

GPS 整周模糊度单历元 DUFCON 方法 扩展及定位解精度研究

郭际明^{1,2} 周命端^{1,2} 黄长军¹ 伍孟琪¹

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(2 精密工程与工业测量国家测绘地理信息局重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘要:分析了双频相关法(DUFCON)单历元解算 GPS L_1 相位观测值整周模糊度理论,并对其进行了方法扩展,提出了单历元直接确定 GPS L_2 、 L_n 和 L_w 相位观测值整周模糊度新方法。给出了扩展方法的特征值条件,从理论和实践角度对 4 种相位观测值在整周模糊度解算效率和定位解精度两方面作了对比分析。

关键词:GPS 整周模糊度;相位观测值;DUFCON;单历元定位

中图分类号:P228.41

单历元确定 GPS 整周模糊度一直是高精度 GPS 实时定位的研究热点和难点,提出的典型算法有 LMS 法、双频 P 码法、DC 算法、DUFCON 法等。前 3 种算法易受客观因素和条件制约,难以完全实现高精度实时定位^[1-4],而 DUFCON 法较好地解决了这一难题^[5-6]。它是根据双频相位数据的内在关系和统计特性,以 L_2 相位观测值整周模糊度为横轴,以 L_1 相位观测值整周模糊度为纵轴构建双频相位双差观测值域整周模糊度误差带,在误差带的约束下实现单历元搜索固定正确的 ΔN_1 值。本文借鉴上述思想,对现有 DUFCON 方法进行扩展,提出了单历元直接确定 GPS L_2 、 L_n 和 L_w 相位观测值整周模糊度的新方法。结合 GPS 短基线差分定位实验,对 4 种相位观测值在整周模糊度解算效率和定位解精度两方面作了对比分析。

1 DUFCON 方法及扩展

对于 GPS 短基线定位,双差观测方程为:

$$\lambda \cdot (\nabla\Delta\Phi_{ab}^j + \nabla\Delta N_{ab}^j) = \nabla\Delta\rho_{ab}^j + \nabla\Delta\epsilon \quad (1)$$

式中, $\nabla\Delta N$ 为具有整数特性的双差整周模糊度; $\nabla\Delta\Phi$ 为双差相位观测值; λ 为载波波长; $\nabla\Delta\rho$ 为站

星双差几何距离; $\nabla\Delta\epsilon$ 为大气延迟差分残差及测量噪声等;上标 i, j 分别表示卫星 i 和卫星 j ;下标 a, b 分别表示测站 a 和测站 b 。

对于双频 GPS 接收机的相位观测值,根据式(1),不同相位观测值间可建立如下关系式:

$$\begin{aligned} \lambda_1 \cdot (\nabla\Delta\Phi_{1ab}^j + \nabla\Delta N_{1ab}^j) - \nabla\Delta\epsilon_1 = \\ \lambda_2 \cdot (\nabla\Delta\Phi_{2ab}^j + \nabla\Delta N_{2ab}^j) - \nabla\Delta\epsilon_2 \end{aligned} \quad (2)$$

式中,下标 1、2 分别表示频率 1、频率 2。记

$$u = (\nabla\Delta\epsilon_1 - \nabla\Delta\epsilon_2) / \lambda_1 \quad (3)$$

将式(3)代入式(2),并整理得:

$$\begin{aligned} \nabla\Delta N_{1ab}^j = (\lambda_2 / \lambda_1) \cdot (\nabla\Delta\Phi_{2ab}^j + \nabla\Delta N_{2ab}^j) - \\ \nabla\Delta\Phi_{1ab}^j + u \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)为任何 GPS 双频相位观测值都满足的线性关系^[5-6]。由此,可形成一条以 $\nabla\Delta N_2$ 为横轴、 $\nabla\Delta N_1$ 为纵轴且斜率为 $k = \lambda_2 / \lambda_1$,在纵轴向、宽度为 $2u$ 的直线带,即相位观测值域整周模糊度误差带(简称误差带,如图 1 所示)。误差带跨越横轴的范围称为带长,单位为周,误差带与纵轴相交宽度 $2u$ 称为带宽,单位为周。

对于一个观测历元,首先使用 C/A 码伪距观测值进行最小二乘定位获得初步定位结果,再反算相位观测值向量估计值和中误差 δ_ρ ,从而确定相位观测值域整周模糊度误差带长中间值即 $\nabla\Delta$

收稿日期:2013-06-12。

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41174009);精密工程与工业测量国家测绘地理信息局重点实验室开放基金资助项目(PF2011-19)。

N_2 的初值:

$$\nabla\Delta N_{2ab}^j = \text{Round}(\nabla\Delta\rho_{2ab}^j/\lambda_2 - \nabla\Delta\Phi_{2ab}^j) \quad (5)$$

式中, Round(\cdot)表示四舍五入取整。再使用3~5倍相位观测向量估计值中误差 δ_ρ 确定误差带长(见表1)。根据式(3),如果不顾及差分残差,并假设两种载波相位的观测精度相同,则误差项 u 将服从正态分布。根据误差传播定律,其方差为:

$$D_u = 8D_L \quad (6)$$

式中, D_L 为 L 载波相位的观测方差,约为 $9 \times 10^{-6} \text{m}^2$ 。若取 u 的3倍中误差为限差,则式(4)满足:

$$|u| = |\nabla\Delta N_{1ab}^j - (\lambda_2/\lambda_1) \cdot (\nabla\Delta\Phi_{2ab}^j + \nabla\Delta N_{2ab}^j) + \nabla\Delta\Phi_{1ab}^j| < 3\sqrt{8D_L} \approx 0.1(\text{周}) \quad (7)$$

以概率99.74%成立。如果顾及差分残差,式(7)右项数值将要增大。

表1 DUFCON方法扩展及特征值条件

Tab.1 Extended DUFCON and Its Characteristic Value Condition

方法名	坐标轴(纵轴,横轴)	坐标轴整数周期	斜率 k	带长	带宽	D_u	备注
$L_1L_2_DUFCON$	$(\nabla\Delta N_1, \nabla\Delta N_2)$	(9,7)	1.283	$(3\sim 5)\delta_\rho/\lambda_2$	0.3~0.4	$8D_L$	已有方法
$L_2L_1_DUFCON$	$(\nabla\Delta N_2, \nabla\Delta N_1)$	(7,9)	0.779	$(3\sim 5)\delta_\rho/\lambda_1$	0.3~0.4	$8D_L$	扩展方法
$L_nL_2_DUFCON$	$(\nabla\Delta N_n, \nabla\Delta N_2)$	(16,7)	2.283	$(3\sim 5)\delta_\rho/\lambda_2$	0.3~0.4	$12D_L$	扩展方法
$L_wL_2_DUFCON$	$(\nabla\Delta N_w, \nabla\Delta N_2)$	(2,7)	0.283	$(3\sim 5)\delta_\rho/\lambda_2$	0.3~0.4	$12D_L$	扩展方法

根据表1的特征值条件不难看出,在相同误差带约束条件下, $L_nL_2_DUFCON$ 方法的坐标轴纵轴整数周期 $\nabla\Delta N_n$ 最大为16(斜率为2.283)。这从理论上说明,在同等误差带长和误差带宽约束下,可使 $\nabla\Delta N_n$ 搜索固定的效率更高。

2 算例与结果分析

为验证GPS整周模糊度单历元DUFCON方法及扩展的正确性,并比较分析4种高精度相位观测值定位解精度,2012-04-23用LEICA GPS接收机在武汉市某楼顶布设了2个测站,同步采集了大约40min的数据,采样间隔为1s,卫星截止高度角为 10° 。将一测站作为基准站,另一测站作为流动站(静态模拟动态),采用某专业软件对本组实验数据作了数据分析。结果表明,本组

表2 GPS 4种相位观测值在第1000历元处所计算的整周模糊度值

Tab.2 GPS Integer Ambiguity Value of Four Phase Observations at the 1000th Epoch

	G18-G27	G18-21	G18-G22	G18-G15	G18-G09	G18-G12	G18-G14	方法名	本历元耗时/平均耗时/s	实验历元成功率/%
$\nabla\Delta N_1$	-8	-17	11	-18	-3	80	31	$L_1L_2_DUFCON$	0.530/0.386	100
$\nabla\Delta N_2$	-20	-27	22	-22	8	65	16	$L_2L_1_DUFCON$	1.202/0.597	100
$\nabla\Delta N_n$	-28	-44	33	-40	5	145	47	$L_nL_2_DUFCON$	0.515/0.373	100
$\nabla\Delta N_w$	12	10	-11	4	-11	15	15	$L_wL_2_DUFCON$	0.702/0.391	100

从表2可以看出,在第1000历元处根据4

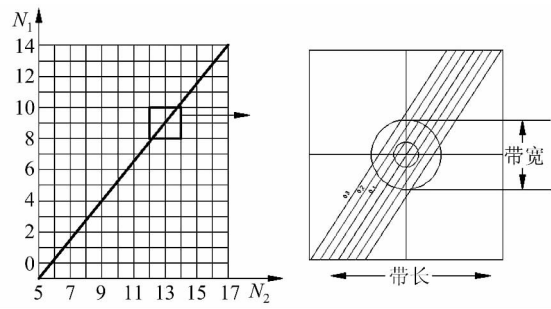


图1 相位观测值整周模糊度误差带

Fig.1 Error Strip for Integer Ambiguity of Phase Observations Domain

由GPS L_1 和 L_2 相位观测值可形成多种线性组合^[7],本文仅针对 L_1 、 L_2 、 L_n 和 L_w 相位观测值讨论4种典型的DUFCON方法扩展,并列出了其特征值条件,见表1所示。

数据无周跳发生,然后用自编软件按单历元差分定位模式对数据进行处理。选取连续2000个观测历元数据处理结果进行分析,其中第1962~1979历元有9颗卫星,其余历元均有8颗卫星,在视场范围内有卫星升降情况。

2.1 $\nabla\Delta N$ 单历元解算分析

为分析4种相位观测值整周模糊度单历元解算的正确性与成功率,首先从相位观测值历元间、相位观测值之间的关系对模糊度解算结果进行分析。根据DUFCON方法及扩展理论,单历元解算了4种相位观测值整周模糊度,同一卫星对在各历元间双差模糊度值具备一致性特征,这表明从相位观测值历元间方面验证了其模糊度解算结果的正确性。以第1000历元为例,分别列出4种相位观测值整周模糊度解算结果如表2所示。

种相位观测值单历元独立计算的7个卫星对双差

整周模糊度均满足 $\nabla\Delta N_n = \nabla\Delta N_1 + \nabla\Delta N_2$ 和 $\nabla\Delta N_w = \nabla\Delta N_1 - \nabla\Delta N_2$ 条件。这表明,从相位观测值方面验证了 4 种相位观测值模糊度解算的正确性,且成功率为 100%。从解算平均耗时来看,解算效率从高到低依次是 $\nabla\Delta N_n$ 、 $\nabla\Delta N_1$ 、 $\nabla\Delta N_w$ 和 $\nabla\Delta N_2$,这与误差带的约束作用息息相关^[5-6]。

2.2 定位解精度分析

在 GPS 短基线差分定位中,整周模糊度一旦正确确定,每个历元可获得高精度的坐标解算结果。为进一步验证 4 种相位观测值整周模糊度解算的正确性,从定位解结果来分析 4 种相位观测值的数据质量和定位解精度。本文对上述 4 种相位观测值用自编软件作了双差单历元定位处理,分别与国外某软件动态差分定位模块计算结果

(可视为真值)在统一的高斯平面坐标系、投影中央子午线为 114° 下进行作差比较,获得了 4 套比较结果,在 x 、 y 和 H 方向的较差值如图 2~4 所示,并将图 2~4 中的最大较差绝对值、最小较差绝对值、平均较差值和标准差进行统计列于表 3。

从表 3 可以看出, L_1 、 L_2 和 L_n 相位观测值单历元定位解因测量噪声较小实现了 mm~cm 量级精度,而 L_w 相位观测值因测量噪声较大制约了单历元定位解精度,仅在 cm 数量级。这表明,从定位解结果方面验证了 4 种相位观测值整周模糊度解算是正确的。再从定位解平均较差值和标准差来看,定位解精度从高到低依次是 L_n 、 L_1 、 L_2 和 L_w ,这与相位观测值本身噪声有关^[8-9]。

表 3 单历元定位解较差值的比较

Tab. 3 Comparison Between Difference-values of Single Epoch Positioning Solution

	L_1 观测值			L_2 观测值			L_n 观测值			L_w 观测值		
	x /mm	y /mm	H /mm	x /mm	y /mm	H /mm	x /mm	y /mm	H /mm	x /mm	y /mm	H /mm
最大较差绝对值	8.0	3.5	8.9	7.4	6.7	14.4	5.0	1.6	7.6	46.4	40.2	69.7
最小较差绝对值	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
平均较差值	0.8	-0.5	0.2	-0.6	1.4	-0.7	0.2	0.3	-0.2	6.1	-7.3	3.4
标准差	± 1.8	± 1.2	± 2.7	± 2.5	± 2.4	± 4.1	± 0.8	± 0.6	± 1.9	± 15.7	± 13.5	± 22.1

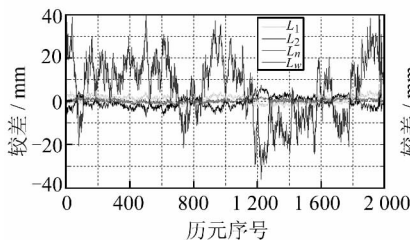


图 2 定位解在 x 方向的较差
Fig. 2 Difference of Positioning Solution at x -direction

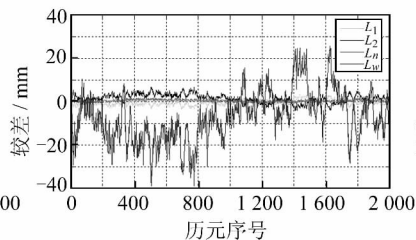


图 3 定位解在 y 方向的较差
Fig. 3 Difference of Positioning Solution at y -direction

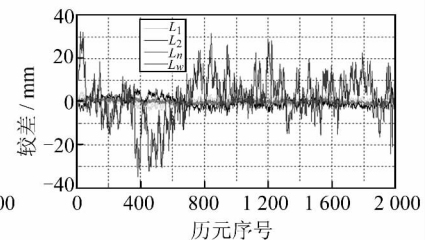


图 4 定位解在 H 方向的较差
Fig. 4 Difference of Positioning Solution at H -direction

3 结 语

本文在分析了 DUFCON 方法单历元解算 GPS L_1 相位观测值整周模糊度理论上,将已有方法 L_1L_2 _DUFCON 进行扩展,得出了 L_2L_1 _DUFCON、 L_nL_2 _DUFCON 和 L_wL_2 _DUFCON 等 3 种方法,并给出了相应的特征值条件,应用于 GPS 4 种相位观测值整周模糊度单历元解算中。文中算例结果验证了扩展方法的正确性。计算分析表明:① 整周模糊度解算效率从高到低依次是 $\nabla\Delta N_n$ 、 $\nabla\Delta N_1$ 、 $\nabla\Delta N_w$ 和 $\nabla\Delta N_2$,这与误差带约束作用息息相关;② 定位解精度从高到低依次是 L_n 、 L_1 、 L_2 和 L_w ,这与其本身观测噪声密切相关;③ 4 种相位观测值用于定位的比较,不论是解算效率还是定位精度, L_n 定位解为最优。

参 考 文 献

- [1] Pratt M, Burke B, Misra P. Single-Epoch Integer Ambiguity Resolution with GPS-GLONASS L_1 - L_2 Data[C]. ION GPS-98, Nashville, Tennessee, USA, 1998
- [2] Sjöberg L E. A New Method for GPS Base Ambiguity Resolution by Combined Phase and Code Observables [J]. Survey Review, 1998, 34(268): 363-372
- [3] Sjöberg L E. Unbiased vs Biased Estimation of GPS Phase Ambiguities from Dual-frequency Code and Phase Observable [J]. Journal of Geodesy, 1993, 73: 118-124
- [4] 王新洲, 花向红, 邱蕾. GPS 变形监测中整周模糊度解算的新方法 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(1): 24-26
- [5] 孙红星, 李德仁. 使用双频相关法单历元解算 GPS 整周模糊度 [J]. 测绘学报, 2003, 32(3): 208-212

- [6] 孙红星. 差分 GPS/INS 组合定位定姿及其在 MMS 中的应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2004
- [7] 魏子卿, 葛茂荣. GPS 相位定位的数学模型[M]. 北京: 测绘出版社, 1998
- [8] 王泽民, 邱蕾, 孙伟 等. GPS 现代化后 L_2 载波的定位精度研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(8): 779-782
- [9] Herring T A, King R W, McClusky S C. GAMIT Reference Manual Release 10. 4 [EB/OL]. http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/GAMIT_Ref.pdf.

第一作者简介: 郭际明, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事高精度 GNSS 定位技术及应用领域的教学与科研工作。
E-mail: jmguo@sgg.whu.edu.cn

Extended DUFCOM of Ambiguity Resolution for Single Epoch GPS Positioning Solution Analysis

GUO Jiming^{1,2} ZHOU Mingduan^{1,2} HUANG Changjun¹ WU Mengqi

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Key Laboratory of Precise Engineering & Industry Surveying, NASMG, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: The ambiguity resolution theory of GPS L_1 phase observation using single epoch data based on DUFCOM was analyzed, the extended DUFCOM was developed. A new single epoch ambiguity fixing method was proposed for GPS L_2 , L_n and L_w . The property of the extended method was given, furthermore, and the efficiency of ambiguity resolution and the accuracy of positioning solution for the above four phase observations were compared in theory and result.

Key words: GPS integer ambiguity; phase observations; DUFCOM; single epoch positioning

About the first author: GUO Jiming, Ph.D., professor, Ph.D supervisor, majors in the education and research on application of high-precision GNSS positioning technology.

E-mail: jmguo@sgg.whu.edu.cn

(上接第 1215 页)

A New Method for Processing the Rover and the Reference Stations GPS Data with Different Sampling Rates

XIAO Guorui¹ SUI Lifan¹ SONG Qian² DUAN Yu¹

(1 Institute of Geospatial and Information, Information Engineering University, 66 Middle Longhai Road, Zhengzhou 450052, China)

(2 College of Navigation and Aerospace Engineering, Information Engineering University, 62 Kexue Road, Zhengzhou 450051, China)

Abstract: In order to process the rover and the reference stations GPS data with different sampling rates, a new method is introduced. Firstly, all the epochs of rover that have synchronous observations with reference station are adjusted together and treated as known points. Secondly, we treat the observations of rover between two adjacent known points as a whole, use differential data between epochs of roving stations as observations, and adjust all the coordinates of roving stations in the whole together. The new method takes the correlation between epochs into consideration and reduces the error accumulation of difference between epochs. An experiment was carried out. The result shows that new method is more rigorous and can improve the rover positioning precision.

Key words: kinematic GPS differential positioning; different sampling rate; synchronous observation; difference between epochs; adjustment

About the first author: XIAO Guorui, postgraduate, majors in GNSS data processing.

E-mail: xgr@whu.edu.cn