

利用相位率和多普勒确定载体速度的比较

肖 云¹ 夏哲仁¹

(1 西安测绘研究所, 西安市雁塔路中段 1 号, 710054)

摘 要: 利用 GPS 可以测定载体的运动速度, 多普勒观测值可以用于测速, 由相位观测值导出的相位变化率(即相位率)也可以用于速度测定, 但是它们的精度和特性有很大的区别。阐述了两者的异同点, 提出了一种新的周跳探测方法——双差相位率粗差法, 然后分别使用 GPS 测量数据中这两种不同的观测值计算了载体速度, 对处理结果进行了对比和分析。

关键词: 多普勒; 相位率; GPS; 速度; 周跳

中图法分类号: P228.42

近几年来, 国外一些相关研究机构做了一些 GPS 测速试验^[1~4], 国内也有一些相关研究^[5~8], 但它们均未给出除精度外导出相位率与原始多普勒的其他区别, 也未对导出相位率过程中周跳问题的解决作出说明。本文从原理上深入剖析了两者之间的异同点, 提出了一种适合高采样率情况下的周跳处理方法——双差相位率粗差法。

1 原始多普勒与相位率的异同点

这两种观测值都描述了某时刻测站到卫星的距离变化率, 在解算运动载体的速度时使用相同的数学模型, 在评估精度时, 使用的方法也一致。不同点表现为: ① 来源不同, 原始多普勒是接收机提供的一种观测值, 而相位率是数据后处理过程中导出的观测值; ② 描述的速度有差别, 原始多普勒描述采样时刻的瞬时速度(不完全是瞬时, 也经过了一定时间的平滑), 而相位率描述了采样间隔内的平均速度; ③ 精度差别很大, 原始多普勒的精度与接收机类型有关, 不同的接收机给出的观测值精度不同, 一般说来精度好于 2cm/s, 另外还有不同程度的时间延迟, 如 Ashtech G12 给出的多普勒有 0.25s 的时间延迟(1Hz)^[3], 相位率的精度要明显好于原始多普勒的精度, 使用相位时序差分方法, 采样率为 1Hz 的情况下, 精度是 1~2mm/s, 而且无时间延迟; ④ 与受具体测量动态环境影响的大小不同, 由于原始多普勒是使用较短的时间间隔内的相

位导出的, 因此受载体运动状态的影响较小, 而相位率受载体运动状态的影响较前者大; ⑤ 原始多普勒没有周跳的问题, 而由相位导出相位率的过程中需要探测并处理周跳。

2 高采样率条件下周跳探测的新方法

周跳探测与修复的方法很多, 如多项式拟合法、线性拟合法和双频 P 码伪距修正周跳等^[9], 但考虑到实际情况, 为了更有效地解决问题, 需要探讨新的周跳探测技术。

相位时序差分方法导出相位率时, 周跳影响周跳历元和前一历元的相位率, 其表现为粗差且表现在两个相邻历元上, 同时粗差在数值上是差不多的。双差相位率的变化非常平缓, 高采样率的数据间隔是 1.0s、0.2s 甚至 0.1s; 多普勒观测值不受周跳的影响, 其精度比较高, 通常好于 2cm/s, 且周跳少。

根据这些特点, 笔者设计和发展了很实用的识别周跳的方法——双差相位率粗差法, 其使用的基本观测量是双差相位观测值, 由它导出双差相位率的表达式为:

$$\nabla\Delta\phi(i) = \frac{\nabla\Delta\phi(i+1) - \nabla\Delta\phi(i-1)}{2\Delta t} \quad (1)$$

式中, $\nabla\Delta\phi(i)$ 是 i 时刻双差相位率; $\nabla\Delta\phi(i+1)$ 和 $\nabla\Delta\phi(i-1)$ 分别是 $i+1$ 和 $i-1$ 时刻的双差相位观测值; Δt 是采样时间间隔。假设在 i 时刻, 动态站接收的一颗卫星相位信号发生了大小为

1周的周跳,如果采样率为1s,由式(1)导出的双差相位率的粗差为0.5周;如果采样率为0.2s,粗差为2.5周,放大了5倍。利用这一带粗差的相位率与双差多普勒比较,可以发现周跳。

判别是否有周跳包括一些检验量,第一个检验量是 ϵ ,其表达式为:

$$\epsilon(i) = \nabla\Delta\phi(i) - \nabla\Delta D(i) \quad (2)$$

式中, $\nabla\Delta D(i)$ 是*i*时刻双差多普勒相位率,其他符号意义同前。一般来说, $\epsilon(i)$ 很小,如果它大于某个阈值(不同采样率对应不同的值),说明可能有周跳发生,为了更进一步确认是否有周跳,再按式(2)分别计算 $\epsilon(i-1)$ 和 $\epsilon(i+1)$,然后构成另外两个检验量 η_1 和 η_2 :

$$\eta_1 = \epsilon(i) - \epsilon(i-1), \eta_2 = \epsilon(i+1) - \epsilon(i)$$

如果 η_1 很大,可以判定 $\epsilon(i)$ 是由其他测量误差引起的,与周跳无关;如果 η_1 很小,而 η_2 很大,可以确定*i*时刻某颗卫星发生了周跳;如果 η_1 、 η_2 都很小,可能发生了连续的周跳,而且周跳的数相同,这种情况很少见。

周跳的处理可以采用修复和删除两种方法。如果通过 $\epsilon(i)$ 很容易确认周跳的大小,我们对受周跳影响的双差相位率进行修正;如果有困难,可以将探测出周跳的历元及前一历元删除,这对后续的速度并无影响。

实践证明,采样率越高,这一方法的周跳探测的准确性越高,修复周跳的可能性越大,但对低于1Hz的数据来说,就不再有效。

3 试验结果及分析

试验数据来源于某次航空重力测量,这次测量使用了NoVAte1接收机和Trimble SSE接收机。地

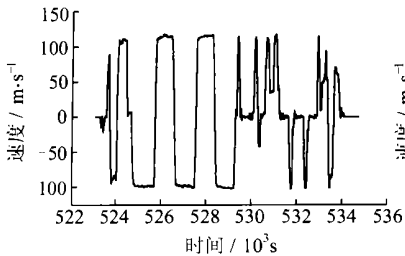


图3 南北方向的速度
Fig. 3 South-North Velocity

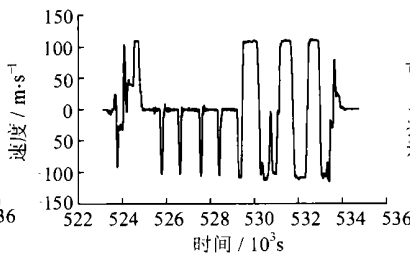


图4 东西方向的速度
Fig. 4 East-West Velocity

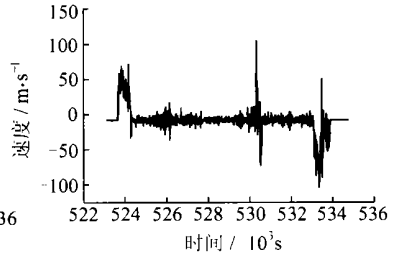


图5 垂直方向的速度
Fig. 5 Vertical Velocity

使用的处理软件是自行研制的VAES,它具有定位、测速和测定加速度的功能。对于测速,既具有利用原始多普勒观测值解算载体速度的功能,又具有利用相位导出的相位率解算载体速度的功

能,两者之间可以切换。面上布置了4个基准站,分别表示为 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 ,均使用NoVAte1接收机;飞机上安置了两台GPS接收机(一台NoVAte1接收机,一台Trimble SSE接收机),两台接收机通过功分器共用一个GPS天线,将其称为运动站*M*,所有GPS接收机均以动态模式采集数据,采样率是1Hz,观测时间约为5h。在数据处理的过程中,使用了基准站 S_1 、 S_2 、 S_3 上的GPS数据和Trimble SSE接收机采集的数据。

图1表示了这次飞行试验的飞行轨迹和基准站的位置,图2给出了飞机飞行高度的剖面图,图3、图4、图5分别给出了飞机在南北、东西和垂直方向的飞行速度。

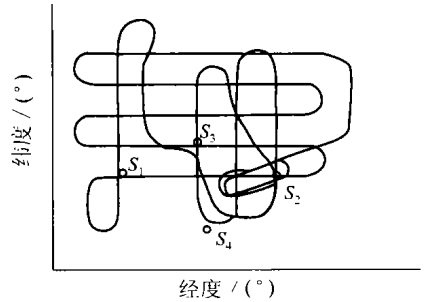


图1 飞行轨迹和基准站分布
Fig. 1 Trajectory of Flight and Distribution of GPS Stations

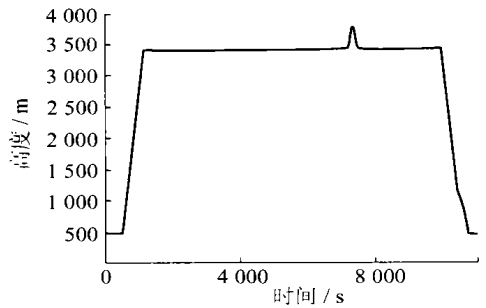


图2 飞行高度
Fig. 2 Height Profile of Flight

能,两者之间可以切换。用基准站 S_1 、 S_2 、 S_3 分别与动态站*M*构成基线 S_1-M 、 S_2-M 、 S_3-M ,分别推算*M*的运动速度,得到三组速度序列 V_{S_1-M} 、 V_{S_2-M} 和 V_{S_3-M} ,三组速度

序列互相进行较差, 理论上差值为零。由于测量或方法的误差, 实际上不可能为零。笔者利用均值和标准差来评价其测速精度, 这种精度分析方法称为内符合精度评价方法。

首先利用原始多普勒观测值解算飞机速度, 可以得到三组速度序列, 互相进行较差, 较差结果的统计值列于表 1; 然后利用相位导出的多普勒观测值解算飞机速度, 也可以得到三组速度序列, 互相进行较差, 较差结果的统计值列于表 1。

表 1 中, $V_{S_1-M}V_{S_2-M}$ 表示由 S_1-M 基线解算的飞机速度与由 S_2-M 基线解算的飞机速度对应历元求差后的统计结果; $V_{S_1-M}V_{S_3-M}$ 表示由 S_1-M 基线解算的飞机速度与由 S_3-M 基线解算的飞机速度对应历元求差后的统计结果; $V_{S_2-M}V_{S_3-M}$ 表示

由 S_2-M 基线解算的飞机速度与由 S_3-M 基线解算的飞机速度对应历元求差后的统计结果; SN 表示南北方向, EW 表示东西方向, V 表示垂直方向。由表 1 可见, 各结果量级相当, 利用原始多普勒观测值方法解算出的飞机速度的误差, 水平方向为 20~30mm/s, 垂直方向为 60~70mm/s, 垂直方向的误差是水平方向误差的 2~3 倍; 利用相位导出的多普勒观测值方法解算出的飞机速度的误差, 水平方向为 1~2mm/s, 垂直方向为 3~4mm/s, 较原始多普勒观测值解算出来的结果精度提高了一个数量级, 而且该结果与理论上分析的结果一致。

为进一步说明问题, 将各基线用上述两种方法解算的结果进行比较, 比较后的统计结果列于表 2。

表 1 两种方法解算的速度较差结果/(mm·s⁻¹)

Tab. 1 Difference of Velocities Calculated by Two Methods

		$V_{S_1-M}V_{S_2-M}$		$V_{S_1-M}V_{S_3-M}$		$V_{S_2-M}V_{S_3-M}$	
		均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
利用原始多普勒观测值解算	SN	1.13×10^{-3}	± 26.58	4.32×10^{-4}	± 24.29	-7.02×10^{-4}	± 25.56
	EW	-2.89×10^{-4}	± 20.44	-2.28×10^{-4}	± 22.57	6.05×10^{-5}	± 22.86
	V	-8.07×10^{-4}	± 65.25	-5.07×10^{-4}	± 59.59	2.99×10^{-4}	± 62.42
利用相位导出的多普勒观测值解算	SN	-3.51×10^{-5}	± 1.45	-2.34×10^{-8}	± 1.22	3.51×10^{-5}	± 1.37
	EW	1.63×10^{-5}	± 0.93	3.31×10^{-5}	± 0.89	1.68×10^{-5}	± 0.90
	V	2.21×10^{-5}	± 3.65	-2.53×10^{-5}	± 3.01	-4.75×10^{-5}	± 3.44

表 2 比较统计结果/(mm·s⁻¹)

Tab. 2 Comparison of Statistical Results

	$V_{S_1-M}^rV_{S_1-M}^d$		$V_{S_2-M}^rV_{S_2-M}^d$		$V_{S_3-M}^rV_{S_3-M}^d$	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
SN	4.47×10^{-4}	± 24.91	-6.15×10^{-4}	± 25.53	-1.32×10^{-4}	± 25.0
EW	-2.06×10^{-4}	± 22.58	-6.17×10^{-5}	± 22.86	-4.62×10^{-4}	± 22.25
V	-5.16×10^{-4}	± 59.55	-2.69×10^{-4}	± 62.31	-4.17×10^{-4}	± 60.21

表 2 中, 上标“r”是指用原始多普勒观测值导出的结果。上标“d”是指用相位导出的多普勒解算的结果, 各列是由 $S_i-M (i=1, 2, 3)$ 基线分别用两种不同多普勒观测值解算的结果对应历元求差后的统计结果, 各结果量级相当, 并且与表 1 的量级相当。其原因是, 利用相位导出的多普勒计算出来的速度的误差较用原始多普勒计算出来的速度的误差小得多, 甚至可以忽略。因此, 它可以作为速度的真值, 比较结果的误差主要是原始多普勒计算出来的速度的误差。

4 结 语

实际数据处理结果表明, 利用原始多普勒观测值确定运动载体的速度, 其精度可以达到 20~

70mm/s; 利用相位观测值导出相位率, 以它作为观测值确定运动载体的速度, 其精度可以达到 1~3mm/s, 可以满足一些用户对高精度速度的需要。这也表明本文提出的探测周跳的方法——双差相位率粗差法是行之有效的。

参 考 文 献

- 1 Ryan S, Lachapelle G, Cannon M E. DGPS Kinematic Carrier Phase Signal Simulation Analysis in the Velocity Domain. ION, Kansas, 1997
- 2 Buton A M, Gleeie G L, Schwarz K P. Differentiation for High-Precision GPS Velocity and Acceleration Determination. GPS Solution, 1999, 2(4): 7~21
- 3 Hebert J, Keith J, Ryan S, et al. DGPS Kinematic Carrier Phase Signal Simulation Analysis for Precise Aircraft Velocity Determination. ION Annual Meeting, Albuquerque, 1997

- 4 Szames M, Ryan S, Lachapelle G. DGPS High Accuracy Aircraft Determination Using Doppler Measurements. The International Symposium on Kinematic System, Baff 1997
- 5 周忠谟, 易杰军, 周琪. GPS 测量原理与应用. 北京: 测绘出版社, 1995
- 6 刘基余, 李征航, 王跃虎, 等. 全球定位系统原理及其应用. 北京: 测绘出版社, 1993
- 7 肖云. 利用 GPS 确定航空重力测量载体运动状态的理论与方法: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 2000
- 8 肖云, 孙中苗, 程广义. 利用 GPS 多普勒观测值精确确定运动载体的速度. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(2): 113~118
- 9 魏子卿, 葛茂荣. GPS 相对定位的数学模型. 北京: 测绘出版社, 1998
- 第一作者简介: 肖云, 博士生. 现从事卫星重力测量研究. 代表成果: GPS 在航空重力测量中的应用研究.
E-mail: xiaoyungg@sina.com

Comparison Between Phase-Rate and Doppler to Determine Velocity

XIAO Yun¹ XIA Zhen¹

(1 Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, 1 Middle Yanta Road, Xi'an, China, 710054)

Abstract: Doppler and phase-rates are used to evaluate velocities. The different characters of the two methods are put forward. A new method of detection of cycle slips \ double differentiated phase-rate bias is shown. The results indicate that the accuracy of velocity deduced from raw Doppler observations is 20~70 mm/s and that from derived Doppler can be 1~3 mm/s.

Key words: Doppler; phase-rate; GPS; velocity; cycle slip

About the first author: XIAO Yun, Ph. D candidate. He is engaged in the research on satellite gravity. His typical achievement is the application of GPS to airborne gravimetry.
E-mail: xiaoyungg@sina.com

(责任编辑: 平子)

(上接第 576 页)

made. Deformation and control simulation have been made on two section planes of dangerous precipitous cliff, and a series of displacement field pictures are obtained. From the result, we can affirm that the deformation of dangerous precipitous Lianziya cliff has the direct relationship with the structure of the mine-out area and the T11 segment, and the simulation results are basically according to the reality.

Key words: discontinuous deformation analysis; dangerous precipitous Lianziya cliff; displacement field; stress field; simulation of value; geological disaster

About the first author: WU Yue, Ph. D candidate. He is engaged in the research on engineering deformation and GPS.
E-mail: wangyan wuyue@163.com

(责任编辑: 燕子)