

GPS 动态定位的初步研究*

刘基余 李静年 陈小明

摘要 基于我们的车载 DGPS 试验成果和 DDKIN 动态载波相位测量数据处理软件,本文主要论述了 GPS 动态定位的下列技术问题:依据 GPS 卫星给用户提供的 User Range Accuracy 值,选择定位星座;顾及运动载体的特点,选用 GPS 信号接收天线及其在载体上的安设位置;用 Trimvec Plus 和 DDKIN 软件,精细处理一秒数据率的动态载波相位测量数据。

关键词 GPS 动态定位;用户测距精度;1 秒数据率

分类号 P228

GPS 动态定位,在测绘行业中展现了广阔的应用前景。例如,用 GPS 信号测量车载 GPS 接收天线的实时位置,通过同步测量的海底声标和测量船之间的水下声距,而建立海底大地测量控制网;在航空摄影测量和航空航天遥感中,用 GPS 信号测量每一个摄影瞬间的相机曝光中心(摄站)位置。国外学者预言,GPS 在航空摄影测量中的实际应用,将发展成为无需地面大地测量控制点的航测快速成图新技术。但是,测绘行业所要求的 GPS 动态定位困难较多,这既要求高达厘米级精度的实时定位,又要求适应每秒几公里的载体运行速度。在此高动态环境下,如何取得稳定可靠的实时定位精度,已成为国内外学者的研究热点之一。基于我们的车载 DGPS 试验成果和动态载波相位测量的自编 DDKIN 测后数据处理软件,本文主要讨论的是如何顾及 SA 技术和多路径效应的影响,以及测后数据处理等问题。

1 依据 GPS 卫星的 URA 值选择适宜的定位星座

GPS 工作卫星所用的 SA 技术,是我国广大动态用户极为关注的重大问题;所谓 SA 技术,是一种控制非特许用户(unauthorized user)不能获得高精度实时定位的方法;它包括对 GPS 卫星基准频率所采用的 δ 技术,对导航电文所采用的 ϵ 技术,对 P 码采用的译密技术。在 1991 年 7 月 1 日正式启用 SA 技术之前,美国国防部曾作了三次 SA 技术的在星试验。恰于 SA 技术试验期间,我们拥有在我国境内实测的 3 个年度的 GPS 数据,并依此提出了依据 GPS 卫星的 URA 值判定 SA 技术处于何种状态,而为 GPS 测量选择适宜的定位星座。

导航电文第一子帧的第 3~10 字码称为第一数据块,其第 3 字码的第 13~16 比特给出了传输参数 N ,它向非特许用户指明,当用该颗 GPS 卫星时,可能达到的测距精度,称之为 User Range Accuracy (URA),且知

$$URA \leq 2^N$$

按照文献[2]的规定,当 N 为 1111(=15)时,表示缺乏精度的预估值;非特许用户若用该

收稿日期:1992-11-20

* 国家自然科学基金和国家测绘局测绘科技发展基金资助项目

颗 GPS 卫星进行导航定位测量,由他们自己承担风险,意即不能确保能否获得令人满意的导航定位精度。但是,近期的实测资料表明,即使 GPS 卫星的传输参数 N 等于 9,用它们测量 8m 左右的站间距离,与其标称值之差,大到 11.2cm(本应为毫米级的),而无法获得预期的定位精度;因此,非特许用户不宜用该种 GPS 卫星作导航定位测量。

根据 1990 年 3 月至 1992 年 3 月,用 Trimble 4000SST 双频接收机在我国境内所采集的 GPS 定位数据,而摘录了 8 个时段的 IODE(AODE)和 URA 值如表 1 所示;从表列数据可见下列几点:

表 1 不同时期的 URA 值

卫星号 (PRN)	1990. 3. 16		1990. 4. 19		1990. 4. 30		1991. 2. 20		1991. 5. 26		1991. 11. 22		1991. 11. 23		1992. 3. 26		
	IODE	URA	IODE	URA	IODE	URA	IODE	URA	IODE	URA	IODE	URA	IODE	URA	IODE	URA	
	(Sec)	(m)	(Sec)	(m)	(Sec)	(m)	(Sec)	(m)	(Sec)	(m)	(Sec)	(m)	(Sec)	(m)	(Sec)	(m)	
2									145	5.7						237	32.0
3	150	2.8															
6	146	4.0							17	11.3						221	4.0
9	118	4.0	197	4.0	223	16.0											
11	46	2.0									228	4.0	15	4.0	85	4.0	
12	190	8.0	140	5.7	68	4.0	154	4.0	220	8.0	8	2.8	40	2.8			
13	171	11.3							222	4.0							
14									32	4.0						190	32.0
15									67	4.0	200	512.0	13	1024.0	180	32.0	
16			51	32.0	16	32.0											
17			210	32.0	58	32.0	84	4.0									
18			133	32.0	216	32.0										235	32.0
19	189	5.7	163	32.0	217	32.0			79	5.7						195	32.0
20					228	32.0	194	4.0			86	512.0	134	1024.0			
21							48	2.8			202	512.0	10	1024.0			
23							232	5.7			121	512.0	169	1024.0			

①GPS 试验卫星和未实施 SA 技术的 GPS 工作卫星之传输参数 N 均在 3 以内;若实际值比该值大达 40%以上,则应怀疑该卫星工作异常,而不宜选用该卫星作导航定位测量。

②实施 SA 技术的 GPS 工作卫星之 URA 值,通常为 32.0m;它既可用于判定 SA 技术实施与否,又可检验 SA 技术是否正常实施;若遇到 URA 值远超过 32m(如表 1 中的 512m 和 1024m),则知 GPS 工作卫星处于异常工作状态,不能用它们作导航定位测量。

③对于非特许用户而言,在选择 GPS 定位星座时,不仅要考虑 PDOP 数值的大小,而且应顾及每颗 GPS 卫星的 URA 值;对于超出“常规”URA 值的 GPS 卫星,应予以剔除,以便确保获得预期的导航定位精度。

在我们 1991 年 12 月所作车载 DGPS 试验中,所选择的在轨 GPS 工作卫星适逢刚刚恢复“正常”实施 SA 技术之后的有利时机*,因此,试测工作顾及到了上述各点。

2 选择适宜的 GPS 信号接收天线及其安设位置

载波相位测量是提高 GPS 卫星定位精度的有效方法,但是,在一次相位测量中,只能测量

* 据 File GPS,911203.1516 from U. S. Naval Observatory 知,自 1991 年 11 月 22 日零点钟开始至 12 月 15 日 23 时 59 分钟为止,美国国防部对在轨的 11 颗 GPS 工作卫星进行了工程试验。

小于一个周期(2π)的相位值,而不能测定相位的整周数。观测 GPS 卫星一次通过时,假定初始时元 t_1 的相位整周数为 n (称之为波数,亦叫模糊度或整周待定值),而测得该时元不足一个周期的小数部分 $\varphi(t_1)$,亦即载波在时元 t_1 的滞后相位

$$\varphi(t_1) = 2\pi n + \varphi(t_1) \quad (1)$$

在后续时元 t_2 ,如果能够记录从时元 t_1 到时元 t_2 的载波滞后相位所变化的整周数 $C(t_2)$,则知载波在时元 t_2 的滞后相位

$$\varphi(t_2) = 2\pi n + 2\pi C(t_2) + \varphi(t_1) \quad (2)$$

从式(1)(2)可见,不同时元 t_1, t_2 的载波相位测量值,都有一个共同的波数 n ,这意味着,在观测 GPS 卫星一次通过时,只要解算一个波数 n 。现行 GPS 信号接收机,正是测量不足一个周期的小数部分和记录初始时元 t_1 后的滞后相位所变化的整周数(简称为始后周数)。但是,由于运动载体的倾斜和转动等原因,致使 GPS 信号落于接收天线的方向截止角之内,从而引起接收机跟踪环路失锁,以致中断始后周数的记录,当接收机的跟踪环路重新锁定时,又重新开始记录始后周数,这种由于环路失锁而引起的始后周数丢失现象,叫做整周跳变,简称为周跳。这是一个使动态用户头痛的国际性难题!目前还缺乏有效的周跳修复技术;一般力图排除导致周跳的原因;例如,在机载 GPS 动态定位测量时,根据所用 GPS 接收天线不同的方向截止角,而规定不同的飞机倾斜限差。

为了避免对载体运行的过严限制,在选购 GPS 信号接收天线时,应充分注意天线方向截止角的大小。实验研究表明,随着天线设计和制作工艺之异,天线的方向截止角是相差较大的。例如,Trimble 动态天线的方向截止角为 15° ,而 Tecom 401170 型动态天线的方向截止角为 1° 。若选用 Tecom 天线,则有利于保持环路锁定的稳定性,不易产生周跳;若用 Trimble 天线,则应严格限制运动载体的倾斜和转动,以防止周跳频繁。我们认为,在运动载体两个不同的地方各安设一付 GPS 信号接收天线,也是一种防止周跳的有效措施。然而,防止周跳的最佳方法是,改进 GPS 信号接收机的现行设计。例如,刘基余提出的“步进法”,是用一个硬件实时地测得双频信号的传播时间差,而从站星距离的解算原理上彻底消除周跳,以此实现不存在周跳的动态载波相位测量。

在运动载体上安设 GPS 信号接收天线,不仅要选用视界开阔的地方,而且要特别注意多路径效应的影响。在 GPS 卫星定位误差中,多路径效应是 GPS 信号传播误差中一项极其重要的误差源。所谓“多路径误差”,就是反射波对直接波的破坏性干涉而引起的站星距离误差。后者的大小,既取决于反射波的强弱,又取决于 GPS 信号接收天线抗御反射波的能力。研究表明,在极端情况下,对 C/A 码测量的多路径误差可达几十米,对 P 码测量的多路径误差可达几米,对载波相位测量的多路径误差可达 5 厘米左右,且知

$$\varphi_m = \arctg \frac{A \sin \theta}{1 + A \cos \theta} \quad (3)$$

式中: φ_m ——多路径效应引起的载波附加相移;

θ ——反射波相对于直接波的相移,且知 $\theta = 2\pi d/\lambda$;此处 d 为反射波相对于直接波的程差, λ 是载波波长;

A ——地面或地物的反射系数,它的大小不仅随着反射面的粗糙程度不同而异,而且随着反射面的不同覆盖而变化。

为了抑制反射波,减小多路径误差,接收机的制作者们已采取了一定的措施。但在机载或星载 GPS 卫星定位测量时,不可能像在地面上作 GPS 测量那样,采用天线附设抑径板的方法

来减少多路径效应的影响。如果 GPS 动态天线附设以环形抑径圈,便可有效地抑制来自运动载体自身表面的反射波。美国喷气推进实验室 (JPL) 的初步实验表明,这种方法能使单频 P 码伪距的多路径误差的平均幅值从 1 米减少到厘米级。此外,在运动载体上安设 GPS 信号接收天线时,应该严格防止来自运动载体本身的串扰,后者不仅会给有用信号引入串扰噪声,而且可能“烧坏”天线前端,而无法进行定位测量。

3 车载 DGPS 1 秒数据率的动态载波相位测量

1991 年 12 月 20 日,当 11 颗 GPS 工作卫星刚刚恢复正常工作之后,我们用两台 Trimble 4000SST 双频接收机进行了车载 DGPS 测量试验;其主要目的是,采集 1 秒数据率的动态载波相位测量数据,用以检验我们自己编写的 DDKIN 测后数据处理软件。此处仅仅介绍动态载波相位测量数据的初步处理结果。

在 DGPS 动态定位环境下,动态载波相位测量的观测方程,(详见刘基余等编著,《全球定位系统原理及应用》,测绘出版社,1993)

$$\varphi\lambda = [(x^j - x_i)/\rho_i^j - (x^j - x_i)/\rho_i^j]\Delta x_i + [(y^j - y_i)/\rho_i^j - (y^j - y_i)/\rho_i^j]\Delta y_i + [(z^j - z_i)/\rho_i^j - (z^j - z_i)/\rho_i^j]\Delta z_i \quad (4)$$

式中

φ ——动态载波相位测量的剩余相位观测值;它是基准接收机和动态接收机在某一时刻 t 相对于时刻 t_0 的星际差分(某颗 GPS 卫星 j 和参考 GPS 卫星 j_0 之间)之差的函数;

λ ——载波的波长;

$x^{j_0} y^{j_0} z^{j_0}$ ——参考 GPS 卫星 j_0 在时刻 t 的在轨位置,依据它的星历而算得;

$x^j y^j z^j$ ——某颗 GPS 卫星 j 在时刻 t 的在轨位置,依据它的星历而算得;

x, y, z_i ——车载 GPS 信号接收天线在时刻 t 的位置初始值(估值);

$\Delta x, \Delta y, \Delta z_i$ ——车载 GPS 信号接收天线在时刻 t 的位置估值之改正数;

$\rho_i^{j_0}$ ——车载 GPS 信号接收天线至参考 GPS 卫星 j_0 的站星距离;

ρ_i^j ——车载 GPS 信号接收天线至某颗 GPS 卫星 j 的站星距离。

当基准接收机和动态接收机观测了 4 颗共视 GPS 卫星时,便可按式(4)算得在时刻 t 的动态天线相位中心的位置估值改正数,进而求得动态天线的三维实时位置。

在推导式(4)时,假定了动态天线的初始位置是已知的;故在 GPS 动态载波相位测量开始时,还需要按下列方法之一进行初始化测量:

(1)在具有厘米级精度的已知基线上作 5 分钟左右的静态相对定位测量;

(2)按照常规的 GPS 静态定位方法,在测区内的任意两点上作半个小时左右的相对定位测量。

初始化测量的数据处理,关键在于初始波数 n 的解算,目前主要有模糊函数法和最小二乘探索法解算。后者的实施方法是,用 PDOP 较小的四颗卫星观测值,算得遥探立方体每一个结点($\Sigma 8$)的双差相位波数,而确定滞后相位波数的探索范围;首先用所选择的 4 颗卫星的滞后相位波数,解算出动态接收机的三维坐标,进而用这些坐标值计算出其它卫星的滞后相位波数;当载波相位残差的二次项式为最小,且二次项式的最小值比次小值小达两倍左右时,取整最优波数,即可求得最终的双差载波相位解。

Trimble 4000SST 双频接收机,随机提供了静态和动态定位两种测后数据处理软件包——

Trimvec Plus, 目前发展到了 E 版本。为了检核我们所编 DDKIN 软件对动态载波相位测量数据的处理能力, 我们用 Trimvec Plus 的最新连续动态处理软件, 对上述车载 DGPS 试验的载波相位测量成果进行了数据处理; 表 2 摘录了部分处理结果, 表 3 是用 DDKIN 软件对同一载波相位测量成果的处理结果。比较表 2、表 3 所列出的动态天线三维相对位置可见:

(1) 在汽车行驶前(时元 451008 秒以前), 两种软件所算得的动态天线相对于基准站的三维位置, 其最大较差(δ_{3d}) 仅为 4.6mm。

(2) 汽车行驶后, 两种软件所算得的动态天线相对于基准站的三维位置, 其最大较差(δ_{3d}) 在 9mm 以内。

数据处理结果表明, DDKIN 软件具有良好的动态载波相位测量的数据处理能力。此外, DDKIN 软件, 还能解算出单点动态定位和伪距双差动态定位的实时点位; 图 1 表示用伪距双差解所描绘的上述车载 GPS 信号接收天线的运行轨迹。汽车沿着公路往返行驶, 而解算得它的往返轨迹, 后者与实际行驶路线符合一致; 这说明 DDKIN 软件完全可用于描绘运动载体的运行轨迹, 加上能对 DGPS 动态载波相位测量数据作精细解算, 而可求得动态天线的精确位置。

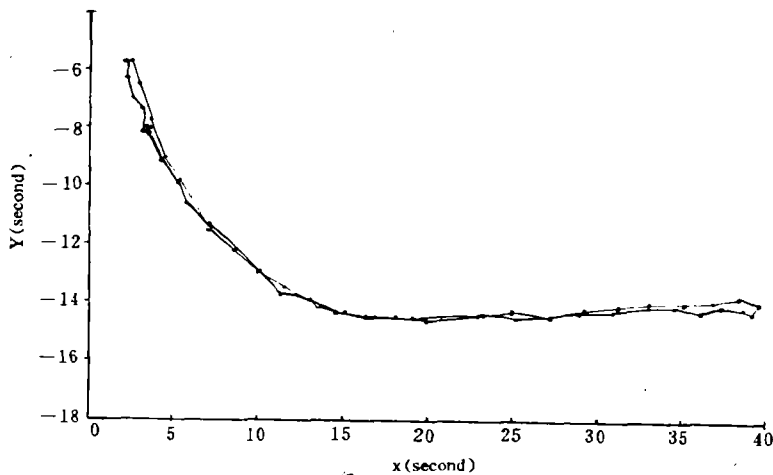


图 1 用伪距双差解所绘制的车载 GPS 信号接收天线的运行轨迹

卡尔曼滤波技术, 是一种处理动态定位数据的有效手段, 它可以显著地改善动态定位的点位精度。实验表明, 若在单点动态定位时采用卡尔曼滤波技术, 可使点位精度提高 14% 左右; 若用卡尔曼滤波技术处理 DGPS 数据, 可使点位精度提高 67%。因此, 卡尔曼滤波技术, 已在 GPS 动态测量中获得了较广泛的应用。在我们的研究中, 不仅力图用它来提高点位精度, 而且试图用卡尔曼滤波技术来探测和恢复动态载波相位测量的整圈跳变, 为此研究了双差相位滤波法和相对位置分量滤波法; 此处仅介绍双差相位滤波法的处理结果。

表 2 用 Trimvec Plus 求得的动态天线的相对位置

时元(Sec)	$\Delta x(m)$	$\Delta y(m)$	$\Delta z(m)$	RDOP	RMS
451005.055143	-134.696	78.722	-213.481	.231	.017
451006.079144	-134.709	78.721	-213.503	.231	.021
451007.103145	-134.909	78.775	-213.722	.231	.016
451008.127146	-135.372	78.905	-214.233	.231	.013
451009.151147	-136.110	79.097	-215.029	.231	.012

(续表 2)

时元(Sec)	$\Delta x(m)$	$\Delta y(m)$	$\Delta z(m)$	RDOP	RMS
451010.175149	-137.095	79.356	-216.087	.231	.011
451011.199150	-138.459	79.678	-217.510	.231	.029
451012.223151	-140.364	80.045	-219.341	.231	.019
451013.247152	-142.801	80.399	-221.564	.231	.019
451014.015153	-144.835	80.646	-223.344	.231	.018
451015.039154	-147.705	80.990	-225.826	.231	.017
451016.063155	-150.686	81.339	-228.415	.231	.008
451017.087156	-153.932	81.700	-231.200	.231	.014
451018.111158	-157.621	82.026	-234.241	.231	.014
451019.135159	-161.904	82.258	-237.593	.231	.011
451020.159160	-166.790	82.419	-241.241	.231	.012
451021.183161	-171.994	82.545	-245.037	.231	.010
451022.207162	-176.950	82.743	-248.808	.231	.014
451023.231163	-181.835	83.038	-252.660	.231	.012
451024.255165	-186.674	83.400	-256.561	.231	.014
451025.023166	-190.335	83.662	-259.476	.231	.011
451026.047167	-195.280	83.920	-263.308	.231	.017
451027.071168	-200.350	84.120	-267.162	.231	.004
451028.095169	-205.631	84.323	-271.169	.231	.003

表 3 用 DDKIN 求得的动态天线的相对位置

时元(Sec)	$\Delta x(m)$	$\Delta y(m)$	$\Delta z(m)$
451005.055143	-134.6960	78.7182	-213.4820
451006.079144	-134.7090	78.7164	-213.5032
451007.103145	-134.9101	78.7708	-213.7216
451008.127146	-135.3723	78.9001	-214.2353
451009.151147	-136.1108	79.0921	-215.0306
451010.175149	-137.0965	79.3514	-216.0890
451011.199150	-138.4609	79.6748	-217.5115
451012.223151	-140.3640	80.0403	-219.3454
451013.247152	-142.8028	80.3949	-221.5669
451014.015153	-144.8347	80.6409	-223.3494
451015.039154	-147.7064	80.9857	-225.8302
451016.063155	-150.6875	81.3337	-228.4201
451017.087156	-153.9329	81.6940	-231.2059
451018.111158	-157.6223	82.0202	-234.2475
451019.135159	-161.9071	82.2533	-237.5973
451020.159160	-166.7916	82.4127	-241.2483
451021.183161	-171.9970	82.5397	-245.0418
451022.207162	-176.9528	82.7368	-248.8142
451023.231163	-181.8381	83.0329	-252.6648
451024.255165	-186.6764	83.3938	-256.5671

时元(Sec)	$\Delta x(m)$	$\Delta y(m)$	$\Delta z(m)$
451025.023166	-190.3396	83.6565	-259.4800
451026.047167	-195.2851	83.9153	-263.3104
451027.071168	-200.3552	84.1144	-267.1656
451028.095169	-205.6347	84.3166	-271.1741

我们利用基准/动态接收机之间的双差载波相位观测值(φ_k)及其卡尔曼滤波估值 $\Phi_{k/k-1}$ 之差,探测始后周数的整周跳变;且规定周跳判定准则

$$|\Phi_{k/k-1} - \varphi_k| > 1$$

确定动态接收机是否发生了周跳;此处 φ_k 表示时元 t_k 的双差观测值(以周计), $\Phi_{k/k-1}$ 表示利用直到时元 t_{k-1} 的所有观测值求得时元 t_k 的双差载波相位估值(以周计)。图2~5表示利用上述车载DGPS数据所作的双差相位滤波法探测周跳的结果。

从图4可见,在时元段451006~451026秒和451040~451046秒之间,汽车的加速度发生波动,而导致图3、4中的双差相位一、二阶变化率在相应时元段的跃变,以致图5中的 $\Phi_{k/k-1}$ 和 φ_k 之差亦随之而跃变(其它时元的差值则在0.5周以内)。因此,即使无周跳产生,由于载体作非匀加速度运行,而导致 $|\Phi_{k/k-1} - \varphi_k| > 1$ 周,而无法依此探测周跳。

上述研究表明,当动态天线作匀加速度运行时,可以通过比较卡尔曼滤波估值与动态载波相应观测值之差来探测和恢复短时周跳;但是,若动态天线运行的加速度波动较大,载体的行驶轨道又高低起伏,动态载波相位的一、二阶变化率也随之跃变;在此场合下,卡尔曼滤波技术便难以用于探测和恢复动态载波相位测量的周跳。

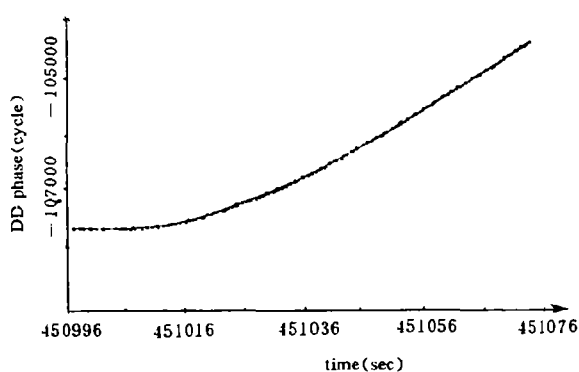


图2 双差载波相位的观测值

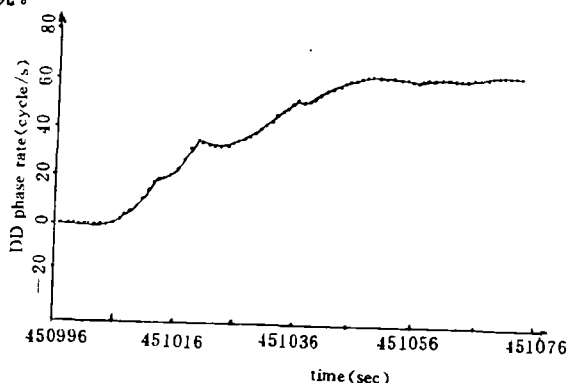


图3 双差载波相位的一阶变化率

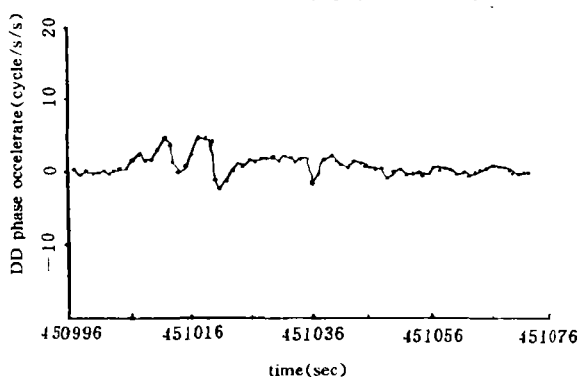
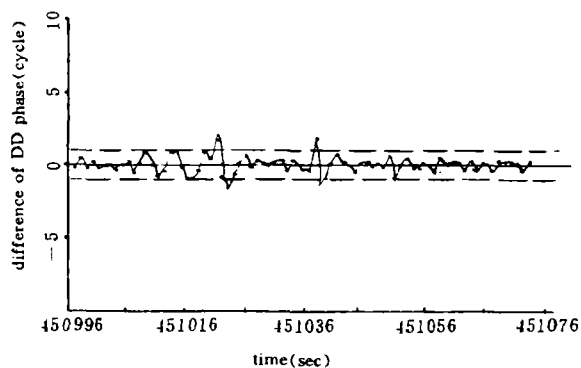


图4 双差载波相位的二阶变化率

图5 卡尔曼滤波估值($\Phi_{k/k-1}$)与其观测值(φ_k)之差

参 考 文 献

- 1 刘基余. GPS 工作卫星的 SA 技术. 导航, 1991(4)
- 2 Payne C R. NAVSTAR Global Positioning System; 1982, Proceedings of the Third International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning, February 1982. 993~1022
- 3 刘基余. GPS 卫星的 URA 值. 导航, 1993(1)
- 4 Liu Jiyu. A Real-time Solution for Measured Distances without Cycle Slips. Survey Review, 1993, 32(247)
- 5 Liu Jiyu. Multipath and GPS Station Selection, GPS World, 1991. 2(3)
- 6 Yunck T P, et al. Toward Centimeter Orbit Determination and Millimeter Geodesy with GPS. Proceedings of the 5th International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Las Cruces, New Mexico; 1989. 272~281
- 7 Mader G L. Dynamic Positioning Using GPS Carrier Phase Measurements. Manuscripta Geodaetica. 1986(11); 272~277
- 8 刘基余. GPS 定位技术在测绘中的作用和影响. 导航, 1992(2)
- 9 Lachapelle G, et al. High Precision C/A code Technology for Rapid Static DGPS Surveys. Presented to the 6th International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Columbus, Ohio; 1992.
- 10 李德仁. GPS 全球定位系统在航空遥感精确定位中的应用. 环境遥感, 1991(3)

Preliminary Researches on GPS Kinematic Positioning

Liu Jiyu Li Jingnian Chen Xiaoming

Abstract On the basis of DDKIN software for processing kinematic observations on carrier phases and results for a vehicle-borne DGPS this paper discusses the following performances for GPS kinematic positioning:

—— to select a suitable positioning constellation to consider the User Range Accuracies (URA) provided by the navigation message of GPS satellites;

—— to make choice of a suitable antenna and its setting-up site based on features of the motional carrier;

—— to process finely 4000SST data at the update rate of one second to adopt Trimvec Plus and DDKIN software written by these authors.

Key words GPS kinematic positioning; User Range Accuracy (URA); update rate of one second