

目 录

1、实习目的.....	2
2、实习原理.....	2
2.1 RTCM v2.x 差分协议.....	2
2.1.1 RTCM 标准协议.....	2
2.1.2 RTCM 协议通用电文格式.....	2
2.1.3 RTCM 电文 1（伪距差分改正数）.....	4
2.2 伪距差分改正电文解码.....	6
2.2.1 RTCM 用户设备接口.....	6
2.2.2 RTCM 电文 1 解码过程概述.....	6
2.2.3 解码步骤.....	7
2.3 伪距差分定位原理.....	8
2.3.1 差分改正数.....	9
2.3.2 差分改正数的误差分析.....	10
3、程序设计流程.....	11
3.1 解码流程.....	11
3.2 伪距差分定位流程.....	14
4、结果与精度分析.....	15
4.1 结果输出.....	15
4.1.1 解码结果.....	15
4.1.2 定位结果.....	16
4.1.3 定位内符合精度.....	18
4.1.4 定位外符合精度.....	20
4.2 精度分析.....	22
4.2.1 内符合与外符合精度分析.....	22
4.2.2 与 SPP 定位结果的对比.....	23

1、实习目的

卫星导航课程设计是卫星导航学和卫星导航数据处理课程的实践课程,通过该课程的学习和实践,加深对卫星导航定位相关理论与方法的理解,培养学生卫星导航定位技术的应用能力。

通过比对伪距单点定位 (SPP) 和伪距差分定位的结果精度,进一步认识引入差分改正数能带来多大程度的精度提升。锻炼学生的独立思考能力,编程能力,分析与解决问题的能力。

2、实习原理

2.1 RTCM v2.x 差分协议

2.1.1 RTCM 标准协议

国际海运事业无线电技术委员会 (RTCM) 于 1983 年 11 月为推广应用差分 GPS 业务,成立 SC-104 专门委员会,并制定了标准差分协议。1985 年发表了 V1.0 版本的建议文件。经过 5 年的试验,1990 年公布了 V2.0 版本,该版本中只有伪距差分的信息,没有载波相位的信息,主要用于导航服务。随着网络差分 GPS 的出现,RTCM 的 V3.0 版本增加了用于传输网络差分改正数的电文。新的版本提高了差分改正数的抗差性能,增大了可用信息量,提高了定位精度。伪距差分的精度由早期版本的 8-10m 提高到 1m 左右,载波相位差分可达到厘米级精度。

2.1.2 RTCM 协议通用电文格式

RTCM 电文由两部分组成: 电文头部分 (2 个字长) 和电文主体部分 (N 个字长)。每个字有 30 位。字长与奇偶校验规则与 GPS 导航电文相同。

RTCM电文头部分		RTCM电文主体部分				
Word 1		Word 2	Word 3	Word 4	Word N
1	2	...	30			

图 1 RTCM 电文的整体结构

RTCM 差分协议由二进制编码的数据流组成,每种电文帧长为 (N+2) 个字,每个字由 30bit 构成,分解为 5 个 6bit 的字节,其中电文头 2 个字称为通用电文 (电文头具体结构如图 2 所示),电文信息包含在 N 个字中,N 随电文类型不同而不同。第 25~30 位构成字节 5,字节 5 为奇偶校验码,用于检验接收到的电文信息。

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	WORD 1
PREAMBLE								IDENTIFIER OF NAVIGATION MESSAGE				IDENTIFICATION NUMBER OF THE BASE STATION								PARITY CONTROL										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	WORD 2
MODIFIED Z COUNTER													LENTH OF MESSAGE		NUMBER OF SEQUENCES			STATE OF WORKING		PARITY CONTROL										

图 2 RTCM 电文头具体结构

COLOUR	NAME	NUMBER OF BITS	MEANING
	PREAMBLE	8	Identical for all types of messages (01100110)
	IDENTIFIER OF NAVIGATION MESSAGE TYPES	6	Identifies the message type 0-63
	IDENTIFICATION NUMBER OF THE BASE STATION	10	Identification number of the DGPS base station; band 0-1023
	MODIFIED Z COUNTER	13	Represents reference time for differential data transmission
	NUMBER OF SEQUENCES	3	Number of sequences
	THE LENTH OF THE MESSAGE	5	The number of words in messages; 0-31
	STATE OF WORKING	3	State of reference station; 8 states: 0 = scale factor UDRE = 1 1 = scale factor UDRE = 0.75 2 = scale factor UDRE = 0.5 3 = scale factor UDRE = 0.3 4 = scale factor UDRE = 0.2 5 = scale factor UDRE = 0.1 6 = transmission is not monitoring 7 = incorrect working of reference station
	PARITY CONTROL	N*6	N – number of words in the message
	NONSIGNIFICAT BITS	N*10	N – number of words in the message

字 码	内 容	bit 数	比例因子	范 围
第一字码	引导字	8		
	帧识别	6	1	1~64
	基准站识别	10	1	0~1023
	奇偶校验	6		
第二字码	修正 Z 计数	13	0.6S	0~3599.4S
	序号	3	—	0~7
	帧长(N+2)	5	1 字码	2~33 字码
	基准站健康状况	3	—	8 状态
	奇偶校验	6		—

图 3 RTCM 电文头每个元素的具体内容

PS: 注意解码得到的修正 Z 计数，勿忘乘以 0.6

2.1.3 RTCM 电文 1（伪距差分改正数）

RTCM 电文主体部分由 N 个字组成，每个卫星的信息包括：UDRE，NUMBER ID OF SATELLITE（卫星号 PRN），PSEUDORANGE CORRECTION（伪距改正数 PRC），SPEED OF PSEUDORANGE（伪距改正数变化率 RRC），AGE OF DATA（数据参考时间，也记为 IOD）。每颗卫星的信息占 40 个 bit。

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Words 3, 8, 13, 18
s	UDRE			NUMBER ID OF SATELLITE				PSEUDORANGE CORRECTION																PARITY CONTROL						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Words 4, 9, 14, 19
SPEED OF PSEUDORANGE CHANGES								AGE OF DATA								s	UDRE	NUMBER ID OF SATELLITE				PARITY CONTROL								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Words 5,10, 15, 20
PSEUDORANGE CORRECTION																SPEED OF PSEUDORANGE CHANGES								PARITY CONTROL						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Words 6, 11, 16, 21
AGE OF DATA								s	UDRE	NUMBER ID OF SATELLITE				PSEUDORANGE CORRECTION								PARITY CONTROL								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Words 7, 12, 17, 22
PSEUDORANGE CORRECTION								SPEED OF PSEUDORANGE CHANGES								AGE OF DATA								PARITY CONTROL						
•																														Words 7, 12, 17, 22
•																														Words 8, 13, 18
•																														Words 9, 14, 19
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Words N_s+2 If $N_s=1,4,7,10$
SPEED OF PSEUDORANGE CHANGES								AGE OF DATA								FILL								PARITY CONTROL						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Words N_s+2 If $N_s=2,5,8,11$
AGE OF DATA								FILL																PARITY CONTROL						

图 4 RTCM 导航电文主体部分

COLOUR	NAME	NUMBER OF BITS	MEANING		
Yellow	S	1	Scale factor – precision of measurement	Scale factor for PRC	Scale factor for RRC
			Value - 0 – for corrections of low precision pseudorange corrections	0.02 m	0.002 m/s
			Value - 1 – for corrections of higher precision pseudorange corrections	0.32 m	0.032 m/s
Green	UDRE	2	User Differential Range Error – estimated root-mean-square of pseudorange measurement; 4 states; $UDRE = \sqrt{\delta_r^2 + \delta_g^2}$ δ_r^2 – root-mean-square of base station pseudorange measurement δ_g^2 – root-mean-square of base station antenna position calculation 0 => UDRE ≤ 1 meter 1 => 1 meter < UDRE ≤ 4 meters 2 => 4 meters < UDRE ≤ 8 meters 3 => UDRE > 8 meters		
Green	Id NUMBER OF SATELLITE	5	Number of satellite; 1-32 (Value 0 means satellite number 32)		
Blue	PSEUDORANGE CORRECTION	16	Value of pseudorange (with „+” or „-”); when value 100 000 comes the satellite shouldn’t be used; range +/- 655,34 m (for 0,02 m scale factor) or +/- 10485,44 m (for 0,32 m scale factor)		
Dark Blue	RANGE RATE CORRECTION	8	Value of range rate correction (with „+” or „-”); range +/- 0,254 m/s (for 0,002 m/s scale factor) or +/- 4,064 m/s (for 0,032 m/s scale factor)		
Purple	AGE OF DATA	8	When reference station data are older than data that are used, then the data shouldn’t be used		
	FILLING	8 x [Ns mod 3]	Ns – number of satellites		
Red	PARITY CONTROL	N*6	N – number of words in the message		
Grey	NONSIGNIFICANT BITS	N*10	N – number of words in the message		

图 5 RTCM 电文主体部分每个元素的具体内容

RTCM 电文主体包含多个卫星的伪距改正数 PRC、伪距改正数的变化率 RRC,注意 PRC 和 RRC 解码时,要乘以比例因子 Scale Factor。

AGE OF DATA 是这颗卫星差分改正数的数据龄期,反应了基站计算差分改正数时所用的卫星星历的 IODE,只有当基站和观测站共用相同的卫星星历时,基站计算得到的差分改正数才能用于改正观测站的观测数据。所以要求该卫星电文 1 中的 AOD 与该卫星广播星历中的 IODE 相同,该卫星的伪距改正数才能使用。

伪距差分改正数 PRC 是由基准站根据伪距、载波相位观测数据和基站精确坐标计算得到。基站计算每颗卫星的伪距改正数和伪距变化率改正数,按照 RTCM 电文 1 格式进行编码,通过无线通信发送给用户接收机。根据伪距差分基准站算法,伪距改正数包括 GNSS 卫星星历误差、卫星钟误差、电离层延迟和对流层延迟误差。

用户接收机到伪距差分改正数后,可以计算当前时刻 t 的某 GPS 卫星伪距改正值

$$PRC(t) = PRC(t_0) + RRC(t_0) \times (t - t_0)$$

其中, $PRC(t_0)$ 为 t_0 时刻伪距改正数, $RRC(t_0)$ 为 t_0 时刻伪距改正数变化率,从电文

1 中可以得到。

当前时刻，用户接收机观测得到某 GPS 卫星的伪距，通过伪距差分改正，可得

$$P + PRC(t) = \rho + c \cdot dt_u - c \cdot dt^s + \varepsilon$$

使用单点定位算法，可以得到用户的伪距差分定位结果。

2.2 伪距差分改正电文解码

2.2.1 RTCM 用户设备接口

用户设备的接口应设计成能双工传输的串行 I/O 通用通信接口。常有 3 种串行接口可供选择：RS-232C、RS-422A 和标准通信口。用户在选用传输设备时，要选用每秒连续传送 30 个 8bits 字节的速率。在传输数据时，有两种格式可供差分基准站选用，即 6/8 和 8/8 格式。所有用户设备要具有能接收 6/8 和 8/8 格式的能力。

所有接收设备要求应用 6/8 格式，d1-d6 用于传输信息，d7 为标准位，设置为 1，d8 为空格，设置为 0。其中 d1 为最低有效位。在数据链传输数据时，都遵循最高有效位优先的规则（MSB）。而在使用 X3.15 标准通用异步接收机与发射机（UART）时，首先接收 LSB，所以引入了“字节滚动”的技术。将 d1 和 d6，d2 和 d5，d3 和 d4 交换（仅滚动数据位，d7,d8 不参与滚动），完成 6/8 格式的接收。

如图 6 所示，按照 RTCM 格式：一个字由 30bit 组成，前 24 位是有效数据位，后 6 位是奇偶校验位，每 6 位看作是一个数据块。因为是 6/8 格式并且已经进行了字节滚动，d1-d6 就是原数据块，d7，d8 分别为 1、0，重组成为一个 8 位的数据块，就是一个 unsigned char 大小的字节，可以用 unsigned char 类型进行存储。

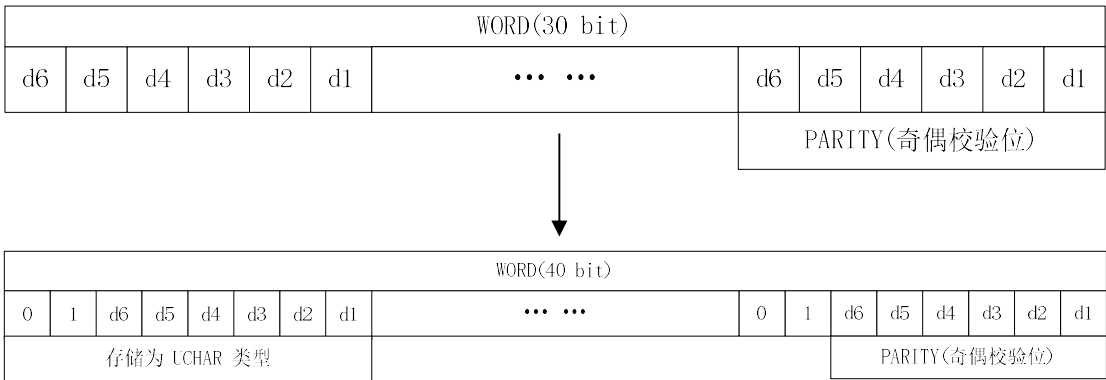


图 6 6/8 格式示意

2.2.2 RTCM 电文 1 解码过程概述

RTCM 电文由二进制编码的数据流组成。每一种 RTCM 电文是由 (n+2) 个 30bits 的字组成。每个字分解为 5 个 6bits 的字节。如果通用异步收发传输器（Universal Asynchronous Receiver/Transmitter，简称 UART）提供 8bits 字节，必须在读取之后立刻去掉两个最高位（MSB）。RTCM 电文格式采用 6/8（bit1-6，bit1 为 LSB）进行数据传输，每个字节在十进制 64-127 之间有效，否则无效。

在接收 RTCM 电文时,对每一 RTCM 电文字节是否取补码取决于上一个字的 bit30 (即 d30*), 如果 d30*为 1, 取补码, 否则取原码。

在取补码之前, 必须完成数据滚动和字节跳页, 字节跳页就是跳过这个 6 位的数据块, 取下一个 6 位的数据块, 字节跳页可能发生在寻找同步字的过程中, 因为这 6 位不是同步字, 这 6 位的补码依然不等于同步字, 那么再取下一个 6 位试试。但是注意: 任一 RTCM 电文的字节 5 (即奇偶校验位) 不能取补码。

在解码过程中需要同步, 可利用电文字头中的第一个字的先导字 01100110 (十进制 102) 进行同步。

为保证电文的完整性, RTCM 要设置奇偶校验位。利用误差探测算法产生得到 bit25-30, 与接收到的 bit25-30 进行比较。如果 RTCM 奇偶检验失败, 需要对 RTCM 电文重新同步。因为奇偶校验一旦失败, 这段 RTCM 电文就有问题, 不能使用它的差分改正数。

2.2.3 解码步骤

1) 字节扫描

RTCM 电文传输时, 通常只有低 6 位是有效位, 7、8 位是填充位, 7 位置“1”, 8 位置“0”。所以, 接收到的字节值只有在 64 ~ 127 之间, 才是有效的, 否则就要删除掉。

2) 字节滚动

由于 UART 为异步通信, 优先发送或接收低位数据, 接收到 RTCM 字节后必须进行“字节滚动”。7、8 两位不参与滚动。

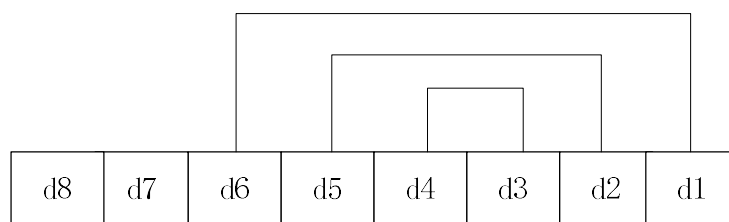


图 7 字节滚动

3) 低 6 位连接

按上述步骤处理连续 5 个 RTCM 字节后, 将前 4 个字节的低 6 位连接起来, 得到一个完整的 RTCM 字, 共 3 个字节。将第 5 个字节的低 6 位单独存放, 作为第 4 个字节。

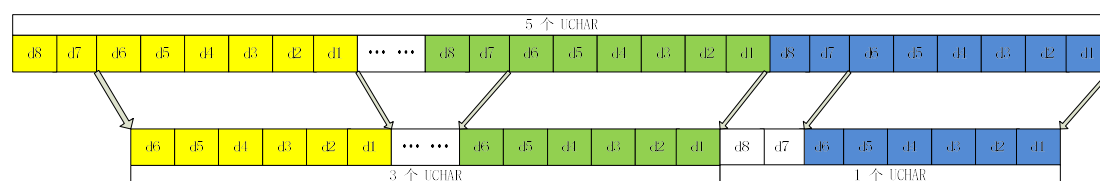


图 8 低 6 位连接示意

4) 字节取补码

如果上一个字的 bit30 (即 d30*) 为 1, 则前 3 个字节取补码, 否则取原码。

5) 字节跳页

如果第一个字节不等于同步码, 未能实现同步, 则跳过前 6 位, 处理接下来的 6 位数据块, 重组新的四个字节。

6) 电文同步

RTCM 电文每帧起始是引导字 01100110, 先在数据串中找到该序列, 然后进行奇偶校

验。若奇偶校验通过，则开始解码。如果能够正确解码，则认为该引导字正确，完成电文同步;若不能正确解码，则需要重新搜索引导字。

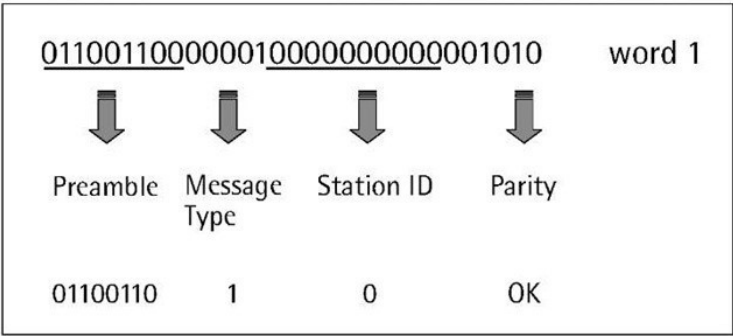


图 9 正确搜索到同步码

7) 奇偶校验

奇偶校验是根据接收到的 RTCM 数据计算出新的奇偶校验比特,并与当前接收到的奇偶校验比特比较。若两者一致，则校验通过;若不一致，则校验未通过，必须重新搜索引导字进行同步。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	29	30
25	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0
26	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1
27	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0
28	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1
29	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1
30	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0

注: 1. 表中第一列表示新的奇偶校验比特的序号, 第一行表示参与运算的比特序号, 其中 29、30 两位来自前一个字的最后两位;
2. “1”表示该位参与异或运算, “0”表示该位不参与异或运算

图 10 奇偶校验规则

2.3 伪距差分定位原理

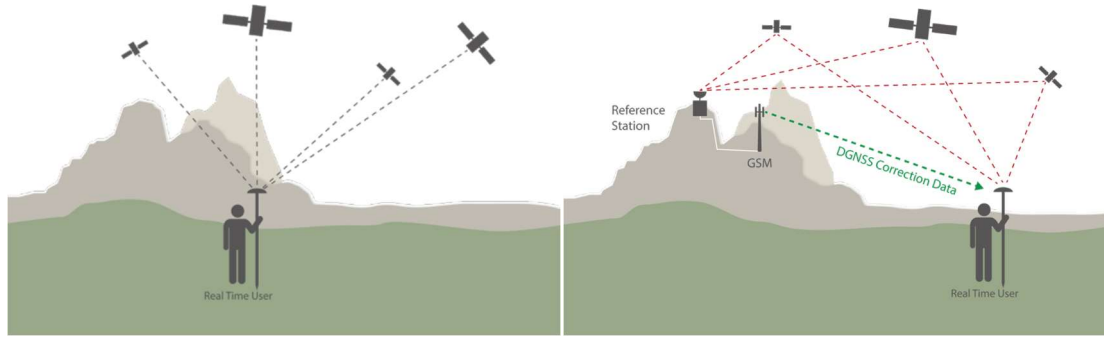
差分 GPS 系统包含着一个或多个安装在已知坐标位置点上的 GPS 接收机作为基准站接收机，通过基准站接收机对 GPS 卫星信号的测量而计算出差分校正量，然后将差分校正量播发给移动站接收机，以提高用户接收机的定位精度。

GPS 定位是利用一组卫星的伪距、星历、卫星发射时间等观测量和用户钟差来实现的。要获得地面的三维坐标，必须对至少 4 颗卫星进行测量。在这一定位过程中，存在 3 部分误差：

- 第一部分误差是由卫星钟误差、星历误差、电离层误差、对流层误差等引起的；
- 第二部分是由传播延迟导致的误差；
- 第三部分为各用户接收机固有的误差，由内部噪声、通道延迟、多径效应等原因造成。

利用差分技术，第一部分误差可以完全消除；第二部分误差大部分可以消除，消除程度主要取决于基准接收机和用户接收机的距离；第三部分误差则无法消除。

如图 11，对比伪距单点定位和伪距差分定位的区别。伪距差分定位是指在 GPS 基准站上观测所有卫星，根据基准站已知坐标和各卫星的坐标，求出每颗卫星每一时刻到基准站的真实距离。再与测得的伪距比较，得出伪距改正数，将其传输至用户接收机，提高定位精度。这种差分，能得到米级的定位精度。



(GSM: Global System for Mobile Communication)

图 11 伪距单点定位与差分定位的区别

伪距差分定位是指用户实时接收卫星信号和基站信号,伪距单点定位只需要接收卫星信号。

2.3.1 差分改正数

假定某颗卫星在 t 时刻的地心地固位置坐标为 $(X^{(i)}, Y^{(i)}, Z^{(i)})$,而一般由测绘得到的基准站(r)接收天线的位置坐标为 (X_r, Y_r, Z_r) ,那么从基准站 r 到卫星 i 的几何距离 $r_r^{(i)}$ 为:

$$r_r^{(i)} = \sqrt{(X^{(i)} - X_r)^2 + (Y^{(i)} - Y_r)^2 + (Z^{(i)} - Z_r)^2} + g_r^{(i)}$$

$g_r^{(i)}$: 由于卫星星历的误差, 计算出来的卫星位置有误差, 致使卫星几何距离中包含卫星星历误差项。

若基准站接收机对该卫星的伪距测量值为 $P_r^{(i)} = r_r^{(i)} + c(\delta t_r - \delta t^{(i)}) + I_r^{(i)} + T_r^{(i)} + \varepsilon_r^{(i)}$

因为基准站 r 位置已知, 并且卫星位置又可以根据星历算出来, 所以任意时刻基准站 r 至卫星的几何距离能被精准计算出来。那么他们两者之间的差异就是伪距测量误差, 而这个测量误差正是差分系统的基准站所要播发的关于卫星 i 的伪距差分校正量:

$$P_{\text{corr}}^{(i)} = r_r^{(i)} - P_r^{(i)}$$

可见差分校正量 $P_{\text{corr}}^{(i)}$ 实际上是以下多个测量误差量和偏差量之和:

$$P_{\text{corr}}^{(i)} = -c(\delta t_r - \delta t^{(i)}) - I_r^{(i)} - T_r^{(i)} - \varepsilon_r^{(i)}$$

计算出伪距差分校正量 $P_{\text{corr}}^{(i)}$ 之后, 基准站将 $P_{\text{corr}}^{(i)}$ 播发给其位于差分服务器范围之内内的所有接收机。

此时, 假如某个用户接收机(编号为 u)对卫星 i 的伪距测量量为 $P_u^{(i)}$, 那么为了消除或者降低 $P_u^{(i)}$ 中的测量误差, 用户接收机可将接收到的差分校正量 $P_{\text{corr}}^{(i)}$ 补加到自身的伪距测

量值 $P_u^{(i)}$ 上，由此得到差分校正后的伪距测量值 $P_{u,c}^{(i)}$ ，即：

$$P_{u,c}^{(i)} = P_u^{(i)} + P_{corr}^{(i)}$$

然后他可以根据对多颗卫星的差分校正后的伪距测量值 $P_{u,c}^{(i)}$ 实现绝对定位。

2.3.2 差分改正数的误差分析

我们将用户接收机的伪距测量值 $P_u^{(i)}$ 写成如下形式：

$$P_u^{(i)} = r_u^{(i)} + c(\delta t_u - \delta t^{(i)}) + I_u^{(i)} + T_u^{(i)} + \varepsilon_u^{(i)}$$

那么由 $P_{u,c}^{(i)} = P_u^{(i)} + P_{corr}^{(i)}$ 可得：

$$\begin{aligned} P_{u,c}^{(i)} &= r_u^{(i)} + c(\delta t_u - \delta t_r) + (I_u^{(i)} - I_r^{(i)}) + (T_u^{(i)} - T_r^{(i)}) + (\varepsilon_u^{(i)} - \varepsilon_r^{(i)}) \\ &= r_u^{(i)} + c\delta t_{ur} + I_{ur}^{(i)} + T_{ur}^{(i)} + \varepsilon_{ur}^{(i)} \end{aligned}$$

其中

$$\delta t_{ur} = \delta t_u - \delta t_r$$

$$I_{ur}^{(i)} = I_u^{(i)} - I_r^{(i)}$$

$$T_{ur}^{(i)} = T_u^{(i)} - T_r^{(i)}$$

$$\varepsilon_{ur}^{(i)} = \varepsilon_u^{(i)} - \varepsilon_r^{(i)}$$

如果用户与基准站之间的距离较短，以至于卫星 i 在这两观察点处的电离层延时 I 和对流层延时 T 均为相互近似相等，也就是说 $I_{ur}^{(i)}$ 和 $T_{ur}^{(i)}$ 均为零，所以，上式可以写为：

$$P_{u,c}^{(i)} = r_u^{(i)} + c\delta t_{ur} + \varepsilon_{ur}^{(i)}$$

这里 δt_{ur} 可以视为与用户接收机钟差 δt_u 性质一样的所需求解的未知变量，而 $\varepsilon_{ur}^{(i)}$ 代表主要由基站与用户两端的多路径和接收机噪声所引起的测量误差。

由用户接收机原始的伪距测量量 $P_u^{(i)}$ 与经差分校正之后的伪距量 $P_{u,c}^{(i)}$ 对比，我们可以看出以下几点：

(1) 在短基线情形下，差分校正后的伪距测量值 $P_{u,c}^{(i)}$ 不再包含电离层延时和对流层延时误差。

(2) 卫星钟差 $\delta t^{(i)}$ 在差分改正后被彻底根除。

(3) 在短基线情形下，卫星星历误差经差分校正后，基本被彻底抵消。

由于差分技术能基本消除测量值中空间相关性较强的电离层，对流层延时，卫星钟差和星历误差，因而利用差分校正后的伪距来实现定位通常比单点定位具有更高的准确度。

(4) 如果对两个互不相关又具有相同概率分布的正态随机变量做加减，那么结果的均方

差为原先单个随机变量均方差的 $\sqrt{2}$ 倍。考虑到多径和接收机噪声的空间不相关性，差分校正后的伪距 $P_{u,c}^{(i)}$ 的噪声量 $\varepsilon_{ur}^{(i)}$ 通常会比原先伪距 $P_u^{(i)}$ 的噪声量 $\varepsilon_u^{(i)}$ 还高，并且 $\varepsilon_{ur}^{(i)}$ 均方差可以近似的视为 $\varepsilon_u^{(i)}$ 均方差的 $\sqrt{2}$ 倍。虽然差分能够消除测量值中的误差和偏差，但是经差分校正后的测量值具有较强的噪声量，这是差分技术的一大缺点。

因为伪距差分校正量 $P_{\text{corr}}^{(i)}$ 的大小会随着时间的推移变化，可是用户接收机一方面并不定于基准站接收机在同一时刻对卫星信号进行测量；另一方面，又可能发生短暂性的接收不到基准站所播发的内容，包括差分校正量信息的无线电信号情况，所以基准站仅播发在有限时间点上的差分量会时常难以让用户接收充分，有效的利用差分服务资源。为了解决这一问题，基准站除了播发 t_m 时刻的伪距差分校正量 $P_{\text{corr}}^{(i)}(t_m)$ 之外，它通常还要计算，播发该时刻的伪距变化率校正量 $\dot{P}_{\text{corr}}^{(i)}(t_m)$ 。这样，若用户接收到 t_m 时刻的差分校正参数 $P_{\text{corr}}^{(i)}(t_m)$ 与 $\dot{P}_{\text{corr}}^{(i)}(t_m)$ ，则 t 时刻的伪距校正量 $P_{\text{corr}}^{(i)}(t)$ 可以通过下式计算：

$$P_{\text{corr}}^{(i)}(t) = P_{\text{corr}}^{(i)}(t_m) + \dot{P}_{\text{corr}}^{(i)}(t_m) \times (t - t_m)$$

由上式计算得到的伪距校正量 $P_{\text{corr}}^{(i)}(t)$ 的准确度通常会随着时间 t 与 t_m 之间差异的增加而降低。

(5)因为多路径信号缺乏空间相关性，所以多路径通常称为差分系统的主要来源。当基准站与流动站之间的基站距离变长时，电离层延时和对流层延时的空间相关性会随之降低，于是他们的差分误差有可能超过多路径误差而在差分系统中误差源中占据主导地位。如果基准站和流动站两端分别同时采用他们对当地的对流层延时模型而对对流层延时进行精确估算，那么经如此解决对流层延时空间低相关性问题的差分系统可以获得更高的定位精度。可能允许一个更长的基线距离。

3、程序设计流程

3.1 解码流程

关于解码的一些原理已经在第2章2.2节进行了详细的阐述，具体的步骤包括字节扫描，字节滚动，低6位连接，字节取补码，字节跳页，电文同步，奇偶校验，解码数据。

为存储 RTCM 电文的信息，本程序声明了3种不同的结构体来存储有效的信息，RTCMBODY 存储由一段 RTCM 电文的主体部分得到的关于各个卫星的信息，RTCM DATA 存储文件头和主体部分的所有信息，SATRTCM 存储一颗卫星的相关数据。具体声明如下所示：

```

struct RTCMBODY {
    BYTE scale;
    BYTE UDRE;
    BYTE SatID;
    double PRC0;
    double RRC;
    BYTE IOD;
    RTCMBODY()
    {
        scale=UDRE=SatID=0;
        PRC0=RRC=IOD=0;
    }
};

```

RTCMBODY 存储了 RTCM 电文主体部分中某一颗卫星的比例因子、UDRE、卫星号、伪距改正数、伪距改正数变化率、IOD (Issue of Data: 采用的卫星星历龄期, 等价于 AOD)。

```

struct RTCMDATA
{
    BYTE type;
    unsigned short id;
    BYTE seqno;           //序号
    BYTE length;          //帧长
    float zcount;         //z计数
    int status;           //基站健康状况
    int flag;             //表示该差分改正数是否可用, 1为不可用, 0为可用
    struct RTCMBODY rtcmbody[12];
    RTCMDATA()
    {
        type=id=seqno=length=zcount=status=flag=0;
    }
};

```

RTCMDATA 存储了电文的所有信息, Z 计数作为 RTCM 电文的参考时间, 和当前的观测时间进行比较, 就能确定该 RTCM 电文的新旧。用最新的 RTCM 电文进行差分, 精度才会有显著提高。

因为一段 RTCM 电文主体部分最多包含 12 颗卫星的改正数据, 所以 RTCMDATA 包含了一个 RTCMBODY 类型的结构体数组: rtcmbody[12]。

```

struct SATRTCM
{
    double T;              //差分改正数对应的时刻 (z计数)
    BYTE PRN;
    float RangeCorrection;
    float RangeRateCorrection;
    BYTE IOD;
    bool status;
    SATRTCM()
    {
        T=RangeCorrection=RangeRateCorrection=0;
        PRN=IOD=0;
        status=false;
    }
};

```

SATRTCM 表示每颗卫星的相关数据, 每一次解码了一段 RTCM 电文, 都会更新一次

相关卫星的 SATRTCM 结构体。T 等于 RTCM 文件头中的 Z 计数，PRN 号是卫星号，PRC，RRC，IOD，status（奇偶校验如果成功，status 会变为 true；否则 status 为 false，代表这颗卫星的改正数不能用）。

在 main 函数里，定义了包含所有卫星改正信息的 SATRTCM 结构体数组：satrtcm[32]。

综上，从一个 RTCM 文件中解码信息，具体步骤和流程如下图所示：

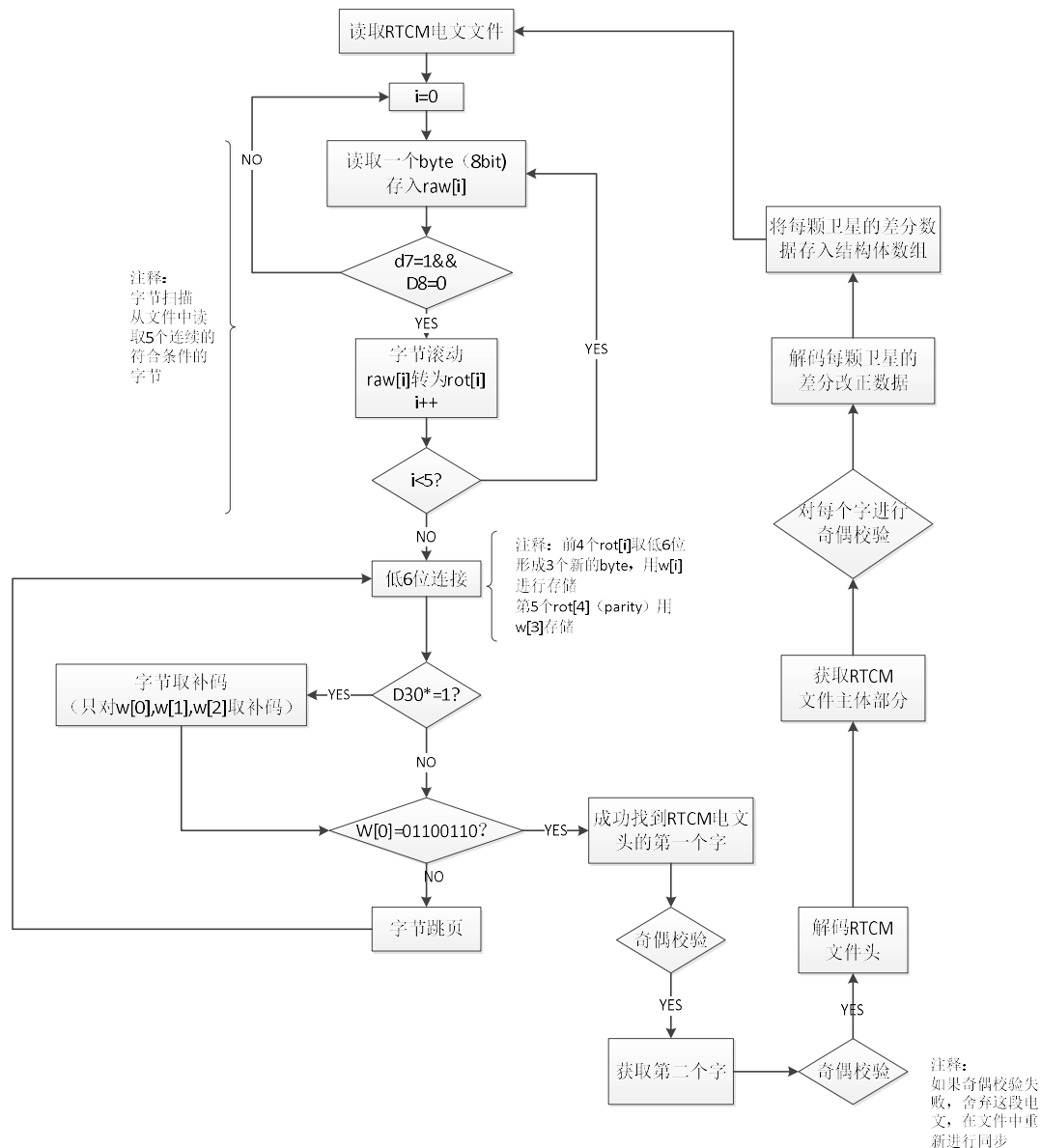


图 12 解码 RTCM 文件的流程图

解码一段 RTCM 电文完成后，获得了当前 Z 计数时刻的各颗卫星的 PRN，PRC，RRC，IOD。进行单点定位时，只需查找捕获到的卫星是否有对应的差分改正数，需要注意的是捕获到的某卫星的星历期号（IOD）必须和差分改正数对应的星历期号（IOD）所一致，否则这个差分改正数不能用于改正这颗卫星对应的码伪距。

3.2 伪距差分定位流程

在伪距单点定位 spp 的基础上，只需加上伪距改正数去修正伪距，其余步骤一样。具体步骤如图 13 所示：

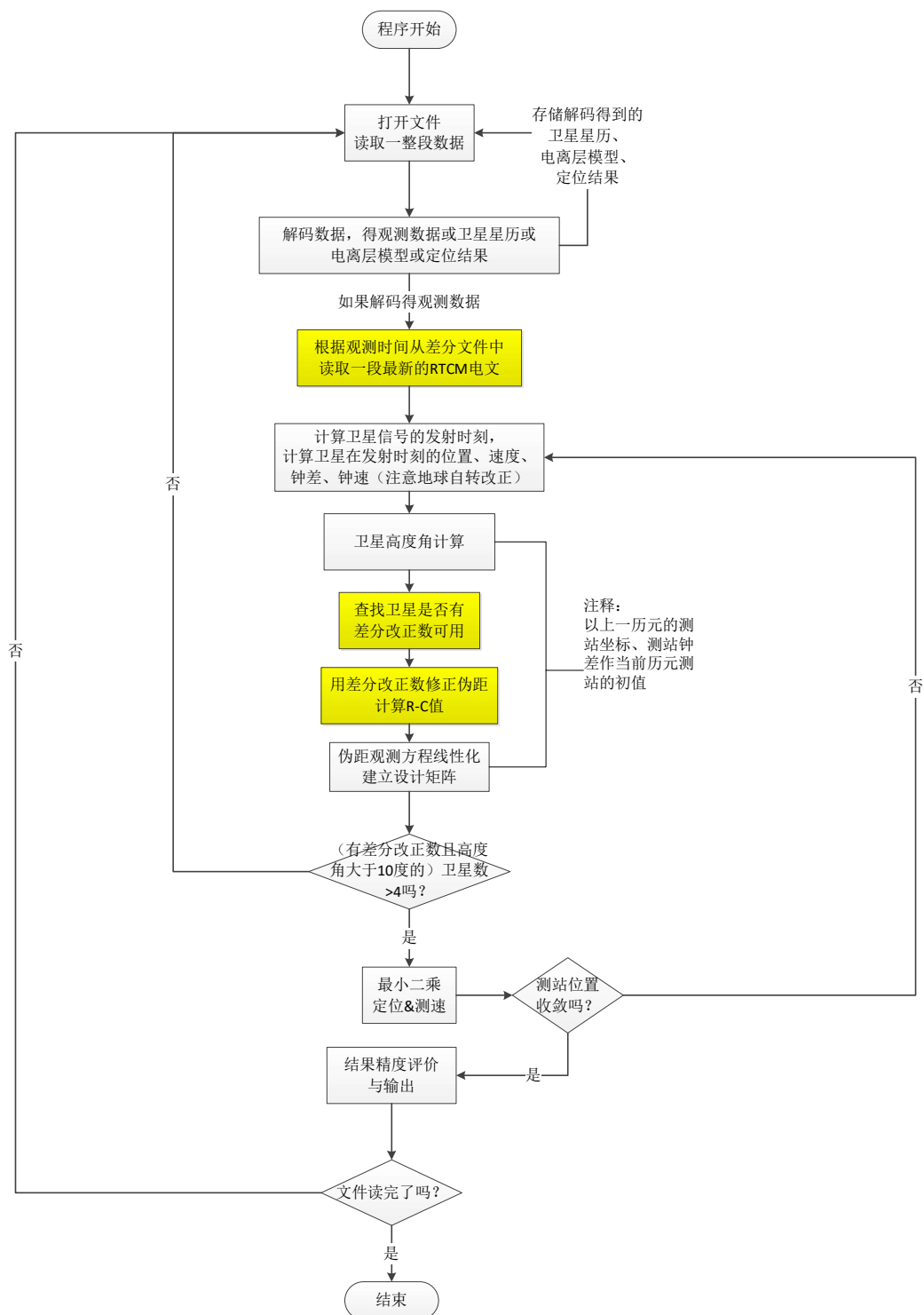


图 13 伪距差分定位流程图

4、结果与精度分析

4.1 结果输出

4.1.1 解码结果

经过了原理和流程的阐述，编写程序以实现 RTCM 解码。根据观测时间的不同，将观测时间由周秒转换为 Z 计数，从而与 RTCM 电文文件中各段电文的 Z 计数值作对比，进而提取最新的 RTCM 电文。将解码得到的结果输出到 txt 文件中，主要输出了观测时刻周秒值，最新的 RTCM 电文的 Z 计数值，卫星 PRN 号，卫星伪距改正数，卫星伪距改正数变化率，差分改正数的 IOD，具体如图 14 所示：

观测时刻（秒）：196087.000000 最新RTCM电文的Z计数值：1686.599976			
1	-1.760000	0.000000	80
22	-12.980000	-0.016000	10
17	-10.640000	0.012000	56
7	-2.240000	0.000000	18
8	-3.140000	0.000000	74
28	-2.920000	0.018000	26
11	-2.240000	0.000000	73
30	-3.760000	0.014000	67
观测时刻（秒）：196088.000000 最新RTCM电文的Z计数值：1687.800049			
1	-1.760000	-0.004000	80
22	-12.980000	-0.004000	10
17	-10.640000	0.008000	56
7	-2.260000	-0.006000	18
8	-3.140000	-0.002000	74
28	-2.920000	0.010000	26
11	-2.240000	-0.006000	73
30	-3.760000	0.008000	67
观测时刻（秒）：196089.000000 最新RTCM电文的Z计数值：1687.800049			
1	-1.760000	-0.004000	80
22	-12.980000	-0.004000	10
17	-10.640000	0.008000	56
7	-2.260000	-0.006000	18
8	-3.140000	-0.002000	74
28	-2.920000	0.010000	26
11	-2.240000	-0.006000	73
30	-3.760000	0.008000	67
观测时刻（秒）：196090.000000 最新RTCM电文的Z计数值：1689.599976			
1	-1.760000	-0.022000	80
22	-12.920000	0.002000	10
17	-10.620000	-0.008000	56
7	-2.260000	-0.016000	18
8	-3.160000	-0.012000	74
28	-2.940000	-0.006000	26
11	-2.240000	-0.018000	73
30	-3.760000	-0.008000	67

图 14 RTCM 电文解码结果

如图 15，绘制了每个观测历元得到的最新 RTCM 电文中的所有卫星号，形象认知了在哪些观测历元有哪些卫星的差分改正数。

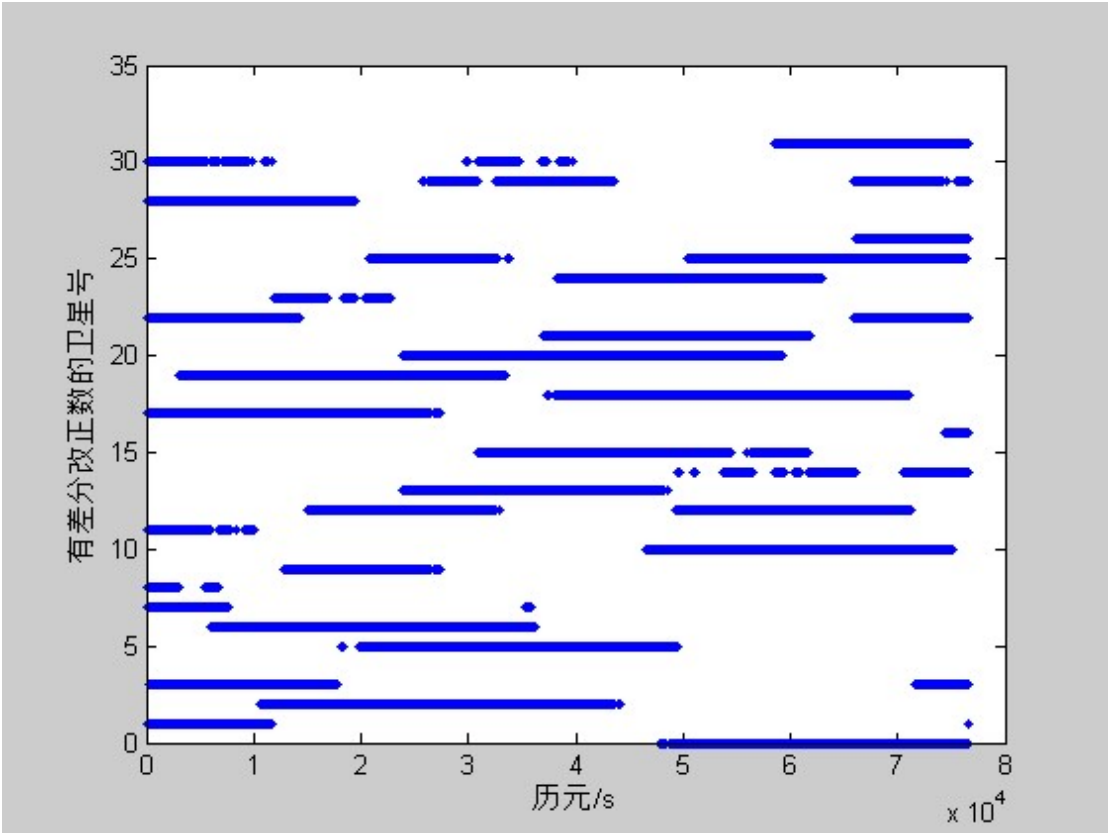


图 15 每观测历元中具有差分改正数的卫星号

4.1.2 定位结果

利用从基站发来的差分 RTCM 文件，在伪距单点定位的基础上对伪距进行修正，能够有效消除卫星星历误差，卫星钟差，电离层误差和对流层误差，提高定位精度。将每个观测历元计算的测站的位置进行文件输出，内容包括有周秒，当前历元对应最新 RTCM 电文的 Z 计数值，纬度、精度、大地高解算结果，空间直角坐标系的 X、Y、Z 坐标解算结果，和定位结果的 sigma 值。具体输出如图 16 所示：

周秒(s)	最新RTCM电文的Z计数值	当地纬度(度)	当地经度(度)	当地大地高(米)	X (米)	Y (米)	Z (米)	sigma
196087.000000	1686.599976	30.52836304	114.35723356	40.53223805	-2267828.54906423	5009335.70856172	3220984.01081398	0.26980355
196088.000000	1687.800049	30.52836302	114.35723350	40.54355634	-2267828.54845677	5009335.72081243	3220984.01459547	0.27742917
196089.000000	1687.800049	30.52836289	114.35723363	40.53403470	-2267828.55933597	5009335.71483548	3220983.99739826	0.27571113
196090.000000	1689.599976	30.52836327	114.35723343	40.55954568	-2267828.54184900	5009335.72321560	3220984.04698153	0.28480353
196091.000000	1690.800049	30.52836331	114.35723336	40.57787471	-2267828.54167554	5009335.73838925	3220984.05974574	0.29010692
196092.000000	1690.800049	30.52836333	114.35723322	40.54250289	-2267828.51678204	5009335.71488193	3220984.04383533	0.28848363
196093.000000	1692.599976	30.52836308	114.35723345	40.54560391	-2267828.54286223	5009335.72112639	3220984.02205402	0.28414518
196094.000000	1693.800049	30.52836321	114.35723343	40.54917550	-2267828.54017831	5009335.71771088	3220984.03623854	0.29028315
196095.000000	1693.800049	30.52836320	114.35723352	40.53243875	-2267828.54181681	5009335.70191660	3220984.02654312	0.29635390
196096.000000	1695.599976	30.52836330	114.35723350	40.54692630	-2267828.54269485	5009335.70886017	3220984.04372335	0.29175092
196097.000000	1696.800049	30.52836319	114.35723336	40.56105518	-2267828.53862692	5009335.73078730	3220984.04050979	0.28861694
196098.000000	1696.800049	30.52836319	114.35723344	40.54571983	-2267828.53965988	5009335.71617511	3220984.03217062	0.29558238
196099.000000	1698.599976	30.52836341	114.35723327	40.59375461	-2267828.53659936	5009335.74898060	3220984.07819606	0.25228838
196100.000000	1699.800049	30.52836328	114.35723332	40.59894251	-2267828.54650859	5009335.75743848	3220984.06841320	0.25256592
196101.000000	1699.800049	30.52836312	114.35723365	40.58899845	-2267828.57509441	5009335.74517038	3220984.04779682	0.24896271
196102.000000	1701.599976	30.52836331	114.35723330	40.58925718	-2267828.54016396	5009335.74946225	3220984.06610523	0.24710206
196103.000000	1702.800049	30.52836337	114.35723330	40.59690885	-2267828.54146303	5009335.75226729	3220984.07592684	0.24660660
196104.000000	1702.800049	30.52836330	114.35723338	40.58513665	-2267828.54641764	5009335.74330458	3220984.06313021	0.24569964
196105.000000	1704.599976	30.52836331	114.35723340	40.56822362	-2267828.54180238	5009335.72989393	3220984.05574979	0.25022418
196106.000000	1705.800049	30.52836324	114.35723328	40.56153216	-2267828.53072237	5009335.73201382	3220984.04507415	0.25186015
196107.000000	1705.800049	30.52836314	114.35723331	40.54206754	-2267828.52871625	5009335.72054236	3220984.02588761	0.24571085

图 16 定位结果输出

为了更加形象地输出定位结果，绘制图 17，图 18，分别绘制出了各个历元的经纬度定位结果和大地高定位结果。

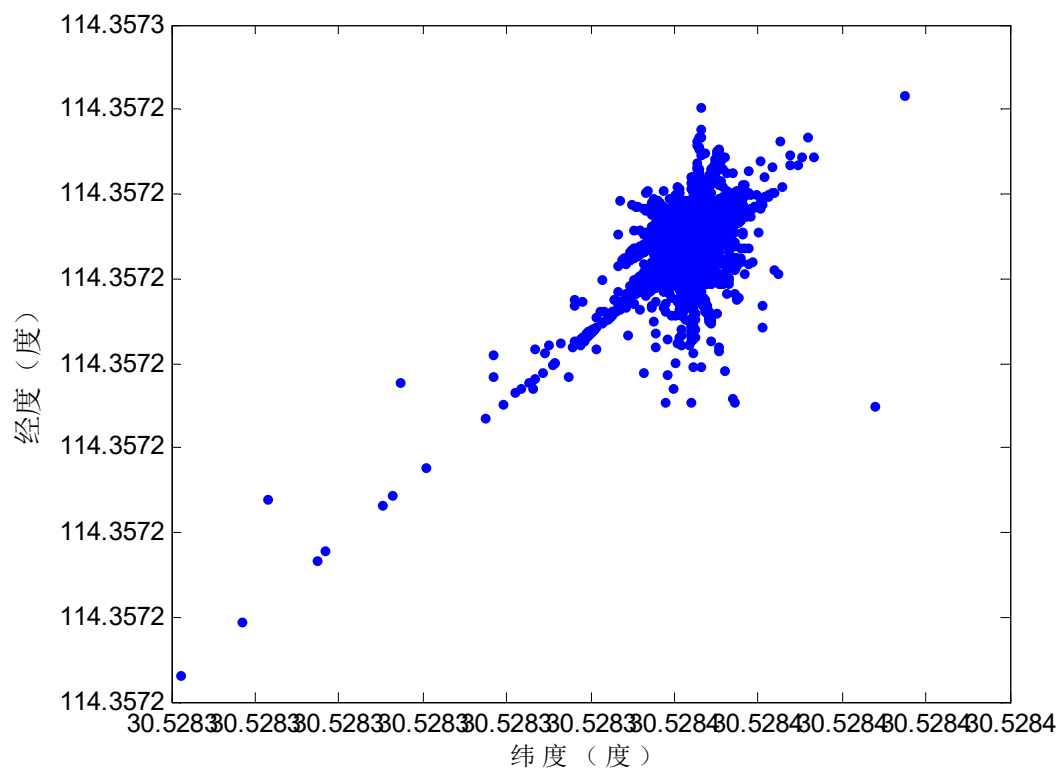


图 17 各个历元的经纬度定位结果

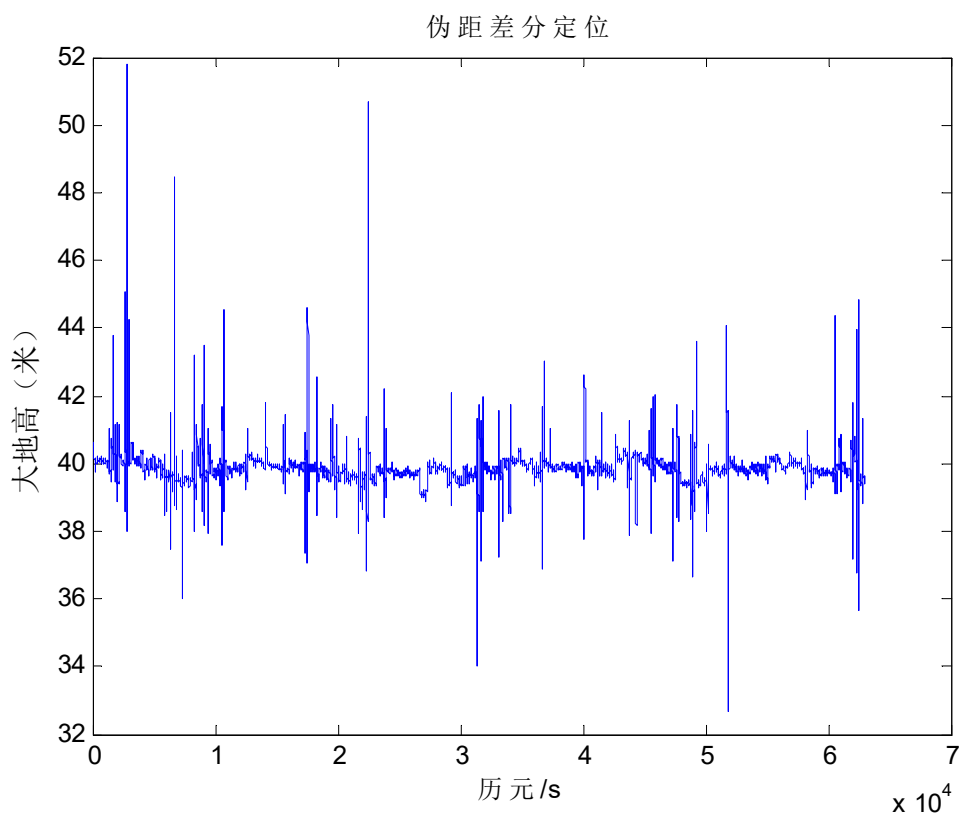


图 18 各个历元的大地高结果

4.1.3 定位内符合精度

根据每个观测历元的定位结果，可以算出所有历元平均的经纬度和大地高：

纬度：30.5283616813890，经度：114.357233986748，大地高：39.8545434362460

将大地高各个历元的计算结果和所有历元的平均结果一起绘制在图上，如图 19 所示：

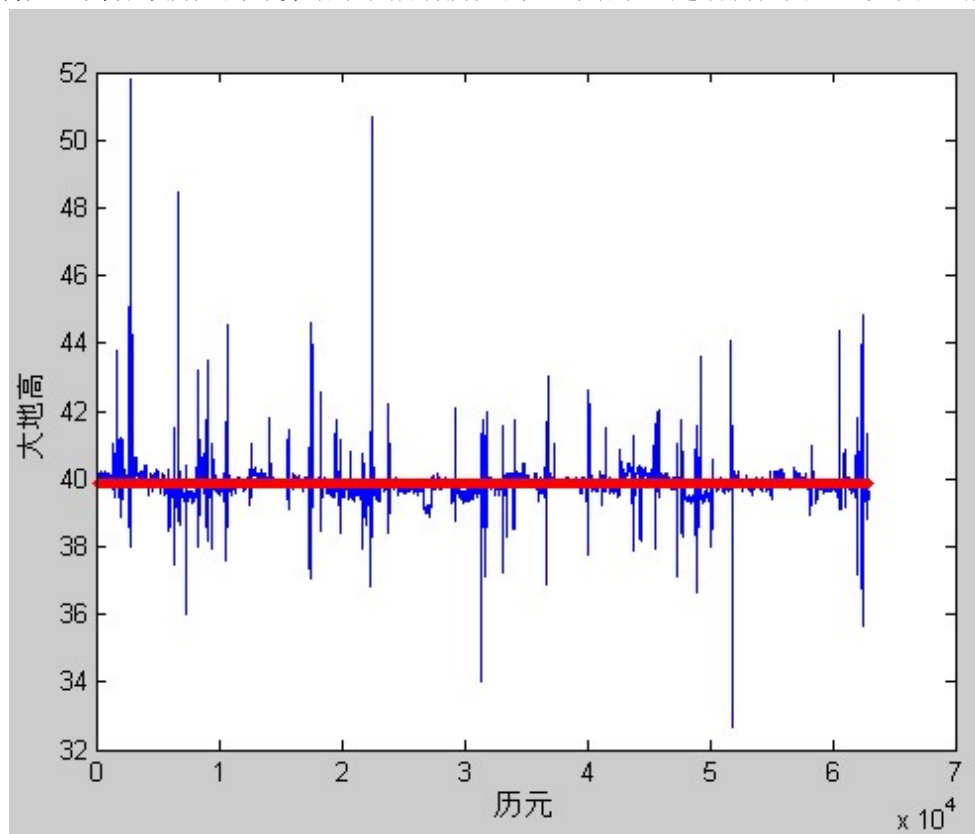


图 19 各历元大地高结果与平均结果的比较

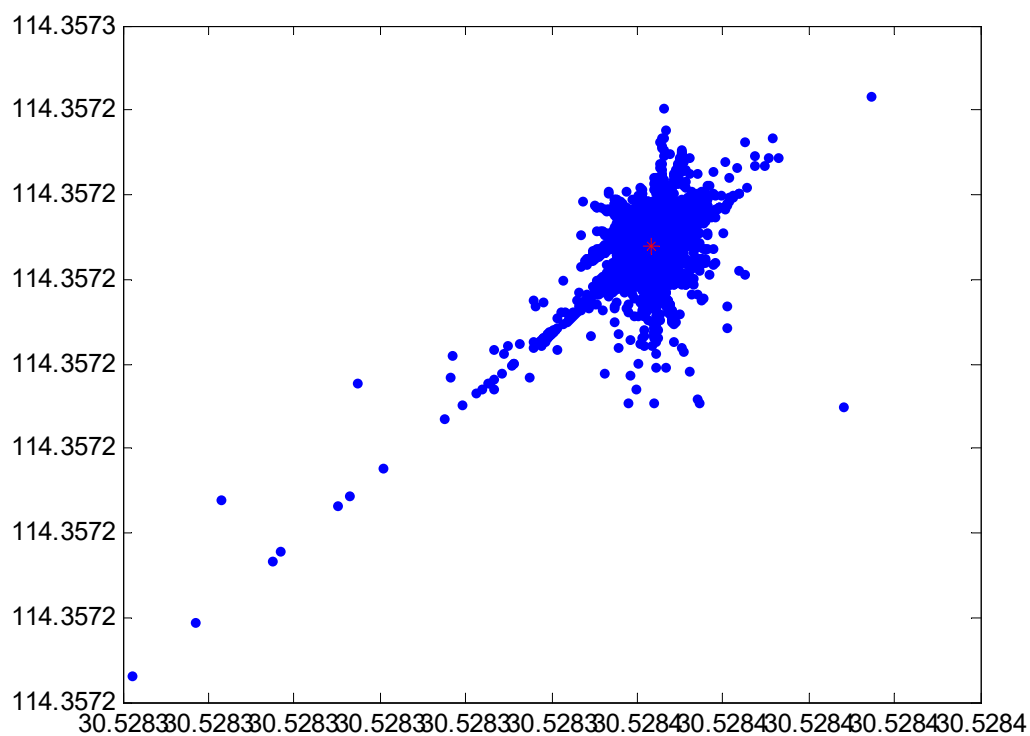


图 20 各历元经纬度结果与平均结果的比较

如图 20 所示，中心一点红星是经纬度所有历元平均的结果。

若将各个历元的结果与平均值相减，结果如图 21，图 22，图 23 所示：

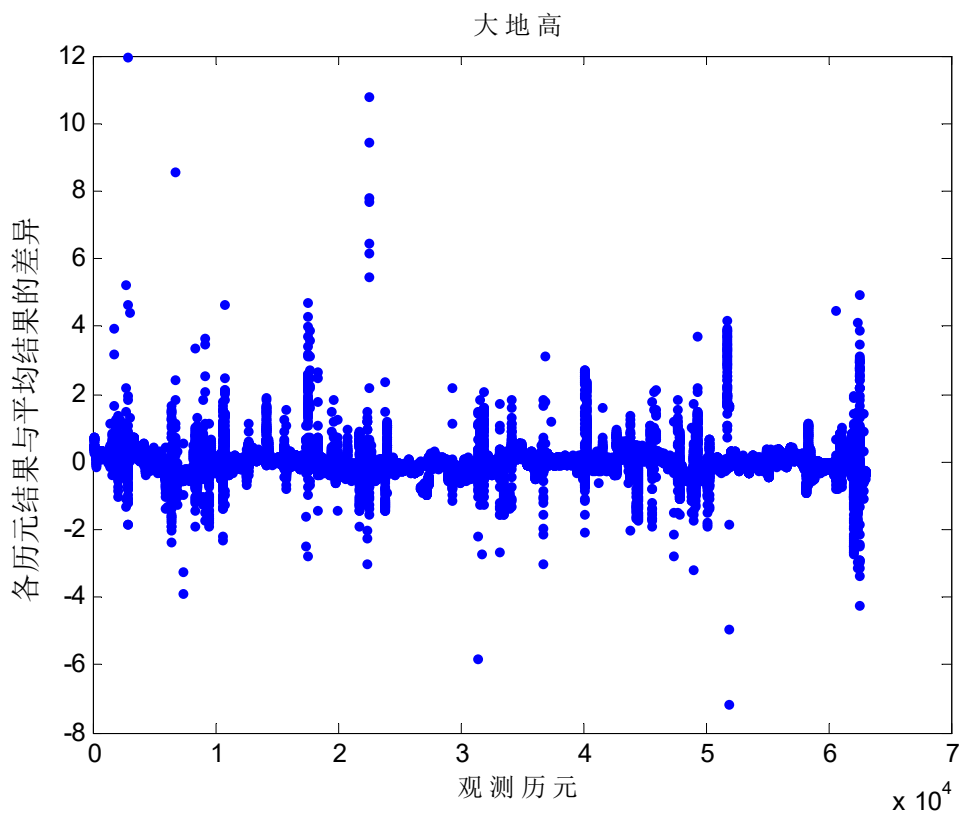


图 21 大地高结果：各个历元计算值与平均值的差异

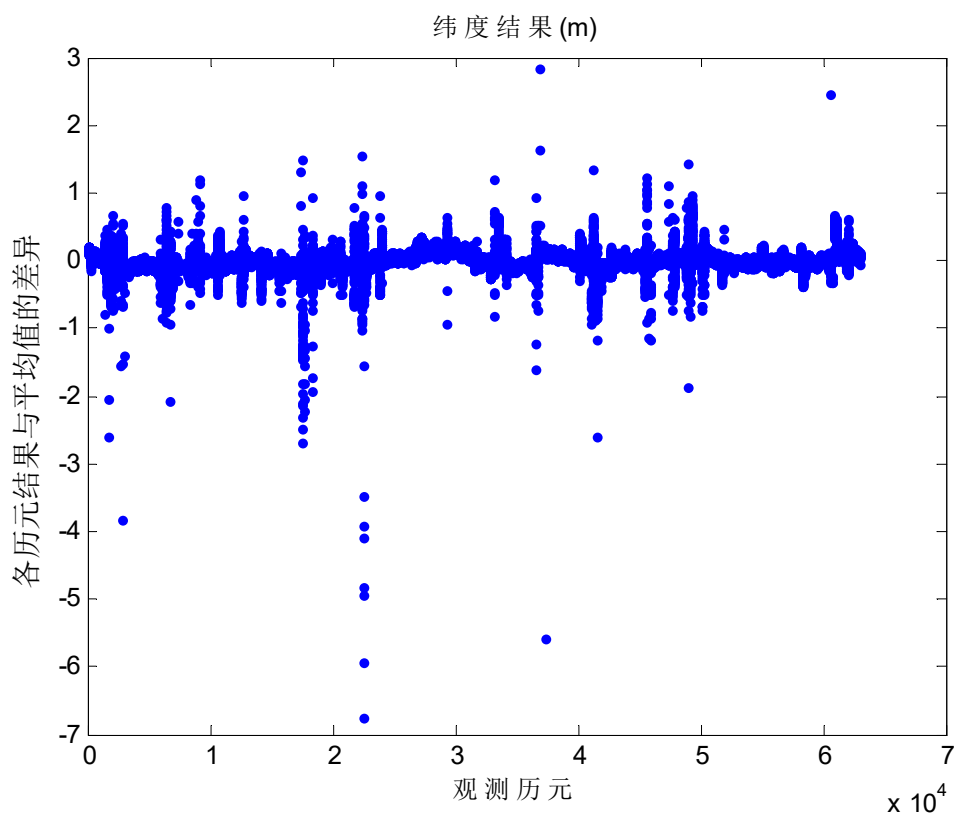


图 22 纬度结果：各个历元计算值与平均值的差异
 注释：图 22 中已经将纬度差异的单位由度转为了长度单位（米）

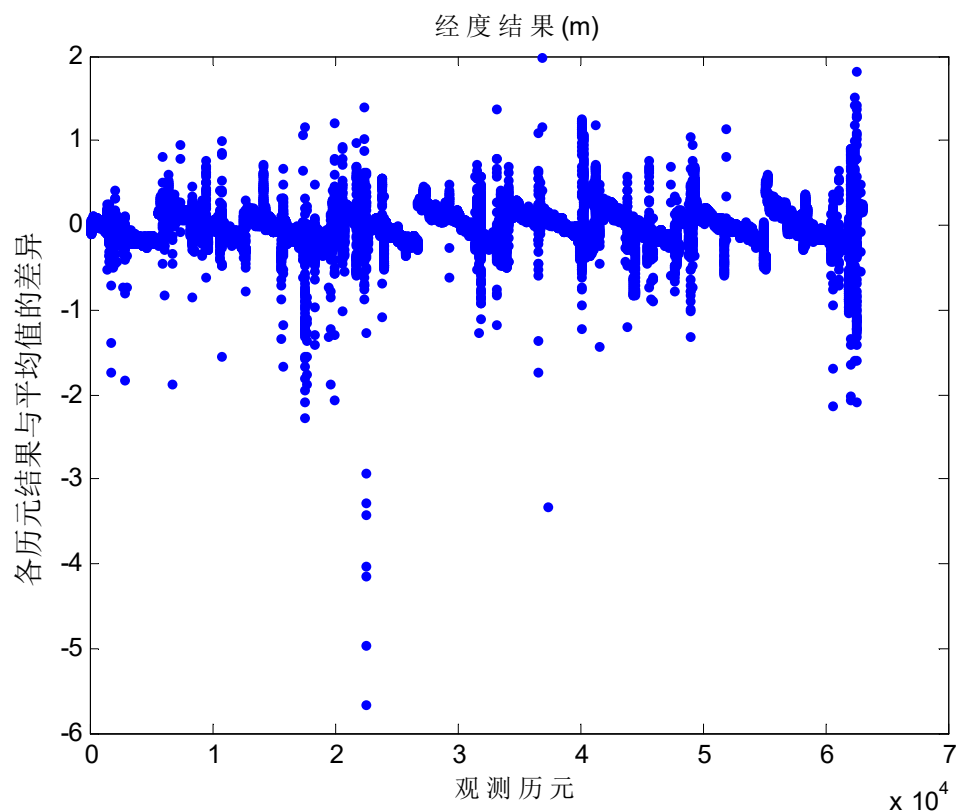


图 23 经度结果：各个历元计算值与平均值的差异

4.1.4 定位外符合精度

已知测站天线的空间直角坐标系坐标为（-2267824.655，5009330.712，3220988.006），转换为大地坐标系为（30.528422292787859，114.35721806638870，37.257433810271323），那么和程序计算出来的结果差异如图 24,25,26 所示：

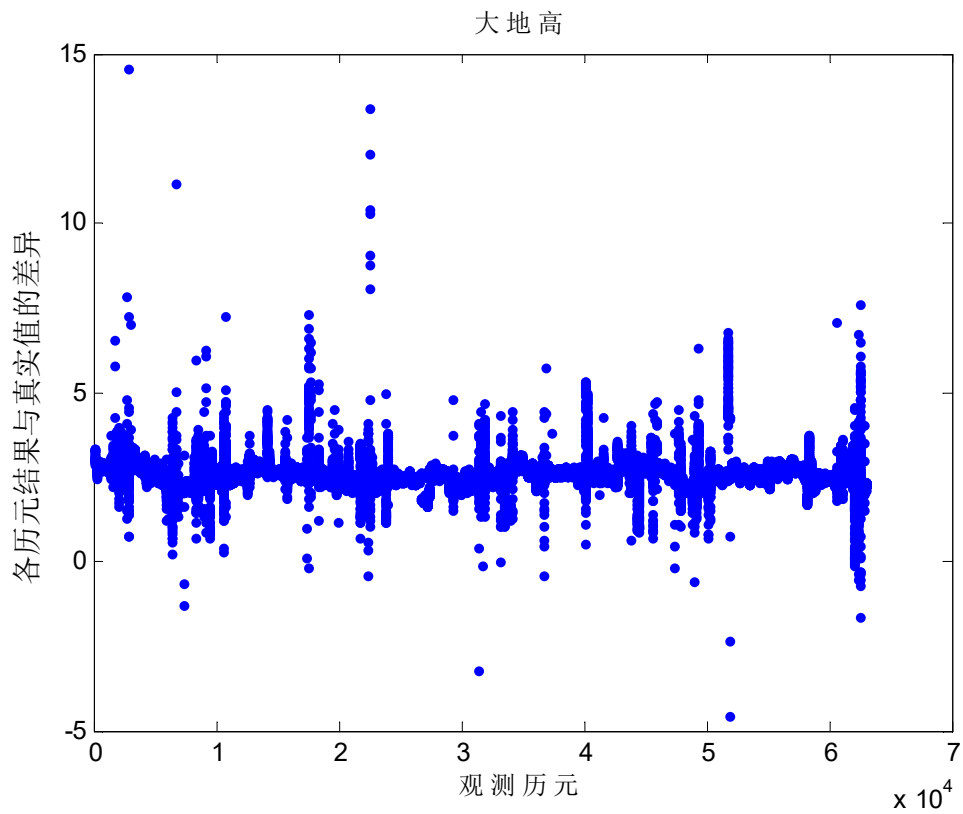


图 24 大地高：各个历元计算值与真实值的差异

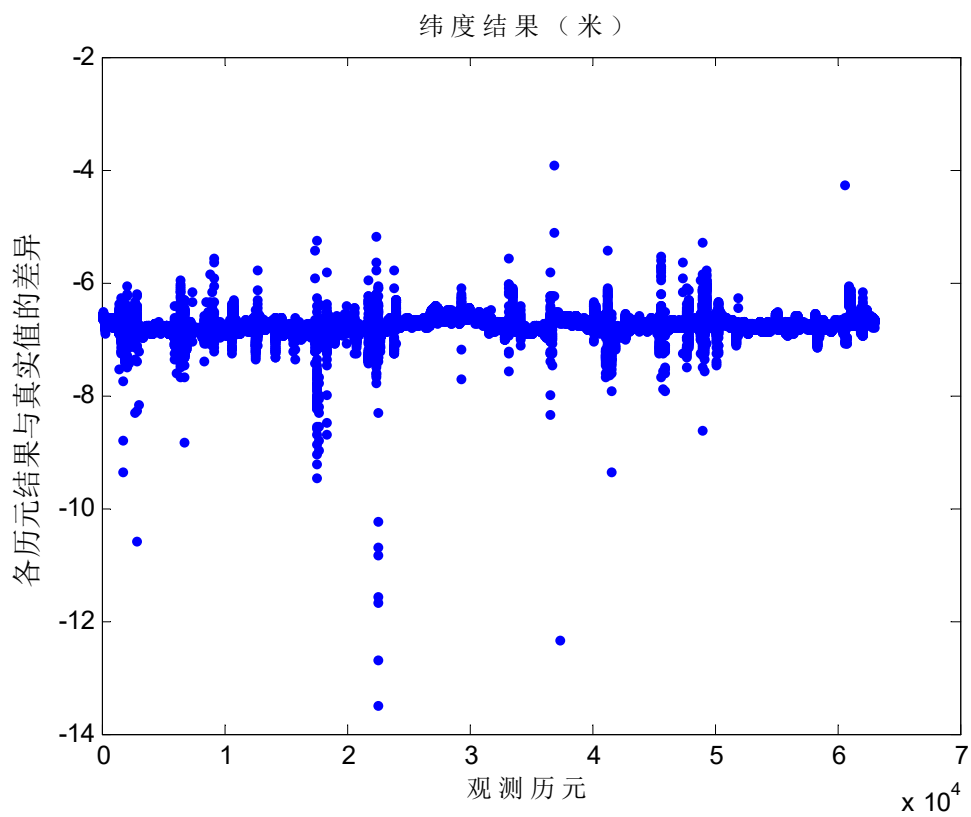


图 25 纬度结果：各个历元计算值与真实值的差异

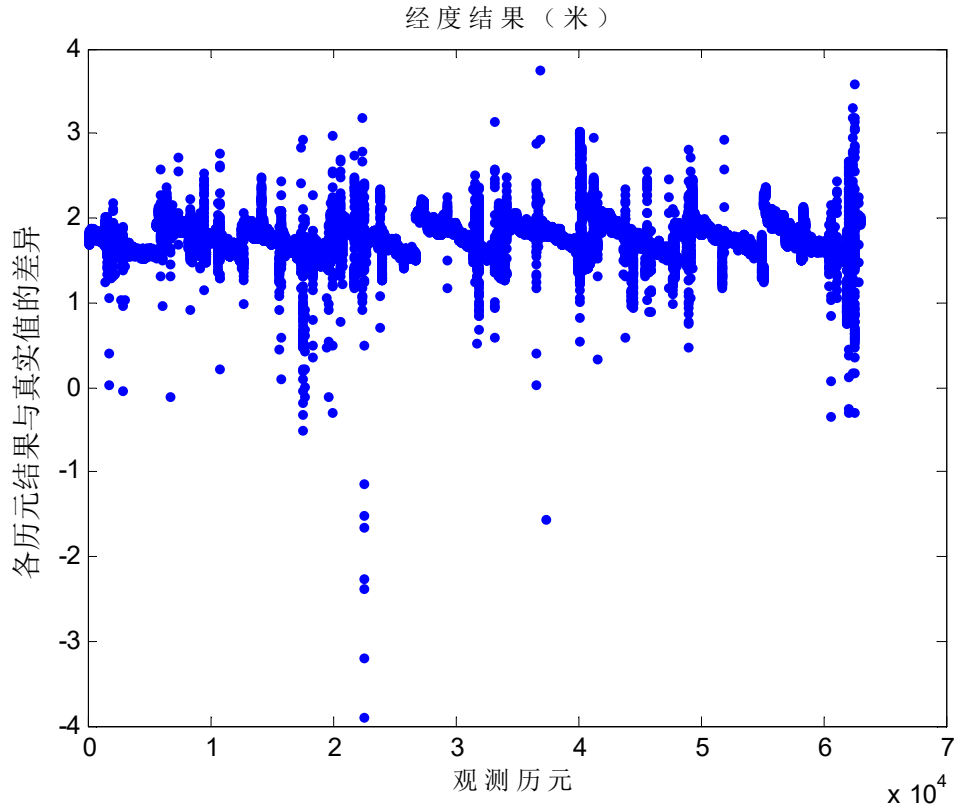


图 26 经度结果：各个历元计算值与真实值的差异

4.2 精度分析

4.2.1 内符合与外符合精度分析

由图 19 至图 26，展示了定位结果的内符合精度和外符合精度。由统计分析得到：

大地高解算结果的标准差为：0.378048603533480；

纬度解算结果的标准差为：1.41047985798740e-06；

经度解算结果的标准差为：1.77178583549988e-06

对图 21，22，23 各个观测历元的差异结果取平均，得：

大地高解算结果差异的平均值为：1.5000e-14（m）

纬度解算结果差异的平均值为：3.0042e-09（m）

经度解算结果差异的平均值为：-7.1614e-09（m）

说明内符合精度很好。

而对比真实值，对图 24，25，26 各个观测历元与真实值的差异结果取平均，得：

大地高解算结果差异的平均值为：2.5971（m）

纬度解算结果差异的平均值为：-6.7472（m）

经度解算结果差异的平均值为：1.7722（m）

以上数据反映了外符合精度的情况。

4.2.2 与 SPP 定位结果的对比

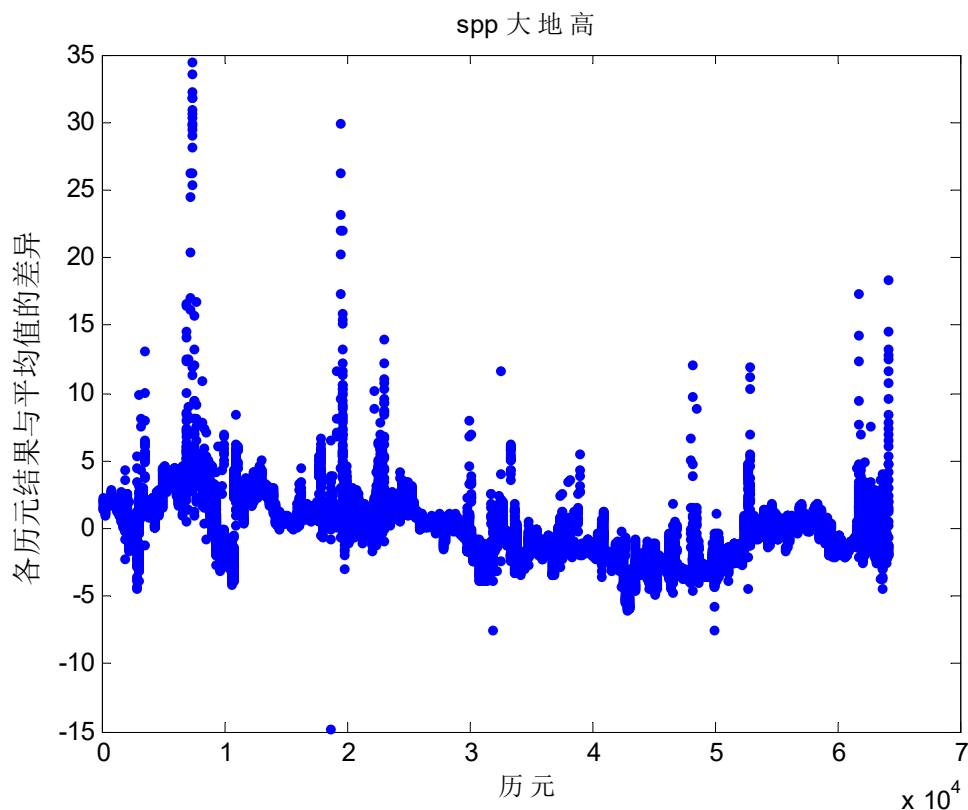


图 27 spp 大地高结果：各个历元计算值与平均值的差异

将图 27 与图 21 进行对比，如图 28 所示：

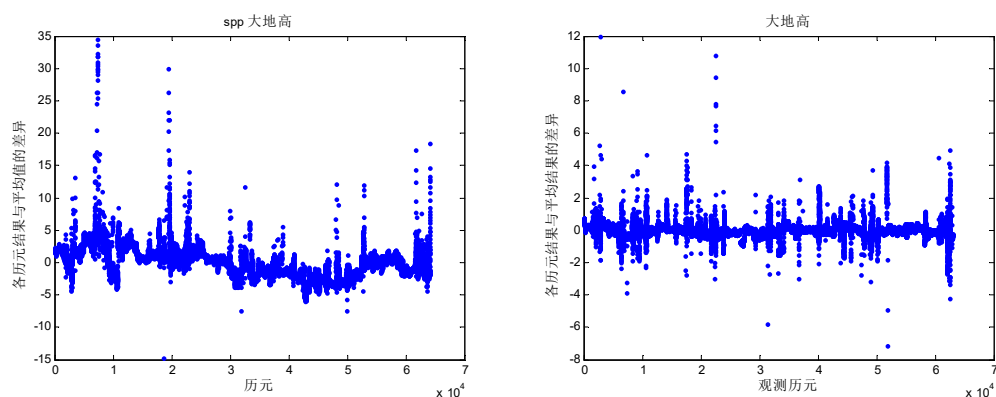


图 28 SPP 与差分定位的对比

仅仅是对比 SPP 和伪距差分定位的大地高的解算结果，由统计分析：SPP 解算出的各个历元的大地高结果的标准差为 2.1498，而伪距差分定位解算出的各个历元的大地高结果的标准差为 0.3780。所以伪距差分定位的结果精度更高，在高程方向上精度可达米级。

为了更好地反应 SPP 和差分后的精度变化，将各个观测历元的纬度解算结果、经度解算结果、高程解算结果分别和所有历元的平均值作差，如图 29,30 所示：

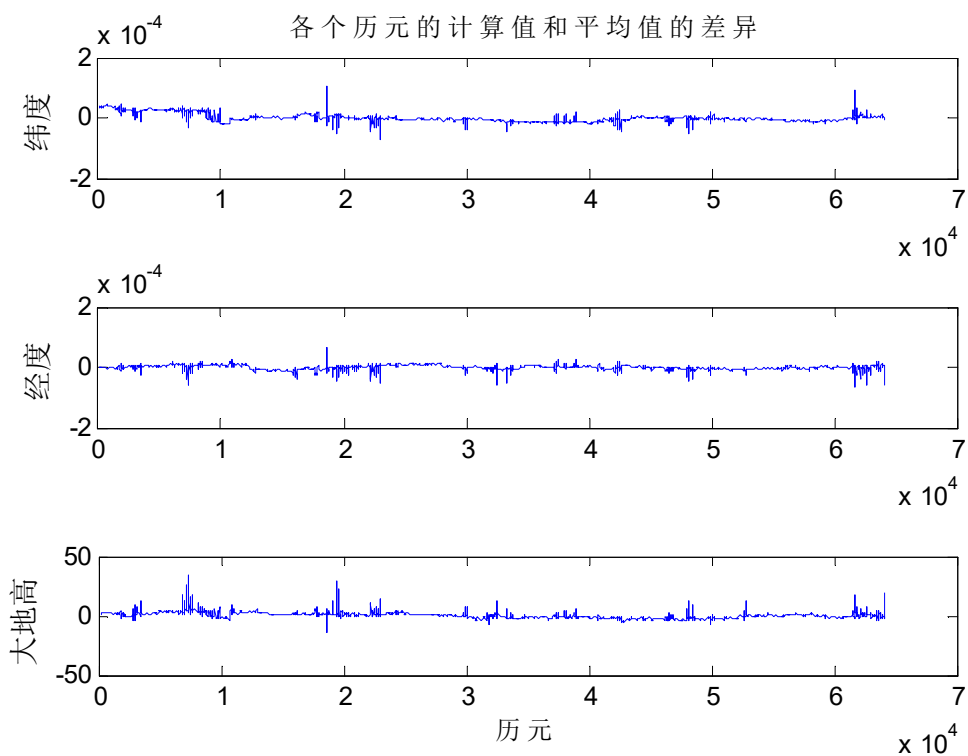


图 29 SPP 的各个历元的计算值和平均值的差异

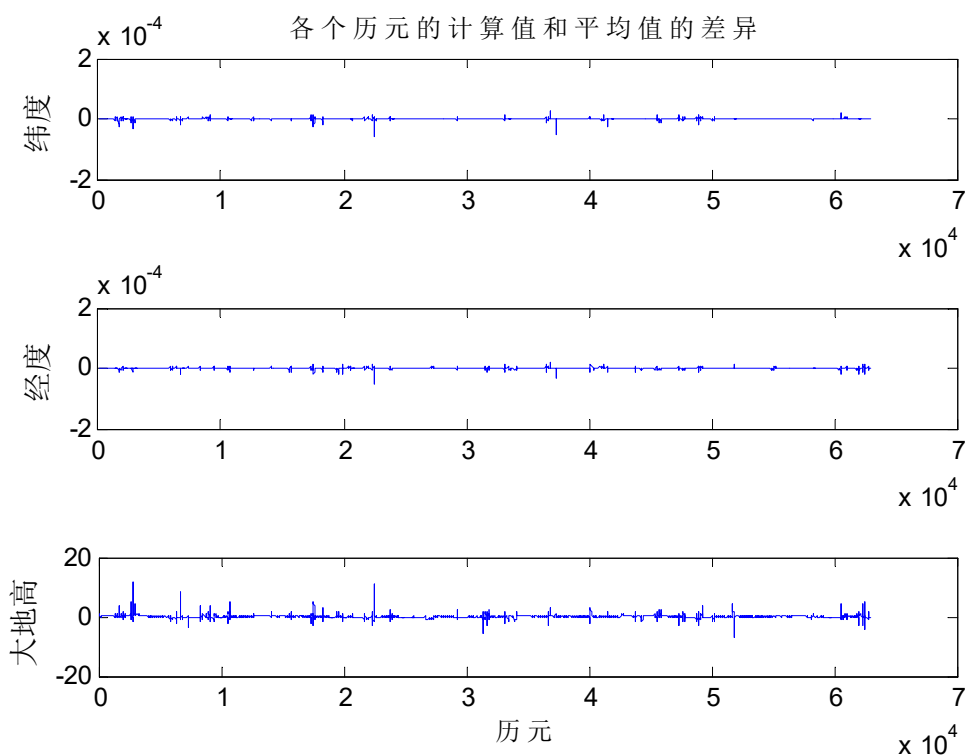


图 30 差分后的各个历元的计算值和平均值的差异

比较图 29 和图 30 后，发现差分后各个历元得到的结果更加平滑，更加平稳，更加接近平均值，而且在高程方向上差异的尺度变小了。综上，和 SPP 的定位结果相比，差分后的

定位结果精度更高。