阳照条件限制, 采用的定向方式为随轨道面进动的准惯性定向方式, 即本体 x 轴指向轨道升交点的方向, y 轴指向轨道面法向的反方向, 其示意见图 1.

由于姿态定向方式不同于普通的对地定向模式, 地心矢量与本体 x 和 z 轴的夹角在一轨内成周期性变化, 如图 2 所示.

由图 2 可见, 任何 Oxz 平面内的矢量与地心矢量夹角的变化周期均为轨道周期, 即轴向在此平面内的矢量的任何载荷被地球遮挡的情况都是相同的; 而 y 轴方向 (垂直于 Oxz 平面) 载荷被地球遮挡的情况在一个轨道周期内几乎相同, 下面重点分析轴向为非 Oxz 平面内的 GPS 接收天线被遮挡情况.

2 GPS 接收天线安装角度分析

GPS 接收天线的安装角度直接决定了 GPS 卫星的可见卫星个数, 同时, 可见 GPS 卫星和探测卫星本身的几何关系又直接与定位的 GDOP (几何精度衰减因子或误差放大倍数) 值相关. 下面通过分析 GPS 卫星的可见性和 GDOP 值来具体讨论天线安装方向.

2.1 可见性与 GDOP 值

导航卫星可见性与几何精度因子 (GDOP, 定义数学符号为 G) 是卫星导航系统实时定位中的重要因素, 是评价导航星座性能的关键技术指标以及进行导航定位计算的前提条件. 可见性表示在某一时刻待定位置点所能观测到的导航卫星数目, 可见性越好, 则可选卫星越多, 观测越有利; GDOP 则表征用户接收机所跟踪卫星空间分布的几何构图强度, GDOP 值越小, 则用户获得的定位精度越高, 反之, 定位精度就越低 [1−4], 其数学表述如下 [5−6]:

$$\Delta X = G\Delta\rho.$$

其中, $\Delta\rho$ 为伪距误差, ΔX 为定位误差.

伴随着卫星全球导航定位系统 GPS 的出现, 关于 GDOP 的计算很早就已经开始 [7], 一般采用方向

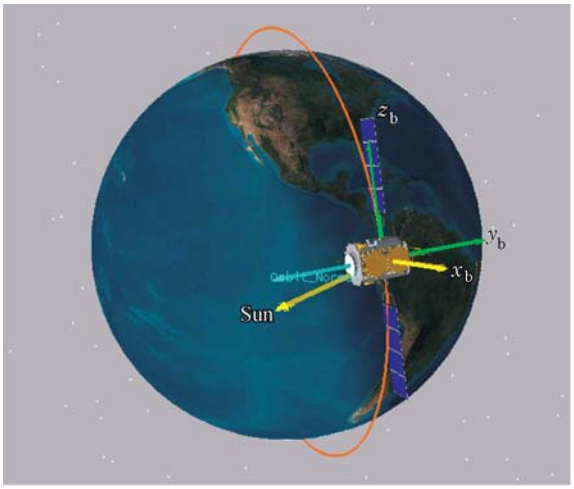


图 1 轨道及姿态定向示意

Fig. 1 Schematic of orbit and attitude orientation

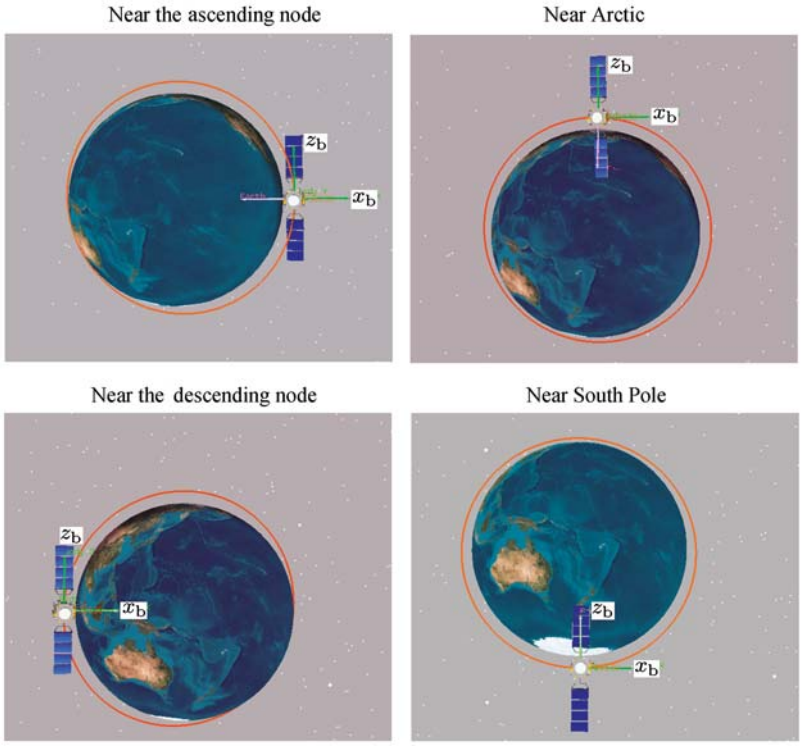


图 2 准惯性定向的卫星本体在一个轨道周期内的空间方位变化示意

Fig. 2 Azimuthal variation diagram of the quasi-inertial orientation of the satellite body in space within a period

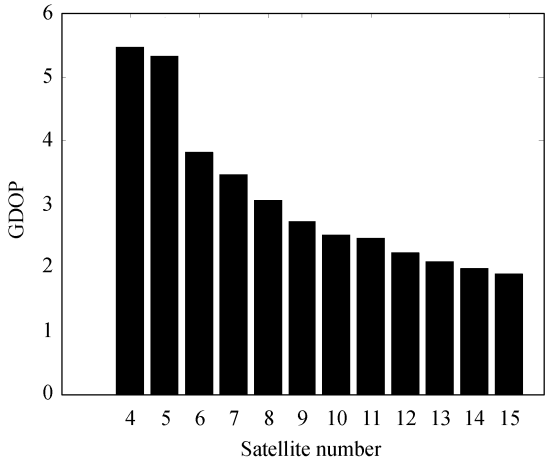


图 3 GDOP 值与卫星个数的关系

Fig. 3 GDOP variation with satellite number

余弦法 [1], 这里不再赘述. 根据 GDOP 值基本计算原理, 可得到定性结论, 卫星个数越多, GDOP 值越小, 如图 3 所示.

图 3 表征了 GDOP 值与卫星个数的关系, 虽然二者是正相关, 但非线性, 具体值与可见导航星的几何构型相关.

2.2 GPS 接收天线安装角度仿真分析

根据理论分析, 初步选择 GPS 接收天线安装角度垂直于 Oxz 平面的 y 轴或与 y 轴有一定夹角, 定义 GPS 接收天线轴向的方位角、俯仰角如图 4 所示. 利用 STK 软件, 选择可见全部 GPS 卫星做定位计算, 根据不同天线轴向方位、俯仰角来分析 GPS 卫星可见星数和 GDOP 值, 统计分析结果列于表 1.

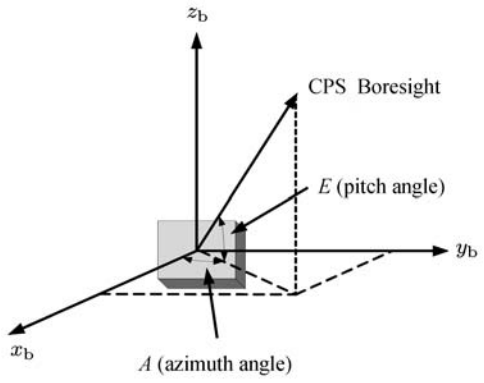


图 4 方位角 A、俯仰角 E 定义示意

Fig. 4 Schematic of azimuth A and the pitch angle E definition

表 1 GPS 接收天线安装角度仿真分析结果

Table 1 GPS receiver antenna installation angle simulation results

E/(°)	A/(°)	与 y 轴夹角/(°)	每分钟可见 GPS 卫星个数			GDOP 值		
			最大	最小	平均	最大	最小	平均
	60	41.41	10	3	6.61	15.87	0.00	2.96
	70	35.53	9	4	6.74	12.54	1.58	2.69
	80	31.47	9	4	6.75	8.90	1.55	2.76
−30	90	30.00	10	4	6.75	19.93	1.43	2.86
	100	31.47	9	4	6.76	320.35	1.57	3.62
	110	35.53	9	3	6.74	1000.00	0.00	4.29
	120	41.41	9	3	6.71	72.17	0.00	2.94
	60	38.29	10	4	6.74	15.87	1.45	2.84
	70	31.61	10	4	6.78	15.87	1.46	2.70
	80	26.81	9	5	6.79	8.72	1.55	2.72
−25	90	25.00	9	4	6.77	8.90	1.56	2.75
	100	26.81	9	4	6.78	320.35	1.52	3.30
	110	31.61	9	4	6.77	1000.00	1.58	3.71
	120	38.29	10	3	6.75	14.41	0.00	2.84
	60	35.53	10	4	6.80	15.80	1.45	2.77
	70	27.99	9	4	6.80	15.87	1.51	2.70
	80	22.27	9	5	6.80	8.72	1.52	2.70
−20	90	20.00	9	4	6.79	8.72	1.58	2.71
	100	22.27	9	4	6.80	33.26	1.52	2.76
	110	27.99	10	4	6.79	10.47	1.58	2.79
	120	35.53	10	3	6.78	9.14	0.00	2.84
	60	31.47	10	4	6.82	12.62	1.55	2.76
	70	22.27	10	4	6.80	201.60	1.57	2.93
	80	14.11	9	4	6.79	8.72	1.61	2.71
−10	90	10.00	9	5	6.82	6.56	1.60	2.66
	100	14.11	9	4	6.83	6.56	1.54	2.65
	110	22.27	9	4	6.84	6.56	1.60	2.69
	120	31.47	10	4	6.84	16.75	1.59	2.77
	60	30.00	10	4	6.81	10.31	1.50	2.72
	70	20.00	10	4	6.76	10.31	1.54	2.75
	80	10.00	9	5	6.76	6.56	1.61	2.70
0	90	0.00	9	5	6.82	6.56	1.61	2.66
	100	10.00	9	4	6.86	6.56	1.61	2.65
	110	20.00	9	4	6.88	7.49	1.52	2.65
	120	30.00	10	3	6.83	75.85	0.00	2.80
	60	31.47	10	4	6.71	7.88	1.55	2.79
	70	22.27	9	5	6.67	6.65	1.57	2.76
	80	14.11	9	5	6.72	7.08	1.61	2.69
10	90	10.00	9	5	6.82	5.66	1.62	2.62
	100	14.11	9	5	6.86	6.56	1.68	2.59
	110	22.27	10	4	6.90	22.27	1.48	2.63
	120	31.47	9	4	6.82	75.85	1.57	2.72

(to be continued)

表 1 续

Table 1 (continued)

E/(°)	A/(°)	与 y 轴夹角/(°)	每分钟可见 GPS 卫星个数			GDOP 值		
			最大	最小	平均	最大	最小	平均
20	60	35.53	10	3	6.54	412.50	0.00	3.27
	70	27.99	9	4	6.49	18.61	1.54	2.83
	80	22.27	9	4	6.66	24.43	1.59	2.70
	90	20.00	9	4	6.75	22.27	1.58	2.67
	100	22.27	10	4	6.81	22.27	1.48	2.64
	110	27.99	10	4	6.84	22.27	1.45	2.63
	120	35.53	9	4	6.76	9.78	1.58	2.65
25	60	38.29	9	3	6.39	426.00	0.00	4.16
	70	31.61	9	4	6.46	21.61	1.54	2.88
	80	26.81	9	4	6.57	26.29	1.50	2.80
	90	25.00	9	3	6.70	179.03	0.00	2.99
	100	26.81	10	4	6.78	951.25	1.48	4.51
	110	31.61	10	4	6.73	30.53	1.47	2.80
	120	38.29	9	4	6.69	30.37	1.61	2.70
30	60	41.41	10	3	6.44	426.00	0.00	2.99
	70	35.53	9	4	6.50	105.31	1.54	2.87
	80	31.47	9	3	6.44	26.29	0.00	2.99
	90	30.00	9	3	6.66	951.25	0.00	4.58
	100	31.47	10	3	6.68	951.25	0.00	4.72
	110	35.53	10	3	6.67	951.25	0.00	4.58
	120	41.41	9	4	6.59	30.37	1.58	2.97

注 表 1 中 GDOP 值一列的 0.00 表示不满足至少 4 星定位的基本定位条件, 而大于 50 的情况代表虽然满足至少 4 星的定位条件, 但可见 GPS 卫星的几何关系不好, GDOP 值太大, 在下面的分析中, 对这两种特殊情况进行特殊处理, 将相应的物理量取特殊值 (图 5 中 GDOP 值取为 50).

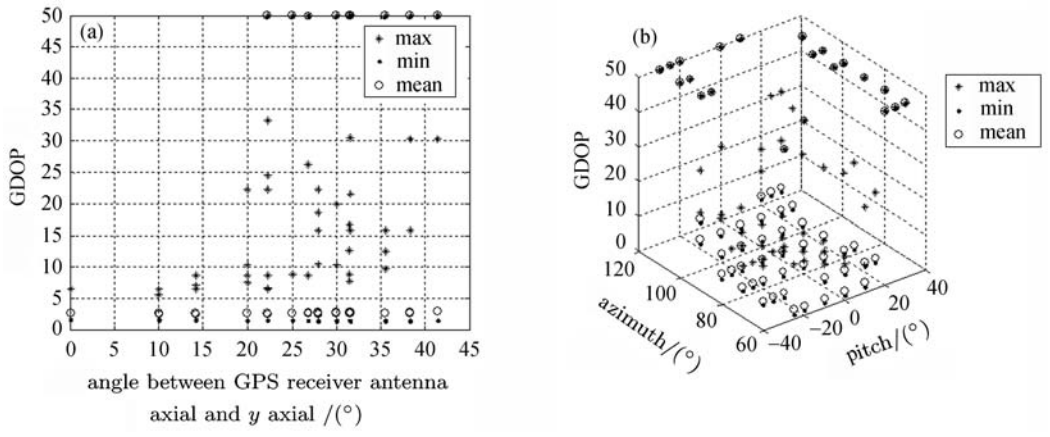


图 5 影响 GDOP 值的物理量. (a) GDOP 值与夹角的关系. (b) GDOP 值与方位角及俯仰角的关系

Fig. 5 Physical parameters affecting GDOP value. (a) Relationship of GDOP value and the angle between GPS receiver antenna axial and y axial. (b) Relationship of GDOP value and A, E

由表 1 可见, GPS 接收天线轴线不能与 y 轴夹角过大, 根据表 1 中数据, 对特殊值进行特殊处理, 得到 GDOP 值与夹角的关系 (见图 5).

由图 5 可见, GPS 天线轴线与 y 轴夹角不能超过 22.5°, 此时 GDOP 最大值仅为 34° 左右, 对应表 1 中的数据, 可以总结出方位角和俯仰角的大致范围为: $80° \leqslant A \leqslant 100°$, $-20° \leqslant E \leqslant 20°$. 但是, 这里给出的 A, E 范围仅为较保守的范围, 从图 5 可以看出, 当 A, E 中某一个角度偏离 y 轴对应的方位、俯仰角 ($A = 90°$, $E = 0°$) 较小时, 另一个角度可以适当放宽要求, 例如, $A = 80°$, $E = -30°$ 的 GPS 天线轴向也是一种不错的选择. 另外需要说明的是, 图 5 体现的结果是 GDOP 值与夹角并不是简单的正相关, 在夹角大于 22.5° 的条件下, 仍然有 GDOP 值较好的情况 ($A = 80°$, $E = -25°$, GDOP 最大 8.72, 最小 1.55, 均值 2.72).

通常, 在导航定位中 GDOP 经验值取值 [3] 小于 6, 这里选择 GPS 接收机安装角度时, 力求遵从此原则并进行一定程度放宽, 选择 GDOP 值小于 7, 这样可供选择的 A, E 角范围基本限定在与 y 轴夹角为 10° 的范围内.

另外, 由于 $-y$ 方向与 $+y$ 方向的对称性, 其分析结果相似, 这里不再赘述.

由于 GPS 接收天线的安装角度并非沿着卫星本体坐标系的某一轴向, 因此, 为避免星体本身和帆板的遮挡 (考虑结构设计的简单性, 星体一般设计成矩形), 天线应安装在矩形的某一棱角上.

3 结语

这里, 卫星准惯性定向下的 GPS 接收机天线安装方式是在仅安装一根天线前提下展开讨论的. 若工程允许安装两根天线, 增大对 GPS 导航星的覆盖性, 可以考虑在与 $\pm y$ 轴夹角小于 10° 的范围内近似对称安装两根天线, 但两根天线仍然无法避免地球遮挡, 具体遮挡范围与轨道高度相关. 两根天线之间的干扰以及数据联合处理方法的工程应用也需充分考虑. 由于篇幅所限, 这里不再深入研究.

通过理论分析和仿真计算可知, 由于卫星的准惯性定向方式不能像普通卫星一样将 GPS 接收天线安装在朝天面 ($-z$ 面), 通过分析论证, 天线轴向应该在 $\pm y$ 方向附近, 考虑星体本身和帆板的遮挡, 应将 GPS 接收天线安装在矩形的棱角处.

参考文献

[1] Yuan Jianping, Luo Jianjun, Yue Xiaokui, *et al.* Satellite navigation principles and applications [M]. Beijing: China Astronautics Press, 2003. In Chinese (袁建平, 罗建军, 岳晓奎, 等. 卫星导航原理与应用 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2003)

[2] Li Hongtao, Xu Guochang, Xue Hongyin, *et al.* GPS Application Design [M]. Beijing: Science Press, 1999. In Chinese (李洪涛, 许国昌, 薛鸿印, 等. GPS 应用程序设计 [M]. 北京: 科学出版社, 1999)

[3] Zhou Zhongmo, Yi Jiejun, Zhou Qi, *et al.* Principles and applications of the GPS satellite measurements [M]. Beijing: Measure and Mapping Press, 1995. (周忠谟, 易杰军, 周琪, 等. GPS 卫星测量原理与应用 [M]. 北京: 测绘出版社, 1995)

[4] Liu Jiyu. GPS Satellite Navigation Theory and Method [M]. Beijing: Science Press, 2003. In Chinese (刘基余. GPS 卫星导航定位原理与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2003)

[5] Hu Wencai, Zhang Xinggu, Huang Liqing. Global Positioning System GDOP [J]. *Dalian Mar. Univ. Trans.*, 2002, **28**(4):42-45. In Chinese (胡稳才, 张杏谷, 黄丽卿. 全球定位系统的几何精度因子 [J]. 大连海事大学学报, 2002, **28**(4):42-45)

[6] Liu Huijie, Zhang Naitong. GDOP optimal positioning constellation performance [J]. *High Technol. Lett.*, **2000**(1):43-47. In Chinese (刘会杰, 张乃通. GDOP 的最优定位星座性能研究 [J]. 高技术通讯, **2000**(1):43-47)

[7] Zhu J J. Calculation of geometric dilution of precision [J]. *IEEE Trans. Aerosp. Electr. Syst.*, 1992, **28**(3):893-895