

杨国辉. 多站载波相位差分 GPS 技术在风沙地貌台风响应模式研究中的应用与实现[J]. 华南地震, 2018, 38 (1):83-90. [YANG Guohui. Application and Implementation of Multi-station Carrier Phase Difference GPS in the Typical Research on the Typhoon Response Models of Aeolian Landform[J]. South China journal of seismology, 2018, 38(1):83-90.]

多站载波相位差分 GPS 技术在风沙地貌台风响应模式研究中的应用与实现

杨国辉

(广东惠州市惠阳区房产管理局房地产测绘所, 广东 惠阳 516211)

摘要: 根据海岸风沙地貌台风响应和单站载波相位差分 GPS 的特点, 提出了应用七参数 Δx 、 Δy 、 Δz 、 Ωx 、 Ωy 、 Ωz 、 K 的坐标平滑处理技术和求解高程异常值 ζ 进行曲面拟合的载波相位差分 GPS 技术, 从 2014 至 2017 年间对福建平潭岛海岸风沙地貌台风响应的观测点进行实际测量, 观测结果与精密水准测量观测出来的结果进行比较, 其高程误差范围在 0.1~3.3 cm 之间。表明多站载波相位差分 RTKGPS 技术的测量精度完全能满足海岸风沙地貌台风响应观测的精度要求。

关键词: GPS; 载波相位差分; 风沙地貌; 台风; 响应模式; 多站

中图分类号: P228.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2018) 01-0083-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.01.011

Application and Implementation of Multi-station Carrier Phase Difference GPS in the Typical Research on the Typhoon Response Models of Aeolian Landform

YANG Guohui

(Huizhou District Property Administration Real Estate Surveying and Mapping Office, Huizhou 516211, China)

Abstract: According to the coastal sand geomorphology typhoon response and the characteristics of single station carrier phase difference GPS, the paper puts forward the application of seven parameters (Δx 、 Δy 、 Δz 、 Ωx 、 Ωy 、 Ωz 、 K) of smoothing processing technology and solves the abnormal height coordinate value (ζ) curved surface fitting of multi-station carrier phase differential GPS technology. During 2014 and 2017, the paper does the actual measurement in Fujian Pingtan island coastal sand geomorphology typhoon response observation point. Comparing the observations results with the precise leveling observation results, the results show that elevation error range between 0.1 to 3.3 cm, which indicates that measurement precision of more standing carrier phase difference GPS can satisfy the requirement of the coastal sand geomorphology typhoon response observation precision.

Keywords: GPS; Carrier phase difference; Aeolian landform; Typhoon; Response model; Multi-station

收稿日期: 2017-12-08

作者简介: 杨国辉(1974-), 男, 工程师, 主要从事工程测量工作。

E-mail: 494500084@qq.com.

0 前言

风沙运动是一个不断变化的过程,对其地形变化的观测是其研究的基本手段之一^[1]。传统的海岸风沙观测方法通常有两种。第一种是:采用在观测区域内设定若干个标志(如埋石、插杆等)作为观测点进行定点观测,但由于这些点设定在沙质的地面上易发生位移、人为地破坏或被风沙刮掉,往往会导致观测失败,同时采取该设点方式的观测点密度不可能很大,也影响到观测结果的精度;第二种是:使用水准仪测量高程的变化,但该方法无法确定点的坐标。由于海岸风沙地形的变化量比较小,进行测量时的精度必须要达到厘米级^[2],这是传统观测技术难以达到的。而单站差分 RTKGPS 测量出来的坐标和高程精度只能达到分米级,本文根据风沙运动的特点和单站差分 RTKGPS 的特点,提出多站差分 RTKGPS 的测量方法,并通过对海岸风沙的实际观测检验其应用效果。

1 单站载波相位差分 GPS 技术

差分GPS 通常分为伪距差分 GPS 和载波相位差分 GPS^[3]。单站载波相位差分 GPS 是至少用两台 GPS 接收机,一合作为基准站,另一合作为移动台,同步观测相同的 GPS 卫星,确定两台接收机天线之间的相对位置差(差分值),从而实现移动台的高精度定位^[4]。

单站载波相位差分 GPS 的基本原理(图 1):将基准站采集的载波相位发给移动台,进行求解计算移动台的坐标、高程,也可以将基准站的载波相位修正值(差分值)发给移动台,改正移动台接收到的载波相位,再解算移动台的坐标、高程^[5]。由于受地球表面曲率的影响,基准站和移动台之间是一种非线性关系,而单站载波相位差分 GPS 计算出来的差分值是一种线性关系,用线性关系的数值改正与基准站为非线性关系的移动台的坐标,其精度只有分米级,无法满足风沙地貌运动厘米级的精度要求。

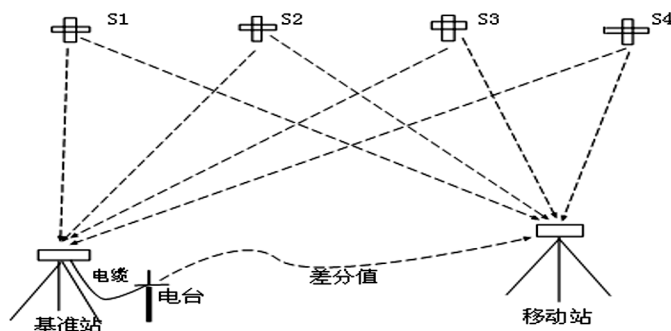


图 1 差分 GPS 测量原理图

Fig.1 The principle of difference GPS

2 多站载波相位 GPS 技术在海岸风沙运动中的观测原理

由于海岸风沙运动导致的地形高程变化量相对很少,一般最少的变化为厘米级^[6],同时 GPS 测量出来的坐标和高程是在一定的范围内是变化的,要满足厘米级的精度要求,就必须对在多个已知点上测量出来的 WGS-84 坐标进行平滑处理,并对其高程进行曲面拟合,以实现已知点对应的椭球体曲面和 WGS-84 坐标对应的椭球体曲面之间的拟合,这是采用多站 RTKGPS 技术进行海岸风沙运动中地形变化测量的关键。

2.1 坐标平滑处理方法

GPS 的坐标系统为 WGS-84 坐标系统,与我国的坐标系统(北京 54 或西安-80)不同^[7]。GPS 采用的椭球长半轴 $6378137 \pm 2 \text{ m}$, 扁率 $1:298.257$; 我国的坐标系统(以北京 54 为例)采用的椭球长半轴 6378245 m , 扁率 $1:298.30$ ^[8]。两种坐标系统的原点不同,扁率和长半轴不同,在实际的测量过程中,必须要找出它们之间的转换关系,进行坐标平滑处理,才能实现高精度的测量^[9]。具体采用七参数平滑处理的方法:

七参数平滑处理的方法是在至少已知三个点(多站点)的坐标前提下进行的。如图 2 所示: O_1 、 X_1 、 Y_1 、 Z_1 和 O_2 、 X_2 、 Y_2 、 Z_2 为转换前后的坐标系,两个坐标系相互间的旋转角为: Ω_x 、 Ω_y 、 Ω_z 。

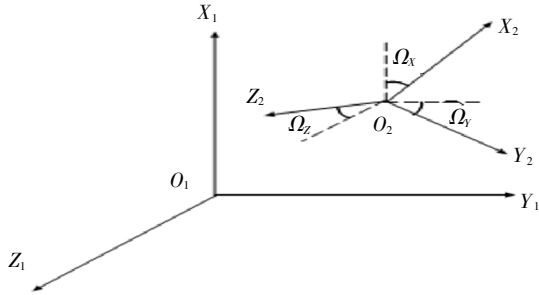


图 2 三维直角坐标系间的转换

Fig.2 The conversion between three-dimensional orthogonal coordinate

由于坐标轴之间的旋转, 旋转角为 Ω_X 、 Ω_Y 、 Ω_Z 所引起的坐标变换如下:

$$X_2 = (\cos\Omega_Y \cos\Omega_Z - \sin\Omega_X \sin\Omega_Y \sin\Omega_Z)X_1 + (\sin\Omega_Z \cos\Omega_Y - \sin\Omega_X \sin\Omega_Y \cos\Omega_Z)Y_1 - (\sin\Omega_Y \cos\Omega_Z)Z_1 \quad (1)$$

$$Y_2 = -(\sin\Omega_Z \cos\Omega_Z)X_1 + (\cos\Omega_Z \cos\Omega_X)Y_1 + (\sin\Omega_X)Z_1 \quad (2)$$

$$Z_2 = (\cos\Omega_Z \sin\Omega_Y - \sin\Omega_X \cos\Omega_Y \sin\Omega_Z)X_1 + (\sin\Omega_Z \sin\Omega_Y - \sin\Omega_X \cos\Omega_Y \cos\Omega_Z)Y_1 + (\cos\Omega_Y \cos\Omega_Z)Z_1 \quad (3)$$

当旋转角 Ω_X 、 Ω_Y 、 Ω_Z 很小时, 上式可简化成:

$$X_2 = X_1 + \Omega_Z Y_1 - \Omega_Y Z_1, \quad Y_2 = -\Omega_Z X_1 + Y_1 + \Omega_X Z_1, \quad Z_2 = \Omega_Z X_1 - \Omega_Y Z_1 + Z_1 \quad (4)$$

可以得到用矩阵形式表示的变换方程:

$$\begin{pmatrix} Y_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \Omega_Z & -\Omega_Y \\ -\Omega_Z & 1 & \Omega_X \\ \Omega_Y & -\Omega_X & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

把坐标轴的平移量 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 和尺度因子 K 一起考虑时得出公式(6):

$$\begin{pmatrix} Y_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} + (1+K) \begin{pmatrix} 1 & \Omega_Z & -\Omega_Y \\ -\Omega_Z & 1 & \Omega_X \\ \Omega_Y & -\Omega_X & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中: ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 是坐标原点平移引起的坐

标变换; $\begin{pmatrix} 1 & \Omega_Z & -\Omega_Y \\ -\Omega_Z & 1 & \Omega_X \\ \Omega_Y & -\Omega_X & 1 \end{pmatrix}$ 称为坐标系 1 变换到坐

标系 2 的旋转矩阵; Ω_X 、 Ω_Y 、 Ω_Z 是坐标轴旋转的角度; K 是尺度因子(一个无量的值), 它表明二坐标的长度标准稍有不同。

计算出 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 、 Ω_X 、 Ω_Y 、 Ω_Z 和 K 等参数后, 即可实现不同坐标之间的平滑处理。

2.2 高程拟合法

GPS 高程系统采用的是大地高程系统, 它是

与参考椭球体作为参照系的高程系统, 与我国以拟大地水准面作为基准面的高程系统不同。如图 3 所示: H_{84} 是 GPS 的高程, 属于大地高程; H_r 是以拟大地水准面作为基准面正常高高程。

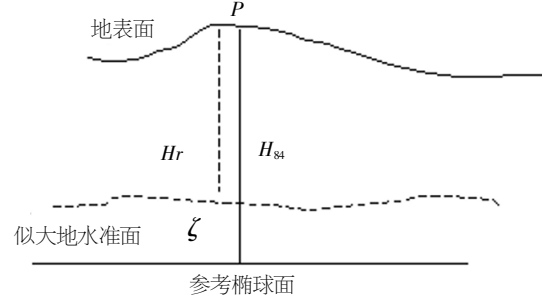


图 3 GPS 高程和正常高高程

Fig.3 The altitude of GPS and the altitude of level

由于 GPS 的卫星是运动型的卫星, 即使在一个位置利用不同的时间段进行观测得出来的坐标和高程也是不完全相同的, 但在长时间的风沙运动观测中必须每次都要对相同的点进行观测, 以求出风沙运动所引起地形高程的变化。要满足这些条件, 每次观测前必须要进行坐标的平滑处理和高程曲面拟合。

当 GPS 点布设成一定区域面时, 可以应用数学曲面拟合法求待定点的正常高。根据测区中已知点的平面坐标 X 、 Y (或大地坐标 B 、 L) 和 ζ 值(图 3), 用数值拟合法, 拟合出测区似大地水准面, 再内插出待求点的 ζ , 从而求出待求点的正常高。设点的 ζ 与平面坐标 X 、 Y 有以下关系:

$$\zeta = f(X, Y) + \varepsilon \quad (7)$$

其中, $f(X, Y)$ 为 ζ 趋势值, ε 为误差。

$$\text{设 } f(X, Y) = a_0 + a_1 X + a_2 Y + a_3 X^2 + a_4 Y^2 + a_5 XY + \dots \quad (8)$$

写成矩阵形式有:

$$\zeta = XB + \varepsilon \quad (9)$$

其中:

$$\zeta = \begin{bmatrix} \zeta_1 \\ \zeta_2 \\ \dots \\ \zeta_n \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_n \end{bmatrix}, \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix},$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & X_1 & Y_1 & X_1^2 & \dots \\ 1 & X_2 & Y_2 & X_2^2 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & X_n & Y_n & X_n^2 & \dots \end{bmatrix}$$

对于每个已知点, 都可以列出以上方程, 在 $\sum \varepsilon^2$ 趋向于零的条件下, 解出各 a_i , 再按 $\zeta = XB + \varepsilon$

式求出待求点的 ζ , 从而求出 Hr 。

3 多站差分 RTKGPS 技术在风沙运动观测中的应用

依据上述原理, 采用 G10A 载波相差分 GPS 测量系统, 对如何应用多站载波相位差分 GPS 技术进行海岸风沙地貌受台风响应中地貌变化进行

了野外实际测量, 并采用徕卡 0.3 mm 精密水准仪进行验证。观测地点为福建平潭岛(图 4)中的坛南湾白鸽屿后海岸沙丘。

3.1 观测区域

因平潭岛海岸沙丘的典型性和受台风影响的代表性, 选择平潭岛白鸽屿后海岸前丘(图 4)进行海岸沙丘形态对台风响应的观测与研究。

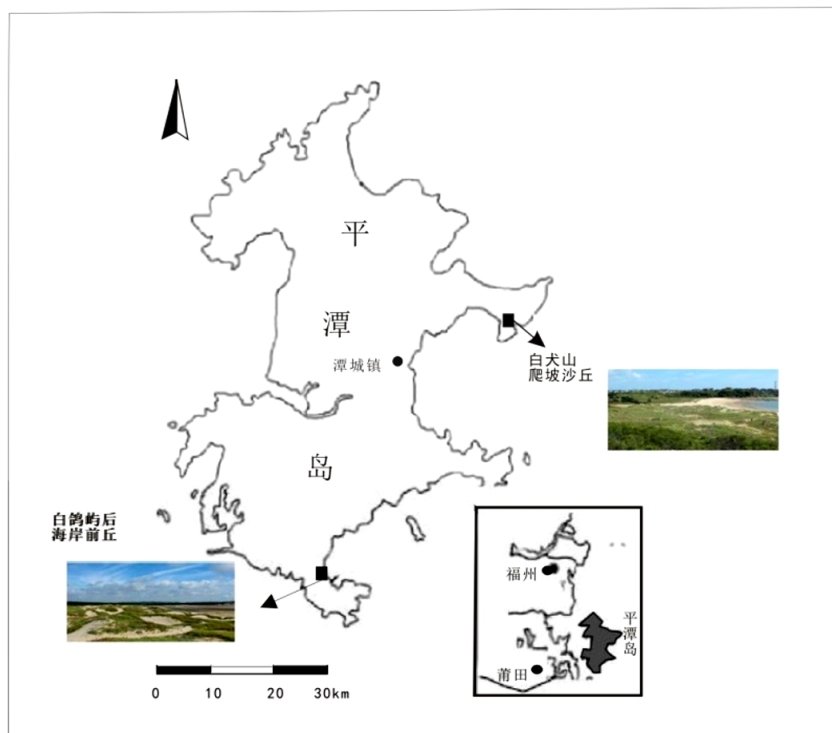


图 4 观测区域、观测点位置图及沙丘景观

Fig.4 Observation area, observation location map and sand dunes landscape

3.2 技术方法

选择在平潭岛海岸的两个典型海岸沙丘分布区设立野外定位观测点, 即位于平潭岛东南部的白鸽屿后(海岸前丘)典型点进行测量。

图 5 中黑色圆点为载波相位差分 GPS 第一次观测的点位, 基准点 J0、Y1、Y2 为已知点, 其坐标值、高程已知。在基准点设立基准站, 移动台分别到 Y1 点和 Y2 点进行观测, 并测量出该两点的 WGS-84 坐标, 通过地面的已知的 J0、Y1、Y2 点和对应的 GPS 测量出来的坐标、高程, 求解出 GPS 的 WGS-84 坐标与已知坐标 J0、Y1、Y2 的转换 7 参数及高程异常值参数(表 1、表 2)。

第二次及后面多次进行测量时, 把在 J0、Y1、Y2 求出的七参数及高程异常值输入到移动台的控制单元内, 应用 GPS 的导航功能, 每次观测都沿着

这些点进行观测。经过不同时段观测, 对各次测量相同点的高程进行相互比较, 即可分析出各时期的高程变化, 从而实现了观测不同环境、不同时间下的海岸风沙地貌台风响应的地貌变化。

3.3 观测结果

根据已知点坐标(J0、Y1、Y2)和 GPS 在这些已知点上测定的 WGS-84 坐标和高程, 经计算后得出的拟合参数如表 1。

从 2014 年 7 月 14 日开始至 2017 年 7 月 30 日, 共观测了 20 次, 每次测量相同 315 个点, 表 3 为第 20 次(2017 年 7 月 30 日)观测 315 个点中的 1001 号点至 1080 号点共 80 个点的坐标数据(Y、X)和高程数据(Hr), 利用精密水准仪测量对应点的高程 h, 利用相同的点的高程比较, 即可计算出其误差值。

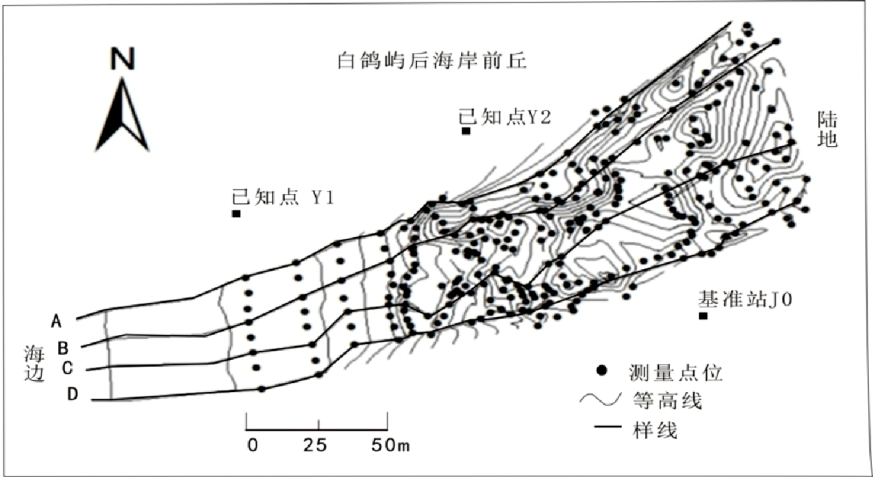


图 5 白鸽屿后(海岸前丘)观测位置图
Fig.5 Observation location map of BaiGeYuHou

表 1 福建平潭岛已知点坐标

Table 1 The known coordinate of Pingtan island, Fujian province

坐标	J0 点	Y1 点	Y2 点
<i>X</i>	2 812 539.045	2 813 657.328	2 814 523.503
<i>Y</i>	474 960.514	4 746 357.16	4 748 469.106
<i>H</i>	20.807	14.630	13.337

表 2 福建平潭岛拟合参数

Table 2 The fitting parameters of Pingtan island, Fujian province

Ω_x	Ω_y	Ω_z	ΔX	ΔY	ΔZ	<i>K</i>	ζ
000°079 500.804	000°099 360.227	000°069 030.351	47.315 672	71.024 162	37.275 386	0.991 254 751 4	4.527

表 3 2017 年 7 月 30 日载波相位差分 GPS 测量的高程以精密水准仪测量高程比较

Table 3 The comparison of carrier phase difference GPS measurement elevation and the leveling elevation on July 30th, 2017

观测点序号	载波相位差分 GPS 测量结果			精密水准仪测量/m	误差/m
	<i>Y</i>	<i>X</i>	<i>H_r</i>	<i>h</i>	<i>h-H_r</i>
1001	474 732.442	2 812 360.97	13.459	13.431	-0.028
1002	474 730.976	2 812 364.36	13.441	13.414	-0.027
1003	474 729.976	2 812 367.78	13.436	13.422	-0.014
1004	474 729.318	2 812 369.71	13.434	13.42	-0.014
1005	474 728.351	2 812 373.20	13.423	13.385	-0.038
1006	474 727.471	2 812 376.96	13.404	13.393	-0.011
1007	474 726.603	2 812 379.71	13.382	13.381	-0.001
1008	474 739.738	2 812 384.22	13.591	13.592	0.001
1009	474 740.124	2 812 380.29	13.595	13.594	-0.001
1010	474 740.211	2 812 376.84	13.593	13.585	-0.008
1011	474 740.401	2 812 374.39	13.601	13.584	-0.017
1012	474 740.800	2 812 370.10	13.587	13.6	0.013
1013	474 741.278	2 812 366.34	13.603	13.591	-0.012
1014	474 742.631	2 812 361.14	13.612	13.61	-0.002
1015	474 759.548	2 812 363.01	13.865	13.978	0.113

(转下表)

(接表 3)

观测点序号	载波相位差分 GPS 测量结果			精密水准仪测量/m	误差/m
	<i>Y</i>	<i>X</i>	<i>Hr</i>	<i>h</i>	<i>h-Hr</i>
1016	474 759.611	2 812 363.52	13.856	13.969	0.113
1017	474 759.164	2 812 367.34	13.840	13.862	0.022
1018	474 759.062	2 812 370.27	13.799	13.845	0.046
1019	474 758.851	2 812 373.87	13.849	13.853	0.004
1020	474 757.938	2 812 377.67	13.816	13.852	0.036
1021	474 757.011	2 812 381.91	13.816	13.845	0.029
1022	474 755.801	2 812 386.69	13.805	13.809	0.004
1023	474 766.837	2 812 392.18	14.032	14.071	0.039
1024	474 767.680	2 812 388.25	14.062	14.074	0.012
1025	474 767.786	2 812 384.02	14.050	14.061	0.011
1026	474 768.059	2 812 380.94	14.062	14.072	0.010
1027	474 768.427	2 812 377.01	14.058	14.085	0.027
1028	474 768.851	2 812 373.22	14.065	14.101	0.036
1029	474 769.386	2 812 369.44	14.081	14.112	0.031
1030	474 770.691	2 812 363.98	14.093	14.115	0.022
1031	474 782.389	2 812 367.48	14.557	14.581	0.024
1032	474 781.894	2 812 371.29	14.491	14.571	0.080
1034	474 781.178	2 812 375.24	14.458	14.503	0.045
1035	474 780.073	2 812 379.55	14.440	14.520	0.080
1036	474 779.685	2 812 383.43	14.432	14.525	0.053
1037	474 779.003	2 812 387.14	14.405	14.415	0.010
1038	474 778.231	2 812 392.29	14.387	14.379	-0.008
1039	474 777.713	2 812 395.79	14.382	14.366	-0.016
1040	474 786.303	2 812 400.64	14.853	14.845	-0.008
1041	474 786.899	2 812 396.48	14.866	14.901	0.035
1042	474 787.385	2 812 391.48	14.896	14.851	-0.045
1043	474 787.854	2 812 386.94	14.930	14.922	-0.008
1044	474 788.583	2 812 383.51	15.044	15.023	-0.021
1045	474 789.198	2 812 379.67	15.048	15.071	0.023
1046	474 790.008	2 812 375.22	15.147	15.079	-0.068
1047	474 799.227	2 812 376.88	16.761	16.754	-0.007
1048	474 798.491	2 812 379.34	16.739	16.776	0.037
1049	474 797.75	2 812 382.13	16.606	16.613	0.007
1050	474 797.582	2 812 385.10	16.620	16.658	0.038
1051	474 797.582	2 812 385.10	15.545	15.566	0.021
1052	474 797.985	2 812 387.51	15.548	15.577	0.029
1053	474 798.475	2 812 389.74	15.689	15.722	0.033
1054	474 797.651	2 812 393.09	15.439	15.454	0.015
1055	474 797.274	2 812 396.26	15.453	15.429	-0.024
1056	474 796.287	2 812 399.62	15.407	15.415	0.008
1057	474 795.295	2 812 403.44	15.315	15.339	0.024
1058	474 799.677	2 812 406.40	15.679	15.652	-0.027
1059	474 802.064	2 812 406.20	15.905	15.921	0.016
1060	474 801.999	2 812 404.32	16.535	16.558	0.023
1061	474 802.449	2 812 402.24	16.755	16.781	0.026

(转下表)

(接表 3)

载波相位差分 GPS 测量结果				精密水准仪测量/m	误差/m
观测点序号	<i>Y</i>	<i>X</i>	<i>Hr</i>	<i>h</i>	<i>h-Hr</i>
1062	474 802.239	2 812 399.95	16.426	16.403	-0.023
1063	474 802.250	2 812 398.08	16.456	16.461	0.005
1064	474 802.625	2 812 395.37	16.435	16.401	-0.034
1065	474 802.312	2 812 393.91	16.17	16.176	0.006
1066	474 800.890	2 812 392.21	16.342	16.327	-0.015
1067	474 800.102	2 812 389.69	16.756	16.717	-0.039
1068	474 801.001	2 812 388.68	16.527	16.572	0.045
1069	474 800.890	2 812 387.16	16.738	16.785	0.047
1070	474 800.646	2 812 385.50	17.468	17.419	-0.049
1071	474 800.523	2 812 383.63	16.815	16.801	-0.014
1072	474 801.110	2 812 381.28	16.731	16.712	-0.019
1073	474 801.607	2 812 379.84	16.626	16.641	0.015
1074	474 802.267	2 812 378.17	16.619	16.699	0.08
1075	474 806.917	2 812 378.28	16.888	16.865	-0.023
1076	474 807.250	2 812 380.22	17.129	17.125	-0.004
1077	474 805.351	2 812 382.66	16.868	16.878	0.01
1078	474 808.428	2 812 382.22	17.072	17.066	-0.006
1079	474 809.731	2 812 385.46	17.315	17.319	0.004
1080	474 810.390	2 812 387.18	17.296	17.288	-0.008

分析表 3 得出:精密水准仪测量的高程和载波相位差分 GPS 测量出来高程之差值,最大为 5 cm,最小为 1 mm。

表 4 19 次不同时间观测的精密水准仪与载波相位 GPS 测量高程值比较
Table 4 Comparison of elevation values measured by carrier phase GPS and precision level at 19 different times

观测时间	<i>h-Hr/cm</i>	
	最大值	最小值
2014-07-14	3.3	1.0
2014-09-07	1.9	0.9
2014-12-14	2.7	1.0
2015-01-25	2.8	0.8
2015-03-03	2.1	1.1
2015-05-01	3.7	0.8
2015-07-18	1.9	0.6
2015-08-27	2.4	0.8
2015-10-14	2.7	1.4
2015-12-10	3.1	0.9
2016-02-28	2.4	0.8
2016-05-07	2.0	0.6
2016-07-13	2.1	0.5
2016-09-20	2.7	0.8
2016-10-03	2.8	0.8
2016-12-04	2.2	0.7
2017-02-10	2.1	0.7
2017-05-02	2.8	0.7
2017-07-29	1.7	1.1

2014 年 7 月 14 日上午第一次测量至 2017 年 7 月 29 日 19 次观测,载波相位差分 GPS 各次观测高程数据以精密水准仪测量高程数据比较的最大值和最小值(表 4)。

分析表 4 得出:2014 年 7 月 14 日至 2017 年 7 月 29 日 19 次观测中,相同点高程误差最大为 3.3 cm,最小为 0.5cm,全部在 cm 范围内。

4 结语

由于海岸风沙地貌受台风响应的变化量比较少,使用传统的观测方法无法对其点位坐标和相应的高程进行精密的观测,经过多站载波相位差分 GPS 技术求解坐标拟合参数及高程异常值的方法,观测的精度达到了厘米甚至毫米级的精度,通过用精密水准测量方法对相同的观测点测定其高程,并以拟合后的载波相位差分 GPS 测量的相同点位的高程进行比较,可以得出,其点位误差均在厘米级范围内,表明多站载波相位 GPS 测量完全满足了海岸风沙运动观测的精度要求。

多站 RTKGPS 测量能够全天候实时地测定出空间任一点的三维坐标,基准站与移动台之间无须通视,同时在测量区域内无须为待测点做标志,直接采取导航的方式引导到待测点进行测量,无论在精度还是在工作方式上都是传统测量方法无法比拟的,实践证明也是可行的。

参考文献:

- [1] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2003:1-40
- [2] 韩致文,董治宝,王涛. 塔克拉玛干沙漠风沙运动若干特征观测研究[J]. 中国科学(D辑)2003,33(3):255-263.
- [3] KEE C,PARKINSON B W, AXELRAD P.Wide Area Differential GPS [J]. Journal of the Institute of Navigation, 1991,38(2):123-135.
- [4] 王广运. 载波相位差分 GPS 定位技术. 测绘工程[J]. 1999,8(1):12-14.
- [5] PAIELLI B,MENALLY D,BBCH R E. Carrier phase differential GPS of approach and landing:algorithms and preliminary results [C]. Salt Lake City:Proc.of the sixth International Technical Meeting, 1993:831-840.
- [6] 刘贤万. 实验风沙物理与风沙工程学[M]. 北京:科学出版社,1995:1-20.
- [7] LANGLEY R.Time Clock and GPS [J]. GPS World Magazine,1991,11(2):38-42.
- [8] 国家质量技术监督局. 海道测量规范 GB12327-1998[S]. 北京:中国标准出版社,1999.
- [9] 黄德全,董玉祥,哈斯,等. 多站差分 RTKGPS 技术在海岸风沙观测中的应用[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2007,46(4):121-124.