

文章编号: 1671-5942 (2008) 05-0068-06

Ratio 值累积法动态快速确定 GNSS 双差模糊度^{*}

唐卫明¹⁾ 孙红星²⁾ 陈 江³⁾

- 1) 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 武汉 430079
2) 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉 430079
3) 92493 部队 22 分队, 辽宁 125000

摘 要 在 LAMBDA 方法搜索 GNSS 双差模糊度的基础上, 根据单历元模糊度搜索的特点, 提出了一种多历元动态快速确定模糊度的方法——Ratio 值累积法。介绍了利用 Ratio 值累积法逐步确定宽巷模糊度、 L_1 和 L_2 载波相位模糊度的技术, 用实例证明该方法集成了单历元整周模糊度搜索速度快、简单, 多历元模糊度确定可靠性高的优点。

关键词 GNSS; LAMBDA 方法; Ratio 值累积法; 双差模糊度; 单历元
中图分类号: P207⁺. 1 **文献标识码**: A

METHOD OF RATIO ACCUMULATION OF GNSS AND FAST DOUBLE-DIFFERENCED AMBIGUITY RESOLUTION

Tang Weiming¹⁾, Sun Hongxing²⁾ and Chen Jiang³⁾

- 1) GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079
2) The School of Remote Sensing Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079
3) Unit No 22, 92493, Liaoning 125000

Abstract On the basis of LAMBDA method and the characteristics of single epoch ambiguity resolution, this paper proposes a method of multiple epoch ambiguity resolution——Ratio Accumulation Method and then introduced the wide-lane ambiguity resolution and L_1 and L_2 ambiguity resolution using Ratio Accumulation Method. At last, the results of examples indicate that Ratio Accumulation Method has advantages integrating single epoch ambiguity resolution's simplicity and high reliability of multiple epoch ambiguity resolution.

Key words: GNSS; LAMBDA method; ratio accumulation method; double-differenced ambiguity; single epoch

1 引言

目前, GNSS 高精度动态快速定位应用非常广泛, 而快速动态模糊度解算是高精度定位的关键。国内外很多学者对快速动态模糊度解算做了大量的研究, 并得到了很多实用的方法^[1-14]。本文基于 LAMBDA 方法, 根据作者的研究和数据处理实践,

提出一种多历元 Ratio 值累积算法, 该算法的单历元整周模糊度搜索速度快、简单, 多历元累积增加了模糊度确定的可靠性。

2 Ratio 值累积法确定双差模糊度

Ratio 值累积法的基本思想是在单历元模糊度搜索的基础上, 一个错误的模糊度可以偶然出现, 但

^{*} 收稿日期: 2008-05-20
基金项目: 国家自然科学基金 (40501060); 国家 863 高科技计划项目 (2006AA12Z326)
作者简介: 唐卫明, 博士, 讲师, 主要从事 GNSS 导航定位算法和应用研究. E-mail: wmtang@whu.edu.cn

不会多次进行重复,随着历元数的增加,正确模糊度出现次数越来越多,并增多到特别显著的程度。该方法分为以下几步来实现:

1)单历元浮点解求取和模糊度搜索。每个历元独立的求取模糊度的浮点解,然后用 LAMBDA 方法进行模糊度搜索,得到一组模糊度和一个表征模糊度可靠性的指标——Ratio 值。

2)累加模糊度组合 Ratio 值。经过一定历元数以后,就会搜索到多组模糊度,把相同的模糊度组合的 Ratio 值按照一定方法进行相加。

3)固定模糊度。随着历元的增加,正确模糊度组合的 Ratio 值会越来越大,当超过某一个域值,就认为模糊度固定正确。

运用 Ratio 值累积法快速动态确定模糊度的过程为首先确定宽巷的模糊度,然后利用宽巷测相伪距求解 L₁、L₂ 模糊度的浮点解,确定 L₁、L₂ 载波的模糊度。

2.1 Ratio 值累积法确定宽巷模糊度

1)求解宽巷模糊度的浮点解

P 码伪距和宽巷观测值组成联合方程:

$$\begin{matrix} l_{p1} & B & 0 & & v_{p1} \\ l_{p2} & = & B & 0 & a \\ & & & & b \\ l_{WL} & B & I & v_{WL} & v_{WL} \end{matrix} \quad (1)$$

其中, B 为 GPS 观测值的系数矩阵, v_{WL} 为宽巷观测值的波长, b 为模糊度向量, a 为基线向量, I 为单位阵, v_{p1} 、 v_{p2} 、 v_{WL} 分别为载波 L₁、L₂ 上的伪距、宽巷观测值改正数。 l_{p1} 、 l_{p2} 、 l_{WL} 为载波 L₁、L₂ 上的伪距、以米为单位的宽巷观测值与几何距离之差。

解求方程组 (1), 可以得出宽巷观测值的模糊度浮点解及其协因数阵。

2)搜索出宽巷模糊度

利用 1)中求出的模糊度浮点解、相应协方差阵和 LAMBDA 方法就可以搜索出第 i 历元的模糊度 $N_i(N^1, N^2, \dots, N^j)$ 和一个 $Ratio_i$ 值。

3)确定宽巷模糊度

把多个历元的搜索出来的相同模糊度的 Ratio 值相加,就得到这组模糊度相应的累积 Ratio 值,当某一组模糊度的累积 Ratio 值大到一定的程度时,就认为该组模糊度为正确的模糊度组合。

若已经完成了 n 个历元宽巷模糊度求解,则有:

$$N_i(N^1, N^2, \dots, N^j) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$Ratio_i$

其中 j 为卫星编号。对 N_i 进行比较,对同一组模糊度值的 $Ratio_i$ 进行相加。设模糊度组合 \tilde{N} 有 5 次出现,分别为 (i = 1, 3, 5, 7, 9) 的时候,则对于模糊度组

合 \tilde{N} , 就有 $Ratio_{ALL}$ 为:

$$Ratio_{ALL} = Ratio_1 + Ratio_3 + Ratio_5 + Ratio_7 + Ratio_9 \quad (3)$$

当 $Ratio_{ALL}$ 满足下面条件的时候,就认为模糊度组合 \tilde{N} 为正确的模糊度:

$$Ratio_{ALL} > M$$
$$Ratio_{ALL_{次小}} > Ratio_{ALL_{最小}} \quad (4)$$

M、为给定的正数。

2.2 Ratio 值累积法搜索 L₁、L₂ 模糊度

本步利用 2.1 固定的宽巷观测值的模糊度求解 L₁、L₂ 观测值的模糊度。宽巷观测值的模糊度与 L₁、L₂ 观测值的模糊度的关系为:

$$N_1 = N_{WL} + N_2 \quad (5)$$

宽巷伪距和 L₁、L₂ 观测值组成联合方程:

$$\begin{matrix} l_{WL} & B & 0 & & v_{WL} \\ l_1 & = & B & I & a \\ & & & & b \\ l_2 & B & I & v_2 & v_2 \end{matrix} \quad (6)$$

其中, B 为 GPS 观测值的系数矩阵, v_1 、 v_2 为载波观测值 L₁、L₂ 的波长, b 为模糊度向量, a 为基线向量, I 为单位阵, v_{WL} 、 v_1 、 v_2 分别为宽巷伪距、载波 L₁、L₂ 观测值改正数。 l_{WL} 、 l_1 、 l_2 分别为以米为单位宽巷伪距、载波 L₁、L₂ 观测值与几何距离之差。

将式 (5) 代入方程 (6) 中,消除 L₂ 观测值的模糊度,剩下 L₁ 观测值的模糊度参数和三维坐标参数。求解方程 (6) 可以得到 L₁ 模糊度的浮点解。

用类似于确定宽巷模糊度的方法,确定 L₁ 的模糊度,然后由式 (5) 计算 L₂ 的模糊度。为了确保模糊度的正确性,一般采用 L₁ 的模糊度和 L₂ 的模糊度的线性关系进行验证,该关系在高星伟^[6] 的博士论文中已有较为详细的论述。

3 Ratio 值累积法中模糊度改变时的处理方法

Ratio 值累积法的优点是每个历元独立进行整周模糊度搜索,建立方程和求解都非常简单,多个历元综合确定模糊度,可以增加模糊度的可靠性。该方法的难点是周跳的检测和修复,以及新卫星升起时候的处理。下面将对这两种情况的处理方法进行简要说明。

3.1 模糊度个数变化时数据处理方法

模糊度个数变化分为两种,一种是捕获到新的卫星,模糊度个数增加,另外一种卫星失锁,模糊度个数减少。其中,模糊度个数减少处理相对容易,只是最后模糊度组合中少一颗卫星的模糊度,并不

影响其他卫星的模糊度。因此这里只介绍两种处理模糊度个数增加的方法。

1)固定模糊度个数。在开始搜索模糊度时,就固定模糊度的个数,当新的卫星升起时,不纳入到模糊度固定的选择卫星组合中来,只有当模糊度确定好以后,再利用已经固定好的模糊度反算新卫星的模糊度。这种方法实现起来比较简单,但是要求开始搜索的时候卫星数比较多和确定模糊度的时间不能太长。

2)反算新的卫星的模糊度。当有新的模糊度出现的时候,就把其他卫星的模糊度当成已知,反算新卫星的模糊度。如果当前已经有 n 组模糊度组合,则需要计算 n 个对应的新卫星的模糊度。

3.2 发生周跳时数据处理方法

在未完全确定模糊度之前,有可能某颗卫星发生周跳,模糊度就会发生变化。下面介绍冗余观测值法解决周跳问题。

设某颗卫星发生周跳时,已经有 n 组模糊度组合备选值:

$$N_i(N^1, N^2, \dots, N^j) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (7)$$
$$Ratio_i$$

如果没有卫星发生周跳,则在短时间内, n 组模糊度解算出来的定位结果都会有比较好的自治性。一旦某一颗卫星发生周跳,则所有备选值模糊度的

自治性会被破坏,可以用排除法来找到发生周跳的卫星,然后直接用其他卫星的定位解算结果反算发生周跳卫星的新模糊度。

4 算例分析

4.1 短距离单基线算例分析

该算例为 2002 年 9 月 2 日用 Trimble 接收机以 1 s 采样间隔采集的 732 个历元数据,基线长度约为 3.6m。由高精度静态数据处理软件 Bemese5.0 计算得到模糊度信息如表 1。

按照 2.1 中介绍单历元宽巷模糊度搜索方法,前 10 个历元的宽巷模糊度搜索结果如表 2 所示。

参考表 1,从表 2 可以看出,前 10 个历元中,9 个历元搜索到正确宽巷模糊度,1 个历元搜索到错误的模糊度组合(表 2 中的第 5 个历元),但是单个历元最大的 Ratio 值为第 7 个历元的 6.574,难以确定模糊度是否正确。如果对累积 Ratio 值进行相加,就可以得到 2 组模糊度和相应的累积 Ratio 值(表 3)。

从表 3 可以看出,第一个模糊度组合的累积 Ratio 值达到 27.936,明显大于第二个模糊度组合的累积 Ratio 值,因此可以确定第一组模糊度为正确的模糊度。

表 1 算例双差整周模糊度参考值

Tab 1 The reference of double difference integer ambiguities in the examples

卫星	L ₁ 模糊度	L ₂ 模糊度	宽巷模糊度	窄巷模糊度	参考卫星
5	- 895 481	- 692 630	- 202 851	- 1 588 111	30
14	- 583 252	- 56 570	- 526 682	- 639 822	30
18	- 1 385 191	- 1067 288	- 317 903	- 2452 479	30
21	- 505 040	- 363 971	- 141 069	- 869 011	30
25	- 476 410	240 820	- 717 230	- 235 590	30

表 2 单历元宽巷模糊度搜索结果

Tab 2 Wide-lane ambiguities searched by using single epoch observables

历元	卫星及相应模糊度组合					Ratio 值
	5	14	18	21	25	
1	202 851	526 682	317 903	141 069	- 717 230	1.372
2	202 851	526 682	317 903	141 069	- 717 230	2.996
3	202 851	526 682	317 903	141 069	- 717 230	5.355
4	202 851	526 682	317 903	141 069	- 717 230	3.484
5	202 852	526 683	317 903	141 069	- 717 231	1.398
6	202 851	526 682	317 903	141 069	- 717 230	1.485
7	202 851	526 682	317 903	141 069	- 717 230	6.574
8	202 851	526 682	317 903	141 069	- 717 230	2.380
9	202 851	526 682	317 903	141 069	- 717 230	1.019
10	202 851	526 682	317 903	141 069	- 717 230	3.271

表 3 Ratio 值累积法宽巷模糊度搜索结果

Tab 3 Wide-lane ambiguities searched by using Ratio accumulation method

组合	卫星及相应模糊度					积 Ratio 值
	5	14	18	21	25	
1	202 851	526 682	317 903	141 069	- 717 230	27. 936
2	202 852	526 683	317 903	141 069	- 717 231	1. 398

当宽巷模糊度确定以后,按照 (2 2)中介绍的方法,在第 10 个历元开始确定 L_1 、 L_2 载波相位模糊度。在实际的解算中,一般先求出 L_1 的浮点解,然后

后用 LAMBDA 方法搜索出 L_1 整周模糊度,结果列于表 4。

表 4 宽巷伪距单历元确定 L_1 模糊度结果

Tab 4 L_1 ambiguities searched by using single epoch wide-lane observations

历元	类型	卫星及相应模糊度					Ratio 值
		5	14	18	21	25	
10	浮点解	- 895 480. 892	- 583 251. 986	- 1 385 190. 955	- 505 040. 095	- 476 409. 929	60. 005
	固定解	- 895 481	- 583 252	- 1 385 191	- 505 040	- 476 410	
11	浮点解	895 480. 943	583 252. 042	1 385 190. 989	505 040. 084	- 476 410. 019	62. 945
	固定解	- 895 481	- 583 252	- 138 5191	- 505 040	- 476 410	

由表 4 可以看出,利用单个历元宽巷伪距确定的模糊度 Ratio 值比较高,两个历元都在 60 以上,说明模糊度正确的可能性很大,再用 Ratio 值进行累积可以达到 120,足以说明该模糊度组合是正确的。

由于宽巷模糊度已知,由宽巷模糊度和 L_1 模糊度求出 L_2 的模糊度后,可以通过 L_1 、 L_2 模糊度之间的线性关系进一步验证模糊度的正确性 (表 5)。

从表 5 可以看出,所有的 L_2 模糊度的误差值都在 0. 1 周以下,与直接由观测噪声引起的误差大小一致。因此,进一步验证了该组模糊度的正确性。

4. 2 中长距离单基线算例分析

该算例为 2004 年 12 月 1 日用 Javad 接收机以 1 s 采样间隔采集的 2 小时数据,基线长度约为 22. 78 km。由高精度静态数据处理软件 Bemese5. 0 计算得到的模糊度信息如表 6 所示。

按照 (2 1)中介绍的方法,单历元搜索宽巷观测值的模糊度,前 10 个和第 282、283、284 个历元的模糊度搜索结果如表 7 所示。

表 5 L_1 、 L_2 模糊度线性关系得出的 L_2 模糊度的误差值

Tab 5 Errors of L_2 based on difference between ambiguities of carrier phase L_1 and L_2

卫星	L_1 模糊度	L_2 模糊度	L_2 模糊度的误差值 (周)
5	- 895 481	- 692 630	0. 057 4
14	- 583 252	- 56 570	0. 031 8
18	- 1 385 191	- 1 067 288	0. 049 7
21	- 505 040	- 363 971	0. 003 0
25	- 476 410	240 820	0. 036 0

表 6 算例双差整周模糊度参考值

Tab 6 Reference for double difference integer ambiguities in examples

卫星	L_1 模糊度	L_2 模糊度	宽巷模糊度	窄巷模糊度	参考卫星
8	- 12	- 48	36	- 60	11
27	- 15	- 57	42	- 72	11
28	- 74	- 38	- 36	- 112	11
19	- 8	- 5	- 3	- 13	11
31	- 56	- 48	- 8	- 104	11
7	- 110	- 63	- 47	- 173	11

表 7 单历元搜索宽巷模糊度结果

Tab 7 Wide-lane ambiguities searched by using single epoch observables

历元	卫星及相应模糊度组合						Ratio 值
	8	27	28	19	31	7	
1	36	42	- 36	- 3	- 8	- 47	6. 132
2	36	42	- 36	- 3	- 8	- 47	2. 145
3	36	42	- 36	- 3	- 8	- 47	2. 663
4	36	42	- 36	- 3	- 8	- 47	1. 177
5	36	42	- 36	- 3	- 8	- 47	1. 066
6	36	42	- 36	- 3	- 8	- 47	1. 854
7	36	42	- 36	- 3	- 8	- 47	1. 674
8	36	42	- 36	- 3	- 8	- 47	2. 112
9	36	42	- 36	- 3	- 8	- 47	1. 664
10	36	42	- 36	- 3	- 8	- 47	1. 585
281	36	42	- 35	- 2	- 7	- 46	2. 039
282	36	42	- 35	- 2	- 7	- 46	1. 912
283	36	42	- 36	- 3	- 8	- 47	3. 654

从表 7 可以看出,前 10 个历元搜索到正确宽巷模糊度,但是对于单个历元来说,最大的 Ratio 值为第 1 个历元的 6 132,难以确定模糊度是否正确。用 Ratio 值累积法,得到前 10 个历元的模糊度组合和相应的累积 Ratio 值如表 8 所示。

表 8 Ratio 值累积法宽巷模糊度搜索结果
Tab 8 Wide-lane ambiguities searched by using Ratio Accumulation Method

组合	卫星及相应模糊度						累积 Ratio 值
	8	27	28	19	31	7	
1	36	42	- 36	- 3	- 8	- 47	20.488

从表 8 可以看出,唯一一组模糊度组合的累积 Ratio 值为 20.488,因此可以确定该组模糊度为正确

表 9 宽巷伪距单历元确定 L_1 模糊度结果
Tab 9 L_1 ambiguities searched by using single epoch wide-lane observables

历元	类型	卫星及相应模糊度						Ratio 值
		8	27	28	19	31	7	
10	浮点解	- 12 175	- 14 529	- 73 840	- 8 677	- 56 122	- 109 931	2.878
	固定解	- 12	- 15	- 74	- 9	- 56	- 110	
11	浮点解	- 12 180	- 14 517	- 73 864	- 8 709	- 56 141	- 109 969	6.045
	固定解	- 12	- 15	- 74	- 9	- 56	- 110	
12	浮点解	- 12 173	- 14 546	- 73 845	- 8 687	- 56 137	- 109 96	3.30
	固定解	- 12	- 15	- 74	- 9	- 56	- 110	
13	浮点解	- 12 191	- 14 579	- 73 825	- 8 733	- 56 192	- 110 000	4.849
	固定解	- 12	- 15	- 74	- 9	- 56	- 110	
14	浮点解	- 12 169	- 14 553	- 73 838	- 8 732	- 56 132	- 109 959	5.943
	固定解	- 12	- 15	- 74	- 9	- 56	- 110	

由宽巷模糊度和 L_1 模糊度求出 L_2 的模糊度后,可以通过 L_1 、 L_2 模糊度之间的线性关系进一步验证模糊度的正确性,第 14 个历元的结果如表 10 所示。

从表 10 中可以看出, L_2 模糊度的误差值,比第一个短基线算例中的误差值要大,因为不仅包含了观测噪声,还包括了双差剩余残差的影响。因此,在验证的时候可以根据基线的长度适当放大限差。

表 10 L_1 、 L_2 模糊度线性关系得出的 L_2 模糊度的误差值
Tab 10 Errors of L_2 based on difference between ambiguities of carrier phase L_1 and L_2

卫星	L_1 模糊度	L_2 模糊度	L_2 模糊度的误差值 (周)
8	- 12	- 48	- 0.068
27	- 15	- 57	0.257
28	- 74	- 38	0.163
19	- 8	- 5	0.107
31	- 56	- 48	- 0.035
7	- 110	- 63	0.009

的模糊度。与上一个算例不同的是,本算例在第 281 个历元和 282 个历元搜索出错误解,如表 8 所示,并且 Ratio 值分别为 2.039 和 1.912,但到第 281 个历元,前面历元搜索的宽巷模糊度累积 Ratio 值结果已经达到 298.068,相比较可以确定这两次搜索是错误的模糊度。

当宽巷模糊度确定以后,按照 2.2 中介绍的方法,在第 10 个历元开始确定 L_1 、 L_2 载波相位模糊度。LAMBDA 方法搜索出 L_1 整周模糊度 (表 9)。

由表 2~4 可以看出,利用单历元宽巷伪距确定的模糊度 Ratio 值都不是很高,5 个历元累积起来以后为 23.015,足以说明该模糊度组合是正确的。

5 结语

介绍了 Ratio 值累积法和模糊度发生变化时的处理方法,用 Ratio 值累积法先固定宽巷模糊度、然后再用宽巷伪距辅助固定 L_1 、 L_2 载波相位的模糊度,实现了快速动态固定模糊度。固定模糊度的过程充分运用了宽巷观测值的波长长、相对噪声小的优点,单历元模糊度搜索模型相对简单,多历元模糊度搜索结果的 Ratio 值累积模糊度更加可靠的优点。从算例数据结果分析来看,可在 10~20 s 中完成模糊度的固定。

参 考 文 献

1 Hatch R R. The Synergism of code and carrier measurements [A]. Proceedings of the third International symposium on satellite doppler positioning [C]. Las Cruces, NM, Feb, 1982

Polytechnical University Press, 2000. (in Chinese)

- 8 魏木生. 广义最小二乘问题的理论和计算 [M]. 北京: 科学出版社, 2006
- 8 Wei Musheng. Generalized least squares theory and calculation [M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- 9 Van Huffel S and Vandewalle J. The total least squares prob-

lem [J]. Computational Aspects and Analysis, Frontiers in Applied, Mathematics, SIAM, Philadelphia, 1991, 9: 34 - 35; 84 - 86

- 10 Burkhard S. A note on constrained total least-squares estimation [J]. Linear Algebra and Its Applications, 2006, 417: 245 - 258.

(上接第 72 页)

- 2 Hatch R R. Dynamic differential GPS at the centimeter level [A]. Proceedings of the fourth international symposium on geodetic symposium on satellite positioning [C]. Las Cruces, NM, April, 1986
- 3 Hatch R R. Instantaneous ambiguity resolution [A]. IAG symposium No. 107 kinematic systems in geodesy, surveying, and remote sensing [C]. Banff, Canada, September 10 - 13 1990, Springer Verlag, 1990: 299 - 308
- 4 Hatch R and Euler H J. Comparison of several AROF kinematic techniques [A]. Proceedings of ION GPS - 94 [C]. Salt Lake City, Utah, September 20 - 23, 1994: 363 - 370
- 5 陈小明. 高精度 GPS 动态定位的理论与实践 [D]. 武汉测绘科技大学, 1997.
- 5 Chen Xiaoming. Research on the theory and practice of high precision GPS kinematic positioning [D]. Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1997. (in Chinese)
- 6 高星伟. GPS/GLONASS 网络 RTK 算法研究与程序实现 [D]. 武汉大学, 2002
- 6 Gao Xinwei. The algorithmic research of GPS/GLONASS network RTK and its program realization [D]. Wuhan University, 2002. (in Chinese)
- 7 李淑慧. 整周模糊度搜索方法的比较研究 [D]. 武汉大学, 2002
- 7 Li Shuhui. Comparing research on integer GPS ambiguity searching methods [D]. Wuhan University, 2002. (in Chinese)
- 8 孙红星. 差分 GPS/INS 组合定位定姿及其在 MMS 中的

应用 [D]. 武汉大学, 2004

- 8 Sun Hongxing. DGPS/INS integrated position and attitude determination and its application in MMS [D]. Wuhan University, 2004. (in Chinese)
- 9 喻国荣. 基于移动参考站的 GPS 动态相对定位算法研究 [D]. 武汉大学, 2003
- 9 Yu Guorong. Research on kinematic GPS positioning relative to a moving reference [D]. Wuhan University, 2003. (in Chinese)
- 10 Hatch R R. The promise of a third frequency [J]. GPS World, May, 1996: 55 - 58
- 11 Teunissen P J G. Least-squares estimation of the integer GPS ambiguities [A]. IAG General Meeting [C]. Beijing, China, August, 1993
- 12 Teunissen P J G, de Jonge P J and Tiberius C C J M. The volume of the GPS ambiguity search space and its relevance for integer ambiguity resolution [A]. Proceedings of ION GPS - 96, 9th international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation [C]. Kansas City, Missouri, Sept 17 - 20, 1996: 889 - 898
- 13 Teunissen P J G. On the geometry of the ambiguity search space with and without ionosphere [J]. Z F Vermessen, 1996, 121 (7): 332 - 341.
- 14 Teunissen P J G, de Jonge P J and Tiberius C C J M. The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: its performance on short GPS baselines and short observation spans [J]. Journal of Geodesy, 1997, 71 (10): 589 - 602