

电离层对单频卫星导航系统伪距差分定位的影响

宋茂忠 王永澄

(南京航空航天大学 4 系, 南京, 210016)

IONOSPHERIC EFFECTS ON THE PSEUDORANGE DIFFERENTIAL POSITIONING IN A SINGLE-FREQUENCY SATELLITE NAVIGATION SYSTEM

Song Maozhong, Wang Yongcheng

(Fourth Department of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016)

摘 要 用计算机仿真方法, 给出了单频卫星导航系统伪距差分后, 定位误差受电离层影响的一些结果。伪距差分定位能够校正电离层时延误差, 但校正精度随用户与基准站到同一颗卫星倾角因子的不同而不同。为此, 提出了一种改进的伪距差分方法。仿真结果表明, 改进后有明显效果。

关键词 卫星-无线电导航, 电离层, 延时

中图分类号 V249.32, TIV967.1

Abstract By means of computer simulation, this paper presents the results of the ionospheric effects on the pseudorange differential positioning in a single-frequency satellite navigation system. The pseudorange differential positioning can calibrate the error of ionospheric time delay, but the calibrating accuracy varies with the difference between the obliquity factors of the user to a satellite and the reference station to the same satellite. Thus, an improving pseudorange differential method is proposed. Simulation results show that the method is obviously effectual.

Key words satellite-radio navigation, ionospheres, time delay

在卫星导航中, 减少电离层时延误差的有效措施是双频校正技术。但双频校正需占用两个频率资源, 收发射频单元也复杂 1 倍。单频卫星导航系统随着 C/A 码 GPS 的广泛应用, 越来越受到重视, 但单频卫星导航系统存在的普遍问题就是电离层时延误差。由于模型校正精度不高, C/A 码 GPS 中仅能消除 50% 的电离层时延误差^[1]。差分技术能够提高用户的整体定位精度, 但差分后主要误差源之一的电离层时延影响精度的定量分析还比较小或不够充分^[2,3]。为此, 在分析单频卫星导航系统电离层误差特性的基础上, 用 J. A. Klobuchar^[4]提供的月平均电离层时延等值图数据, 直接研究电离层单一因素作用时, 伪距差分 GPS 的误差特性, 提出了一种改进的伪距差分 GPS 算法, 并进行了计算机仿真验证。

1 单频卫星导航系统电离层时延误差模型

设用户位于地表面的 P 点, 经纬度为 (λ , φ), 导航星位于空间的 S 点, 电波从 S 点到 P 点必须穿过电离层, 并产生附加时延、折射和衰落。对 L 波段卫星导航系统折射和衰落误差与附加时延误差相比, 可以忽略。若仅仅考虑附加时延, 电离层可以近似等效成与地球同心的薄球壳。此薄球壳位于 F 层的峰值电子浓度区域, 其平均值高度近似为 350km, 球壳厚度与垂直积分电子浓度 T_{EC} 成正比, 如图 1 所示。

当已知某时某地区的电离层球壳分布后, 电波从 S 到 P 的附加时延 ΔS_{SP} 可用电波与电

电离层球壳交点 G 处的电离层垂直时延 S_G 乘以视线 SP 的倾斜因子 $M(e_u)$ 来估计, 即 $S_{SP} = S_G M(e_u)$, 式中倾斜因子

$$M(e_u) = \sec[\arcsin(0.94792 \cos e_u)] \quad (1)$$

e_u 为视线 SP 的仰角。交点 G 的地理经纬度 (K_G, U_G) 为

$$K_G = K + \arcsin \frac{\sin A \sin A}{\cos U_G} \quad (2)$$

$$U_G = \arcsin[\sin U \cos A + \cos U \sin A \cos A] \quad (3)$$

式中 A 是视线方位角; A 是用户 P 与交点 G 之间的地心角

$$A = 90^\circ - e_u - \arcsin(0.94792 \cos e_u) \quad (4)$$

2 伪距差分后的误差特性

差分校正中最直接的方法就是伪距差分, 用参考站观测伪距与已知实际伪距之差作为误差校正量, 在用户观测伪距中减去这个校正量。伪距差分后, 电离层时延残剩误差为

$$\Delta Q = \Delta Q_u - \Delta Q_R = [\Delta S_G M(e_u) - \Delta S_H M(e_R)] C \quad (5)$$

这里 e_R 是参考站到卫星视线 RP 的仰角; H 是 RP 与电离层球壳的交点。显然, 当用户与参考站基线距离较远时, 即使 S_G 与 S_H 相差不大, 也由于 $M(e_u)$ 与 $M(e_R)$ 不等, ΔQ 仍然较大。如果考虑到 $M(e_u)$ 与 $M(e_R)$ 可能不等, 可采用如下改进的伪距差分方法

$$\Delta Q = \Delta Q_u - \frac{\Delta Q_R}{M(e_R)} M(e_u) = M(e_u) C \left[\frac{\Delta Q_u}{CM(e_u)} - \frac{\Delta Q_R}{CM(e_R)} \right] \quad (6)$$

当伪距误差仅由电离层引入时, (6) 式可简化为 $\Delta Q = M(e_u) C (\Delta S_G - \Delta S_H)$, 一般情况下, $\Delta Q_R / CM(e_u)$ 为参考站测得伪距误差时延在过 H 点的天顶方向的投影, 即等效的垂直时延。因此, 这种改进的伪距差分也可称为垂直时延差分。用这种差分不但可以校正用户的电离层时延误差, 还可减少对流层时延和星历中的高度方向误差。

3 仿真试验模型

采用的仿真试验模型主要由导航星座、传播时延误差和差分定位算法 3 部分组成。其中导航星座为假定 18 颗星均匀分布在 6 条轨道上, 每条轨道 3 颗星, 轨道倾角 55° ; 轨道高度 20 000 km 的简单星座。传播时延中电离层时延占绝大部分, 为便于比较, 这里仅考虑电离层时延。电离层等效球壳的空间分布特性选用 J·A·Klobuchar 的月平均数据, 多项式逼近后局部区域的时延等值图如图 2 所示。伪距中的电离层时延误差算法用式 (1) ~ 式 (4)。

定位算法中, 用户首先根据自己的先验位置,

选取使 GDOP 值最小的 4 颗星, 计算用户到这 4 颗星的方向余弦 $(l_j, m_j, n_j), j=1, 2, \dots, 4$

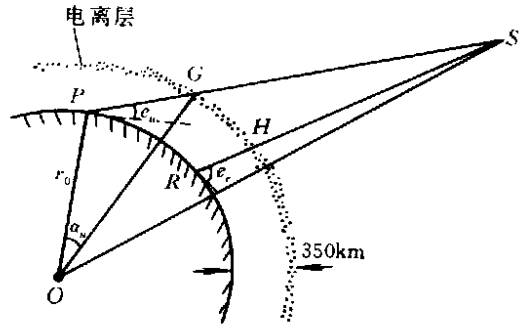


图 1 电波与电离层等效球壳的几何关系图

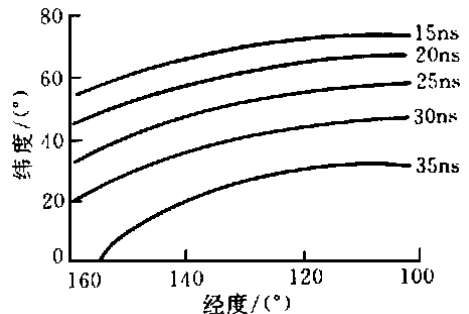


图 2 仿真用的局部地区电离层时延等值图
 $t = 2000VT, f_0 = 1575MHz,$
 1980 年 3 月的月平均值

3, 4 及用户与参考站的伪距差。则伪距差分后的定位误差 $\$X = (\$x, \$y, \$z, \$1)^T$ 可用下式近似计算

$$\$X = Gu^{-1}\$Q = Gu^{-1}[\$Q_1, \$Q_2, \$Q_3, \$Q_4]^T \quad (7)$$

(7) 式中 $\$1$ 为用户与卫星基准时钟的偏差乘以光速, Gu^{-1} 是 Gu 的逆,

$$Gu = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 & 1 \\ l_2 & m_2 & n_2 & 1 \\ l_3 & m_3 & n_3 & 1 \\ l_4 & m_4 & n_4 & 1 \end{bmatrix}。$$

若仿真普遍伪距差分, 则 $\$Q_j$ 用 (5) 式代入; 若仿真改进的伪距差分, 则 $\$Q_j$ 用 (6) 式代入。两种差分得到的 $\$X$, 再用直角坐标到地理坐标系的转换公式求出经纬高方向的定位误差和 $D_{RSM} = (\$x^2 + \$y^2 + \$z^2)^{1/2}$ 。当用户和参考站相对位置变化时, 得到的几组仿真结果如表 1 所示。

表 1 电离层对伪距差分 GPS 定位误差的影响

航线	用户		参考站		伪距差分定位误差/m				改进的伪距差分定位误差/m				GDOP	选用星号
	经	纬	经	纬	经	纬	高	D_{RMS}	经	纬	高	D_{RMS}		
I	120	58	120	60	-0.227	0.855	0.117	0.893	-0.059	0.110	-0.260	0.288	2.628	3 10 16 8
	120	56	120	60	-0.433	1.721	0.173	1.783	-0.105	0.204	-0.525	0.573	2.627	3 10 16 8
	120	54	120	60	-0.609	2.577	0.183	2.654	-0.135	0.280	-0.776	0.836	2.628	3 10 16 8
	120	52	120	60	0.616	2.745	-0.956	2.971	0.994	0.985	-0.448	1.469	1.965	3 17 5 16
	120	50	120	60	0.982	3.535	-0.949	3.789	1.206	1.080	-0.629	1.737	1.963	3 17 5 16
II	120	48	120	50	0.024	1.397	-0.341	1.438	-0.001	0.323	-0.422	0.531	2.652	3 5 5 17
	120	46	120	50	0.043	2.825	-0.766	2.928	-0.003	0.593	-0.857	1.042	2.645	3 5 6 17
	120	44	120	50	0.055	4.246	-1.286	4.437	-0.007	0.822	-1.301	1.539	2.640	3 5 6 17
	120	42	120	50	0.055	5.629	-1.904	5.942	-0.014	1.020	-1.751	2.026	2.636	3 5 6 17
	120	40	120	50	0.042	6.948	-2.617	7.424	-0.025	1.191	-2.205	2.507	2.634	3 5 6 17
III	112	55	110	55	0.632	-0.044	-0.296	0.699	0.090	-0.034	-0.013	0.097	2.600	10 16 6 8
	114	55	110	55	1.233	-0.087	-0.599	1.347	0.184	-0.056	-0.026	0.197	2.609	10 16 6 8
	116	55	110	55	1.793	-0.134	-0.903	2.012	0.283	-0.095	-0.040	0.301	2.619	10 16 6 8
	118	55	110	55	1.182	-0.733	-0.369	1.439	0.136	-0.242	0.128	0.305	2.624	3 10 16 8
	120	55	110	55	1.507	-0.930	-0.495	1.838	0.179	-0.308	0.166	0.394	2.627	3 10 16 8
IV	112	45	110	45	0.872	0.141	0.244	0.916	0.051	0.088	0.009	0.102	2.668	3 5 5 17
	114	45	110	45	1.723	0.323	0.433	1.806	0.100	0.171	0.023	0.199	2.660	3 5 6 17
	116	45	110	45	2.539	0.538	0.572	2.658	0.144	0.250	0.039	0.291	2.654	3 5 6 17
	118	45	110	45	3.304	0.774	0.673	3.459	0.186	0.327	0.058	0.380	2.648	3 5 6 17
	120	45	110	45	4.005	1.019	0.751	4.200	0.223	0.403	0.078	0.468	2.643	3 5 6 17

4 仿真结果及讨论

表 1 是电离层对两种伪距差分定位影响的结果比较。表中两种差分的参考站位置、用户航线、及用户选星完全相同。第 1、2 条航线是用户与参考站保持同样经度下, 用户纬度变化的结果。第 3、4 条航线是用户与参考站保持同样纬度条件下, 用户经度变化的结果。比较四条航线的两种差分方法, 改进的伪距差分综合定位误差 D_{RMS} 比普通伪距差分小得多。如当用户位置为 (120°; 40°), 参考站位置为 (120°; 50°) 时, 普通伪距差分的 $D_{RMS} = 7.424\text{m}$, 而改进后 $D_{RMS} = 2.507\text{m}$ 。另外, 从定位误差在经纬高 3 个方向分布来看, 普通伪距差分分布与参考站位置选取有关。若用户与参考站经度相同, 只是纬度不一样, 差分

定位误差在纬度方向就明显大一些。若用户与参考站纬度相同, 只是经度不一样, 则定位误差在经度方向也要大些。而改进的伪距差分定位误差分布与参考站位置选取就基本无关。比较第 与第 条航线, 及第 条与第 条航线, 还不难看出, 当参考站和用户的经度差或纬度差相同时, 处高纬度区域两种伪距差分定位误差都要小于低纬度区域。这虽然与低纬度区域用户与参考站的基线距离略远些有关, 但主要还是电离层时延值分布在高纬度区域比低纬度区域小的原因。

表中数据还说明, 两种伪距差分对校正电离层时延误差都是有效的。若不用任何校正技术, 单频卫星导航系统仅电离层一项可以引起约 20 ~ 30m 的定位误差^[5], 而本文方法仅几米, 因此, 若差分站组建较多, 新设计的卫星导航系统就可以不用双频校正技术, 而用单频加差分方法校正, 系统成本就可大大降低。其它低轨道移动卫星通信系统也更容易兼营定位业务。

当然, 本文改进伪距差分中的垂直时延, 实际上是电波从卫星到参考站的电离层、对流层和星历等所有误差在电波与电离层等效球壳交点处的天顶方向投影。用这个量来校准, 对减少电波从卫星到用户天顶方向引入的误差有所偏重, 是否能通过牺牲一点用户的水平定位精度, 来提高高度定位精度还有待进一步验证。

参 考 文 献

- 1 Sennott J W. Experimental measurement and characterization of ionospheric and multipath errors in differential GPS. *Navigation: Journal of the Institute of Navigation*, 1987; 34 (2): 160- 173
- 2 Denro R P. Cabak A R. Simulation and analysis of differential global positioning system for civil helicopter operations. NASA-CR-166534, 1983: 141
- 3 Davidson D, et al. , Global positioning system differential positioning simulation. Technical Report of University of New Brunswick, 1983: 243
- 4 Klobuchar J A. Ionospheric time-delay algorithm for single frequency GPS users. *IEEE Trans* 1987; AES- 23 (3): 325- 331
- 5 宋茂忠, 王永澄. 电离层对普通 GPS 和位置差分 GPS 定位误差的影响. *南京航空航天大学学报*, 1994; (4):