

GLONASS 三种载波频率组合值研究^{*}

徐 军 陶庭叶 高 飞

(合肥工业大学土木与水利工程学院,合肥 230009)

摘 要 研究了 GLONASS 三种频率载波相位组合方法,以模糊度保持整数为前提,通过分析电离层延迟和观测噪声对三频组合观测值的影响,依据线性组合的长波长标准、弱电离层延迟标准、弱观测噪声标准,得出了一些新的线性组合,这些组合可以提高定位精度与定位速度。

关键词 GLONASS;长波长;电离层延迟;观测噪声;频率组合

中图分类号:P227

文献标识码:A

RESEARCH ON THREE KINDS OF CARRIER FREQUENCY COMBINATION VALUE OF GLONASS

Xu Jun, Tao Tingye and Gao Fei

(School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract The third carrier will be provided by modernized GLONASS satellites frequency program. With the GLONASS carrier phase observation model as a prerequisite, three frequency carrier phase combination of GLONASS method was researched. The effects of ionospheric delay and observation noise on the observations combined from three frequency were analyzed. According to long wavelength standard, weak ionospheric delay standards, weak observation noise standards, some useful linear combination was put forward to improve the positioning accuracy and speed.

Key words: GLONASS; long wavelength; ionospheric delay; observation noise; frequency combination

1 引言

自 1996 年俄罗斯宣布 GLONASS 系统实现完全现代化并运行状态后, GLONASS 卫星在 G1 和 G2 两个频率上连续发射标准精度信号(C/A 码)和高精度信号(P 码)。现代化后的 GLONASS-K 卫星将提供第三个载波频率 G3(表 1),第三个频率的使用将提高定位的可靠性和精度。新的频率 G3 的出现,将有利提高定位的精度和速度。如何有效地将 G1、G2 和 G3 进行线性组合,对未来的多频率多系统联合定位具有一定参考价值^[1]。

表 1 GLONASS 的频段

Tab. 1 Frequency column of GLONASS

链路	因子	频率(MHz)	增量(MHz)	波长(cm)
G1	1	1 602.000	0.562 5	18.7
G2	7/9	1 246.000	0.437 5	24.1
G3	94/125	1 204.704	0.423 0	24.9

2 三种频率载波线性组合形式

GLONASS 通过频分多址(FDMA)区分不同卫

* 收稿日期:2012-06-12

基金项目:国土环境与灾害监测国家测绘局实验室开放基金(LEM2010B08);合肥工业大学博士专项基金

作者简介:徐军,男,1987 年生,硕士研究生,研究方向为 GNSS 高精度定位. E-mail: xj7396110@163.com

星的信号,每颗卫星分配不同的三个频率 $f_{1k} f_{2k} f_{3k}$,这些频率之间的比值是常数, $f_{1k}/f_{2k}=9:7, f_{1k}/f_{3k}=125:94$ 。其中 $k=1,2,3,\dots,24$ 。

若忽略观测噪声和多路径延迟及对流层延迟的影响,载波相位观测模型可简化为:

$$\phi_1 = \rho/\lambda_1 - N_1, \phi_2 = \rho/\lambda_2 - N_2, \phi_3 = \rho/\lambda_3 - N_3 \quad (1)$$

其中 ρ 为测站到卫星的距离, N_1, N_2, N_3 分别为 G_1, G_2, G_3 的整周模糊度, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 分别为 G_1, G_2, G_3 的波长, ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 为载波相位观测值, ϕ_c 为组合观测值,则

$$\phi_c = \alpha\phi_1 + \beta\phi_2 + \gamma\phi_3 \quad (2)$$

设 $G_i = \chi_i \phi_i (i=1,2,3)$,组合后

$$G_c = (\alpha + \beta + \gamma)\rho - (\alpha\chi_1 N_1 + \beta\chi_2 N_2 + \gamma\chi_3 N_3) \quad (3)$$

为使几何距离不受观测值组合不同变化及组合后的整周模糊度保持整周特性,令 $\alpha + \beta + \gamma = 1, \lambda N = \alpha\chi_1 N_1 + \beta\chi_2 N_2 + \gamma\chi_3 N_3$,得

$$N = \alpha\chi_1 N_1/\chi + \beta\chi_2 N_2/\chi + \gamma\chi_3 N_3/\chi \quad (4)$$

令

$$i = \alpha\lambda_1/\chi, j = \beta\lambda_2/\chi, k = \gamma\lambda_3/\chi \quad (5)$$

得

$$\alpha = i\lambda/\chi_1, \beta = j\lambda/\chi_2, \gamma = k\lambda/\chi_3 \quad (6)$$

由 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 和式(6)可得

$$\lambda = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 / (i\lambda_2 \lambda_3 + j\lambda_1 \lambda_3 + k\lambda_1 \lambda_2) \quad (7)$$

组合观测值的频率为

$$f = if_1 + jf_2 + kf_3 \quad (8)$$

3 组合观测值误差分析

3.1 对流层延迟误差

由于对流层延迟只与气温、气压及湿度等因素有关^[2],故同一颗卫星发射的载波到达地面的延迟相同。设每个载波上的对流层延迟为 T ,则组合后的载波对流层延迟为

$$T_c = \alpha T + \beta T + \gamma T \quad (9)$$

因 $\alpha + \beta + \gamma = 1$,所以

$$T_c = T \quad (10)$$

由此可见,组合后的对流层延迟和单个载波对流层延迟一样。

3.2 电离层延迟误差

设 G_1, G_2, G_3 的电离层延迟分别为 I_1, I_2, I_3 ,结合电离层延迟和组合观测值的定义可得组合观测值电离层延迟的误差为:

$$I_c = \alpha I_1 + \beta I_2 + \gamma I_3 \quad (11)$$

将式(6)带入式(11)可得:

$$I_c = i\lambda/\chi_1 I_1 + j\lambda/\chi_2 I_2 + k\lambda/\chi_3 I_3 \quad (12)$$

电离层延迟为^[3]:

$$(V_{\text{ion}})_i = 40.3/f_i^2 \int_S \text{NedS}$$

其中 $i=1,2,3$; $(V_{\text{ion}})_1, (V_{\text{ion}})_2, (V_{\text{ion}})_3$ 分别为载波 G_1, G_2, G_3 的电离层延迟。

$$I_1/I_2 = \chi_1^2/\chi_2^2 \quad (13)$$

$$I_1/I_3 = \chi_1^2/\chi_3^2 \quad (14)$$

根据式(7)、(13)和(14)可得组合后电离层延迟误差为:

$$I_c/I_1 = (i + jf_1/f_2 + kf_1/f_3)/(i + jf_2/f_1 + kf_3/f_1) \quad (15)$$

3.3 观测噪声

设 G_1, G_2, G_3 的观测噪声为 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$,组合后的观测误差为:

$$\sigma_c^2 = \alpha^2 \sigma_1^2 + \beta^2 \sigma_2^2 + \gamma^2 \sigma_3^2 \quad (16)$$

令 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_0$,由式(16)和误差传播规律可得:

$$\sigma_c = \sqrt{(\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2)} \sigma_0 \quad (17)$$

为得观测噪声较小,应使:

$$\sqrt{(\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2)} < 1 \quad (18)$$

再根据式(6)和(17),得

$$\sigma_c = \chi \sigma_0 \sqrt{(i\lambda_1)^2 + (j\lambda_2)^2 + (k\lambda_3)^2} \quad (19)$$

由此可以看出组合观测值波长和组合观测值噪声成正比。计算中令 $\sigma_0 = 0.001 \text{ m}^{[4]}$ 。

4 GLONASS 三频组合值的选取

4.1 长波长组合值的选取

波长在确定整周模糊度中起到比较关键的作用,因为长波长确定整周模糊度相对容易,而且准确率也比较高,所以在选取波长的时候一般选取波长较长的组合^[5]。选取的波长最起码需要大于每个组合波长的长度。现选定一个波长参数为

$$\alpha_\lambda = \chi/\chi_1 = f_1/(if_1 + jf_2 + kf_3) \quad (20)$$

由表1可知, G_3 载波的波长最长为24.9 cm,若要获得组合观测值的波长长于每个单个载波的波长,须使 $\lambda > \lambda_3$,即

$$\lambda = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 / (i\lambda_2 \lambda_3 + j\lambda_1 \lambda_3 + k\lambda_1 \lambda_2) > \lambda_3 \quad (21)$$

$$\chi_1 \chi_2 > i\chi_3 + j\lambda_1 \lambda_3 + k\chi_1 \lambda_2 > 0 \quad (22)$$

故可得:

$$1 - iP_{(1,3)} - jP_{(2,3)} > k > -iP_{(1,3)} - P_{(2,3)} \quad (23)$$

其中 $P_{(1,3)} = \chi_3/\chi_1 = 41/31, P_{(2,3)} = \chi_3/\chi_2 = 25/24$ 。

为确保 k 正向取整数,令 $k = [-iP_{(1,3)} + jP_{(2,3)}]$,则

$$\chi = \chi_3 / \{ iP_{(1,3)} + jP_{(2,3)} + [-iP_{(1,3)} + jP_{(2,3)}] \} \quad (24)$$

由于 $P_{(1,3)}, P_{(2,3)}$ 是整数比值,可知 i, j 的周期分别为 $T_1 = 31, T_2 = 24$ 。由于观测噪声大小和组合系数的绝对值大小成正比,所以取 $i \in [-16, 15]$ 、

$j \in [-12, 12]$, 且 i, j, k 不能同时为 0。

根据组合系数利用 Matlab 编写应用程序筛选出一些波长较长的组合系数如表 2 所示。

表 2 长波长组合观测值特征

Tab.2 Characteristics of long wavelength combination observation

<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k</i>	λ (m)	α_λ	α_{ion}	σ_C (m)
-5	-8	15	3.446 1	18. 57	-0. 271	0. 257
-4	10	-5	9. 722 5	52. 391 8	0. 195 3	0. 499
-2	-9	12	8. 897	47. 94	0. 151 7	0. 557 6
-2	-8	11	3. 957	21. 323 1	-0. 164 9	0. 224 8
-1	10	9	15. 293 2	82. 410 9	-0. 008 0524	0. 853 53
0	1	-1	7. 126 5	38. 403	-0. 029 118	0. 041 54
1	-9	8	13. 345 5	71. 915 1	-0. 005 528 5	0. 667 56
1	-7	6	2. 812 4	15. 155 1	0. 001 905 7	0. 108 21
3	2	-6	4. 112 3	22. 159 9	-0. 397 77	0. 124 89
4	-7	2	3. 143 6	16. 94	0. 348 83	0. 117 24

根据表 2 可得:(-5,-8,15)、(-4,10,-5)、(-2,-9,12)、(-2,8,11)、(3,2,-6)、(4,-7,2)组合波长的参数比较大,受电离层延迟的影响也较大,所以比较适合于长基线快速相对定位^[6];

(-1,10,9)的组合波长为 15. 293 2 m,电离层延迟误差很小,但是由于组合系数的绝对值过大,所以其观测噪声相对较大;

(0,-1,1)和(1,-7,6)这两种组合,波长较大,而且电离层和观测误差对其的影响很小,所以在长、中、短基线下都比较容易固定整周模糊度。

4.2 弱电离层延迟组合值的选取

电离层延迟的比值为组合观测值的电离层参数:

$$\alpha_{\text{ion}} = I_C / I_1 \tag{25}$$

显然,要想组合后的电离层延迟较小,则必须为:

$$-1 < |(i + jP_{(1,2)} + kP_{(1,3)}) / P_{(1,3)}| < 1 \tag{26}$$

$$(-1 - (i + jP_{(1,2)})) / P_{(1,3)} < k < (1 - (i + jP_{(1,2)})) / P_{(1,3)} \tag{27}$$

则 k 的取值可能为:

$$k^A = [(-1 - (i + jP_{(1,2)})) / P_{(1,3)}], k^B = [(1 - (i + jP_{(1,2)})) / P_{(1,3)}] \tag{28}$$

式中 $[\]$ 为负向取整函数。

$$\chi(i, j, k^A) = \chi_3 / ((iP_{(1,3)} + jP_{(2,3)} + k^A) \tag{29}$$

$$\chi(i, j, k^B) = \chi_3 / ((iP_{(1,3)} + jP_{(2,3)} + k^B) \tag{30}$$

上式均没有明显的周期性,当 $i = 30, j = -82, k^A = k^B = 77$,代入式(15)得 $\alpha_{\text{ion}} = 0$;当 $i = -30, j = -82, k^A = k^B = -77$ 时 $\alpha_{\text{ion}} = 0$ 。所以,选取 $i \in [-30, 30], j \in [-82, 82], k \in [-77, 77]$ 为讨论范围,且 i, j, k 不能同时为 0。根据搜索范围将满足条件的若

电离层组合如表 3 所示。

表 3 弱电离层延迟组合观测值特征

Tab.3 Characteristics of weak ionosphere delay combination observation

<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k</i>	λ (m)	α_λ	α_{ion}	σ_C (m)
-1	11	-10	4. 861 2	26. 195 9	-0. 010 088	0. 299 49
-1	12	-11	2. 889 9	15. 573	-0. 011 766	0. 194 81
-1	14	-13	1. 595 7	8. 599	-0. 014 366	0. 126 11
1	-8	7	4. 645 7	25. 034 5	-0. 002 317 4	0. 205 54
1	-6	5	2. 016 6	10. 866 7	0. 007 708 6	0. 066 015
2	-15	13	1. 751 9	9. 440 2	-0. 000 360 08	0. 144 91
2	-13	11	1. 174 4	6. 328 8	0. 004 559	0. 083 629
24	61	-77	0. 013 795	0. 073 742	0	5. 795 9
-27	21	0	0. 017 538	0. 093 75	0	2. 958 4
-6	-75	77	0. 029 005	0. 155 05	0	12. 775 4

由表 3 可知:

(24,61,-77)、(-27,21,0)、(-6,-75,77)

虽然消除了电离层延迟误差,但是波长比较短,不利于固定整周模糊度,且观测噪声都比较大;

(-1,11,-10)、(-1,12,-11)、(1,-6,5)、(1,-8,7)为波长 2 m 以上且电离层延迟都很小的观测噪声弱的组合,在长、中、短基线下也都比较容易固定整周模糊度。

4.3 弱观测噪声组合值的选取

根据式(18)和(19)可得

$$\chi^2(i^2/\chi_1^2 + j^2/\chi_2^2 + k^2/\chi_3^2) < 1 \tag{31}$$

取 $i, j, k \in [-15, 15]$,筛选可得如表 4 弱观测噪声组合。

表 4 弱观测噪声组合特征

Tab.4 Characteristics of weak observation combination observation

<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k</i>	λ (m)	α_λ	α_{ion}	σ_C (m)
15	12	13	0. 005 485	0. 029 32	1. 430 8	0. 000 591 96
13	10	12	0. 006 277 8	0. 033 559	1. 478	0. 000 591 69
14	7	7	0. 007 571 7	0. 040 475	1. 307 8	0. 000 644 22
7	12	2	0. 010 488	0. 056 064	0. 989 54	0. 000 659 49
13	6	-4	0. 012 761	0. 068 214	0. 694 11	0. 000 964 26
15	6	1	0. 009 161 9	0. 048 975	0. 994 52	0. 000 770 24
1	1	0	0. 105 23	0. 562 5	0. 903 62	0. 000 712 61

由表 4 可知,表中组合的观测噪声均小于 0.001,最小的接近 0.000 5。所以仅从观测噪声的角度来看上述组合均符合要求,但是前七组的组合波长均在 0.01 m 左右,且前三组的电离层延迟均在 1 以上,显然不利于整周模糊度的固定。(1,1,0)组合,其波长为 0.105 23 m,电离层延迟为 0.903 62,观测噪声为 0.000 712 61,是相对较好的组合方式。

5 结论

利用 GLONASS 三频载波相位观测值,可以得

到长波长、弱电离层和观测噪声较小的组合,利用这种组合进行定位,可以准确快速地固定整周模糊度,且可减小电离层和观测噪声的影响。不同的筛选标准会得到不同的组合系数,所以在实际的导航定位中应选取最优的组合系数。本文研究结果表明,采用 $(1,-6,5)$ 、 $(1,-7,6)$ 与 $(0,1,-1)$ 这三种系数组合时比较理想,波长都在 2 m 以上,电离层延迟误差也在 0.03 以下,但观测噪声也接近 0.1 m。

在使用这三种组合系数后应先对其进行去噪声处理,然后用于定位。因此利用 GLONASS 卫星三频信号进行组合定位时,建议使用这三种组合系数。

参 考 文 献

1 霍夫曼-韦伦霍,李希特内格尔,瓦斯勒.程鹏飞,等译.全球卫星导航系统 GPS, GLONASS, Galileo 及其他系统[M].北京:测绘出版社,2009. (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger and Wasle. Translated by Chen Pengfei, et al. GNSS-global navigation satellite systems GPS, GLONASS, GALILEO & more[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2009)

2 蔡昌盛,等.单频 GPS/GLONASS 组合单点定位的精度评定[J].大地测量地球动力学,2011,(3):85-89. (Cai Changsheng, et al. Accuracy assessment of combined single-

frequency GPS/GLONASS single point positioning[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2011,(3):85-89)

3 韩绍伟. GPS 组合观测值理论及应用[J]. 测绘学报, 1995,24(2):8-13. (Han Shaowei. GPS combination observation value theory and application[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1995,24(2):8-13)

4 常青,等. Galileo 系统与 GPS 卫星定位系统相位组合观测值的模型研究[J]. 空间科学学报, 2007,27(1):77-82. (Chang Qing, et al. Study for model of inter-frequency combinations of Galileo and GPS[J]. Chinese Journal of Space Science, 2007,27(1):77-82)

5 王泽民,柳景斌. Galileo 卫星定位系统相位组合观测值的模型研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2003,28(6):723-727 (Wang Zeming and Liu Jingbing. Galileo satellite positioning system phase combination observation model research[J]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2003,28(6):723-727)

6 邱蕾,陈远鸿,段艳霞. GPS 网络 RTK 流动站的电离层误差改正分析[J]. 大地测量地球动力学,2010,(1):56-60. (Qiu Lei, Chen Yuanhong and Duan Yanxia. Research on ionospheric delay modeling technology based on GPS RTK network[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010,(1):56-60)

(上接第 80 页)

2 朱文耀,等. ITRF2005 简介和评析[J]. 天文学进展, 2008,26(1):1-14. (Zhu Wen Yao, et al. Notes and commentary on the ITRF2005[J]. Progress in Astronomy, 2008, 26(1):1-14)

3 张西光,吕志平. ITRF2005 的实现与改进[J]. 测绘通报, 2007,(7):16-18. (Zhang Xiguang and Lü Zhiping. The realization and change of ITRF2005[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2007,(7):16-18)

4 Beutler G, et al. In: Gowy K. Neilan R, Moore A eds. IGS Directory 1999, California: JPL, 2000.

5 ITRF2008: computation strategy. <http://itrf.ensg.ign.fr/2008>.

6 成英燕. ITRF2008 框架简介[J]. 大地测量与地球动力

学,2012,(1):47-50. (Cheng Yingyan. Brief introduction of ITRF2008 frame[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012,(1):47-50)

7 王振龙,胡永宏. 应用时间序列分析[M]. 北京:科学出版社,2007. (Wang Zhenlong and Hu Yonghong. Time series analysis[M]. Beijing: Science Press, 2007)

8 Dong D N, et al. Anatomy of apparent seasonal variations from GPS derived site position time series[J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107(B4):9-16.

9 闫浩明,等. 温度变化对我国 GPS 台站垂直位移的影响[J]. 地球物理学报, 2010,53(4):825-832. (Yan Haoming, et al. Thermal effects on vertical displacement of GPS stations in China[J]. Chinese J Geophys., 2010,53(4):825-832)