

多站差分 RTKGPS 技术在海岸风沙观测中的应用*

黄德全¹, 董玉祥¹, 哈 斯², 马 骏¹
(1. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275;
2. 北京师范大学资源学院, 北京 100871)

摘 要: 根据海岸风沙运动的特点和单站差分 RTKGPS 的特点, 提出了应用多站计算 7 个参数 Δx Δy Δz Ω_x Ω_y Ω_z 和 K 的坐标平滑处理技术和求解高程异常值 ζ 进行曲面拟合的多站差分 RTKGPS 技术, 并对海岸风沙观测点的高程进行实际测量, 选取 186 个观测点的结果与传统的水准测量观测出来的结果进行比较, 其高程误差范围在 0.6~1.0 mm 之间。表明多站差分 RTKGPS 技术的测量精度能满足海岸风沙观测的精度要求。
关键词: 单站差分 RTKGPS 技术; 多站差分 RTKGPS 技术; 海岸风沙运动观测
中图分类号: P228.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2007) 04-0121-04

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]。传统的风沙运动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 单站差分 RTKGPS 技术

差分 GPS 通常分为伪距差分 (RTDGPS) 和载波相位差分 (RTKGPS)^[3]。单站差分 GPS 是至少用两台 GPS 接收机, 一台作为基准站, 另一台作为移动台, 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]。

单站差分 RTKGPS 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

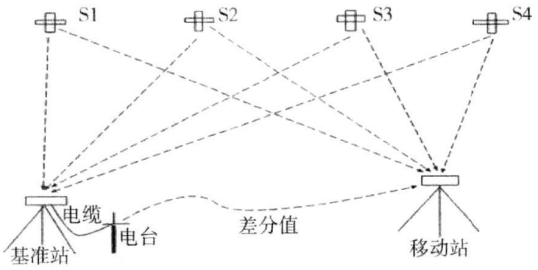


图 1 差分 GPS 测量原理图
Fig 1 The Principle of difference GPS

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, 而单站差分 RTKGPS 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, 无法满足风沙运动厘米级的精度要求。

2 多站差分 RTKGPS 技术的观测原理

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。

* 收稿日期: 2006-06-29
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40571019); 中山大学实验室开放基金资助项目 (KF2006-7)
作者简介: 黄德全 (1964 年生) 男, 工程师, E-mail: gpshdq@mail.sysu.edu.cn
(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.1 坐标平滑处理方法

GPS的坐标系为 WGS-84 坐标系, 与我国的坐标系 (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 (以北京 54 为例) 采用的椭球长半轴 6378245m 扁率 $1:298.30$ ^[8]。两种坐标系的原点不同, 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。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 3 个点 (多站点) 的坐标前提下进行的。如图 2 所示: $Q_1 X_1 Y_1 Z_1$ 和 $Q_2 X_2 Y_2 Z_2$ 为转换前后的坐标系, 两个坐标系相互间的旋转角为: $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$

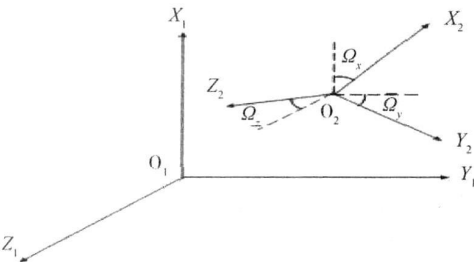


图 2 三维直角坐标系的转换
Fig 2 The conversion between three-dimensional orthogonal coordinate

由于坐标轴之间的旋转, 旋转角为 $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$ 所引起的坐标变换如下:

$$X_2 = (\cos\Omega_x \cos\Omega_y \cos\Omega_z - \sin\Omega_x \sin\Omega_y \sin\Omega_z) X_1 + (\sin\Omega_z \cos\Omega_y \sin\Omega_x \sin\Omega_y \sin\Omega_z) Y_1 - (\sin\Omega_y \cos\Omega_z) Z_1 \quad (1)$$

$$Y_2 = -(\sin\Omega_z \cos\Omega_x) X_1 + (\cos\Omega_z \cos\Omega_x) Y_1 + (\sin\Omega_x) Z_1 \quad (2)$$

$$Z_2 = (\cos\Omega_z \sin\Omega_y - \sin\Omega_z \cos\Omega_y \sin\Omega_x) X_1 + (\sin\Omega_z \sin\Omega_y - \sin\Omega_x \cos\Omega_y \cos\Omega_z) Y_1 + (\cos\Omega_y \cos\Omega_z) Z_1 \quad (3)$$

当旋转角 $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$ 很小时, 式 (1) - (3) 可简化成:

$$X_2 = X_1 + \Omega_z Y_1 - \Omega_y Z_1, Y_2 = -\Omega_z X_1 + Y_1 + \Omega_x Z_1, Z_2 = \Omega_z X_1 - \Omega_y Z_1 + Z_1 \quad (4)$$

可以得到用矩阵形式表示的变换方程:

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \Omega_z & -\Omega_y \\ -\Omega_z & 1 & \Omega_x \\ \Omega_y & -\Omega_x & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

把坐标轴的平移量和尺度因子 K 一起考虑时得出公式 (6):

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} + (1 + K) \cdot \begin{pmatrix} 1 & \Omega_z & -\Omega_y \\ -\Omega_z & 1 & \Omega_x \\ \Omega_y & -\Omega_x & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中, $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$ 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; $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$ 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 $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$ 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 是以拟大地水准面作为基准面正常高程。

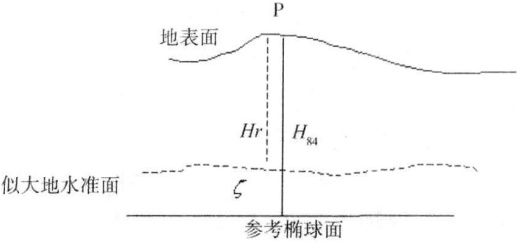


图 3 GPS 高程和正常高程
Fig 3 The altitude of GPS and the altitude of level

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。曲面拟合的方法如下:

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, 从而求出待求点的正常高。设点的与平面坐标 X, Y 有以下关系:

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

其中， $\zeta(X, Y)$ 为 ζ 趋势值， ϵ 为误差。

设 $\zeta(X, Y) = a_0 + a_1 X + a_2 Y + a_3 X^2 + a_4 Y^2 + a_5 XY + \dots$ (8)

写成矩阵形式有

$$\zeta = XB + \epsilon \tag{9}$$

其中:

$$\zeta = \begin{bmatrix} \zeta_1 \\ \zeta_2 \\ \vdots \\ \zeta_n \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix}, \epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix},$$
$$X = \begin{bmatrix} 1 & X_1 & Y_1 & X_1^2 & \dots \\ 1 & X_2 & Y_2 & X_2^2 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_n & Y_n & X_n^2 & \dots \end{bmatrix}$$

对于每个已知点，都可以列出以上方程，在 $\sum \epsilon^2$ 趋向于零的条件下，解出各 a_i ，再按 $\zeta = XB + \epsilon$ 式求出待求点的 ζ ，从而求出 H_r 。

3 多站差分 RTKGPS技术的应用

依据上述原理，采用 HD5800G (1+1) RTKGPS测量系统，对如何应用多站 RTKGPS技术进行海岸风沙运动中地形变化的测量进行了野外实际运用和验证。观测地点为河北省昌黎县翡翠岛海岸沙丘 (图 4)。

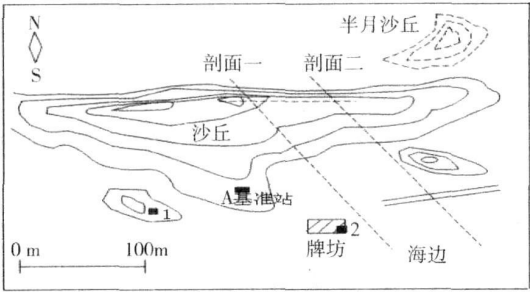


图 4 河北昌黎翡翠岛海岸沙丘地形图

Fig 4 The reliefmap of coastal dunes in Feicui island Changli Hebei Province

3.1 观测方法

图 4 中虚线部分是观测剖面路线图，每次观测都是沿着相同的虚线部分进行观测。点 A 1、2 为已知点，其坐标值、高程已知。在 A 点设立基准站 (对中、整平)，移动台分别到 1 点和 2 点进行观测 (对中、整平)，采用七参数转换方法求解出 GPS 的 WGS-84 坐标与已知坐标的转换参数及拟合参数 (注：为了统一观测的基准，每次观测必须要以 A 1、2 点作为求解参数的基准) (表 1)。

把在 A 1、2 点上求出的参数输入到移动台的控制器内 (或电脑)，同时移动台按照 1 秒钟的间隔接收来自基准站的差分信号，这样移动台的精度就可以达到厘米级。然后，把各剖面测量点的坐标数据输入到移动台的控制器内，应用 GPS 的导航功能，每次观测都沿着这些点进行观测。经过不同时段的观测，对各剖面内相同点的高程进行比较，即可分析出各时期的高程变化，从而实现了观测不同环境、不同时间下的海岸沙丘的地貌变化。

根据已知点坐标计算后得出的拟合参数如表 1 所示。

表 1 河北昌黎翡翠岛已知点坐标及拟合参数

Tab 1 The known coordinate and parameter in Feicui island Changli Hebei Province

	A点	1点	2点
X	4379695.695	4379432.113	4379726.701
Y	40436995.981	40436970.884	40437035.242
H	20.000	14.630	13.337
拟合参数			
Ω_x	$-000^{\circ}06'50''.569$	ΔY	72.016786
Ω_y	$000^{\circ}08'41''.138$	ΔZ	36.776853
Ω_z	$000^{\circ}07'00''.041$	K - a	004197228906
ΔX	-51.248662		

3.2 观测结果

对比分析两次观测结果，可以较好地分析海岸风沙运动过程中沙丘形态的变化 (表 2 图 5)，为了解和认识海岸风沙运动过程及其机理提供基本

表 2 相同坐标点高程的变化¹⁾

Tab 2 The variation of elevations in the same coordinate point

高程 Z1	高程 Z2	(Z2-Z1)	高程 Z3	(Z3-Z2)
12.512	12.609	0.097	12.621	0.012
12.806	13.018	0.212	13.023	0.005
15.971	15.930	-0.041	15.343	-0.587
16.214	16.341	0.127	16.358	0.017
14.671	14.970	0.299	14.899	-0.071
14.551	14.877	0.326	14.892	0.015
14.794	14.760	-0.034	14.771	0.011
15.432	15.400	-0.032	15.389	-0.011
15.746	15.597	-0.149	15.621	0.024
16.369	16.236	-0.133	16.241	0.005
14.442	14.729	0.287	14.694	-0.035
14.670	14.565	-0.105	14.709	0.144
14.779	15.246	0.467	15.331	0.085
14.773	14.686	-0.087	14.690	0.004
14.355	14.519	0.164	14.487	-0.032

1) 高程单位为 m.

依据, 表 2 是剖面二部分点不同时段应用多站差分 RTKGPS 进行观测的结果。其中: Z_1 为 2006 年 4 月 14 日测量的部分点高程, Z_2 为 2006 年 11 月 12 日测量的部分点高程, Z_3 为 2007 年 1 月 30 日测量的部分点高程。

图 5 为 2006 年 11 月 12 日和 2007 年 1 月 30 日测量的剖面图。

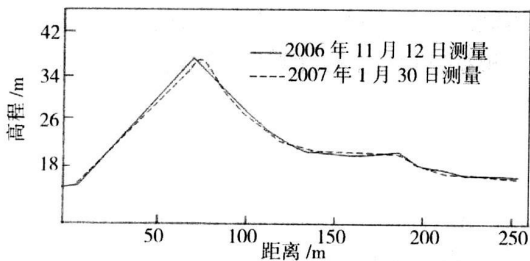


图 5 2006 和 2007 年剖面二两次测量的高程变化
Fig 5 The variation of the profile section 2 measured in 2006 and 2007

为了验证多站差分 RTKGPS 测量出来的数据的可靠性, 利用精密水准仪从图 5 中的 A 点开始, 沿着各剖面的相同的测量点进行测量, 选取了 186 个精密水准仪测量出来的高程和多站差分 RTKGPS 移动台测量出来的高程进行比较, 其误差值在 0.6 至 1.0 mm 之间, 证明多站差分 RTKGPS 的测量方法完全满足海岸沙丘厘米级的精度要求。

4 结 语

由于风沙运动的变化量比较少, 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, 经过多站差分 RTKGPS 技术求解坐标的平滑

参数及采用曲面拟合求解高程异常的方法, 观测的精度达到了厘米甚至毫米级的精度, 通过对相同点以水准测量方法求出的高程进行比较可以得出, 其误差在 1 mm 的范围内, 表明多站 RTKGPS 技术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[J]. 测绘工程, 1999: 8(1): 12—14
[5] PAELLIS, MENALLY D, BACH R E. Carrier Phase differential GPS of approach and landing algorithms and preliminary results[C] // Proc of the sixth international technical meeting, ION GPS—93, Salt Lake City, USA, 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] 中国国家技术监督局. 海道测量规范 GB12327-1998[S]. 1998

The Application of Multi station RTKGPS in the Measurement of Coastal Dune

HUANG De-quan, DONG Yu-xiang, HAN J, MA-jun

(1. School of Geographic and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. School of Resource, Beijing Normal University, Beijing 100871, China)

Abstract: According to the properties of coastal dune movement and single station RTKGPS, the multi station RTKGPS technology calculating seven parameters (Δx , Δy , Δz , Ω_x , Ω_y , Ω_z , K) and the error value of elevation was studied in this paper. To measure the elevation of the coastal dune movement with this technology, 186 points were chosen to compared with the points measured by leveling. The range of the error is 0.6mm to 1.0 mm. The precision of multi station RTKGPS technology can completely meet the precision of coastal dune movement measurement.

Key words: single station RTKGPS technology; multi station RTKGPS technology; measurement of the coastal dune movement