



### 高度角与信噪比混合的GNSS随机模型精化及其对RTK定位性能的影响

蔡亲青, 朱 锋, 陈 曦, 马立烨

#### Refinement of GNSS stochastic model combining elevation angle and SNR and its effect on RTK positioning performance

CAI Qinqing, ZHU Feng, CHEN Xi, and MA Liye

引用本文:

蔡亲青, 朱锋, 陈曦, 等. 高度角与信噪比混合的GNSS随机模型精化及其对RTK定位性能的影响[J]. *全球定位系统*, 2023, 48(1): 24–31. DOI: [10.12265/j.gnss.2022070](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2022070)

CAI Qinqing, ZHU Feng, CHEN Xi, et al. Refinement of GNSS stochastic model combining elevation angle and SNR and its effect on RTK positioning performance[J]. *Gnss World of China*, 2023, 48(1): 24–31. DOI: [10.12265/j.gnss.2022070](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2022070)

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.gnss.2022070>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

#### [联合高度角与信噪比的精化随机模型及其对高纬度精密单点定位的影响](#)

Refined stochastic model of combining elevation angle and SNR and its impact on precise point positioning in high latitude areas  
*全球定位系统*. 2021, 46(3): 15–23, 53

#### [卫星观测值精度分析及随机模型精化](#)

Precision Analysis of the BDS GEO / IGSO / MEO Observables and Stochastic Model Refining  
*全球定位系统*. 2018, 43(1): 1–6

#### [GPS / GLONASS / BDS / Galileo系统载波相位观测值质量对比分析](#)

Quality contrast and analysis of carrier phase observations in GPS / GLONASS / BDS / Galileo system  
*全球定位系统*. 2019, 44(1): 16–22

#### [PPP / INS组合系统研究进展与展望](#)

Research Progress and Prospect of PPP / INS Integration System  
*全球定位系统*. 2017, 42(5): 53–58

#### [多系统融合单点定位先验和验后定权研究](#)

Research on a priori and posterior weighting methods for Multi-GNSS combined single point positioning  
*全球定位系统*. 2021, 46(3): 1–6

#### [不同随机模型在GPS单历元定位中解算性能分析研究](#)

Research on Different Stochastic Model in GPS Single Epoch Position Resolution  
*全球定位系统*. 2017, 42(1): 34–38



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.12265/j.gnss.2022070

# 高度角与信噪比混合的 GNSS 随机模型精化及其对 RTK 定位性能的影响

蔡亲青<sup>1</sup>, 朱锋<sup>1,2</sup>, 陈曦<sup>1</sup>, 马立焯<sup>1</sup>

(1. 武汉大学 测绘学院, 武汉 430079;

2. 武汉大学 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室, 武汉 430079)

**摘要:** 全球卫星导航系统 (GNSS) 观测值精度会受到大气延迟、非视距 (NLOS) 信号和多径等因素的影响, 而高度角或信噪比 (SNR) 模型对不同误差源的敏感程度不一样, 导致传统基于高度角或 SNR 的单一随机模型不能满足全场景的高精度定位导航, 加上多频多系统的出现, 不同 GNSS 甚至同一系统的不同频段观测值精度也会存在差异, 这也给传统模型定权带来了一定挑战. 在分析高度角随机模型、SNR 随机模型存在的优缺点的基础上, 提出了一种高度角、SNR 混合的随机模型; 通过站间单差、历元间三次差分分别对 GPS、北斗卫星导航系统 (BDS)、Galileo 的伪距、相位噪声进行提取, 精化了高度角、SNR 混合随机模型. 实验表明, SNR 模型、高度角模型、混合模型的模糊度正确固定率分别为 92.42%、95.85%、97.69%; SNR 模型定位精度低于高度角和混合模型, 混合模型相比于高度角模型, 水平方向上定位精度提升了 50.0%, 高程方向精度提升了 37.1%.

**关键词:** 多频多系统全球卫星导航系统 (GNSS); 噪声提取; 随机模型; 函数拟合; 模糊度固定

中图分类号: P228.4

文献标志码: A

文章编号: 1008-9268(2023)01-0024-08

## 0 引言

全球卫星导航系统 (GNSS) 能够提供全天候、高精度的位置基准, 是重要的时空信息基础设施. 现阶段已建成 GPS、GLONASS、Galileo 和北斗卫星导航系统 (BDS) 四大全球导航系统以及其他区域系统和增强系统, 提供了超过一百余颗在轨导航卫星, 使用户能获得丰富的卫星导航信息以满足定位精度、可靠性及完好性的需要<sup>[1-2]</sup>. 多频多系统能有效解决单一系统可见卫星数目不足的情况, 然而不同系统、不同频段的观测值精度存在差异; 若在定位解算时, 未构建一个合理的随机模型, 会对多频多系统定位精度造成严重影响.

GNSS 随机模型涉及到观测值本身的精度、系统动态变化以及参数的随机特性等<sup>[3]</sup>, 通常通过一个合理的协方差矩阵来表示. 随机模型的建立和精化是高精度定位解算中一个重要的环节, 随机模型对模糊度固定的成功率和可靠性以及最终的定位精度存在一

定的影响<sup>[4-5]</sup>. 现有的随机模型有等权模型、高度角模型及信噪比 (SNR) 模型. 等权模型算法最为简单, 但不同卫星、不同测站、不同历元受到误差的影响并不相同, 所以等权模型合理性较差. 高度角模型不依赖其他信息且高度角和大气延迟存在密切关系, 已被许多科研和商业软件所采用. SNR 是指接收机解调卫星信号时, 载波信号与噪声的能量密度比, 能很好地体现观测值的噪声水平.

然而, 单一指标的高度角或 SNR 随机模型难以满足全场景的高精度定位导航, 高度角模型能有效地削弱大气残余误差, 但对于衍射误差的削弱效果不明显; SNR 模型可以很好地消除衍射误差的影响, 但对大气误差敏感度不及高度角模型<sup>[6]</sup>, 目前已有学者尝试将高度角和 SNR 信息混合构建随机模型; 文献<sup>[7]</sup>将高度角信息作为一个膨胀因子加入 SNR 模型得到高度角 SNR 联合模型; 文献<sup>[8]</sup>等针对实际测量中存在卫星高度角高多路径噪声较大、卫星 SNR 较大而高度角较小的异常情况, 提出了高度角与信号强度联

收稿日期: 2022-04-22

资助项目: 湖北珞珈实验室专项基金资助项目 (220100005); 国家自然科学基金 (42104021); 湖北省科技重大项目 (2021AAA010)

通信作者: 朱锋 E-mail: fzhu@whu.edu.cn

合的随机模型;文献 [9] 等基于主成分分析法 (PCA) 确定 SNR 和高度角在测量噪声中的贡献率,通过加权融合建立高度角 SNR 随机模型.上述研究未针对目前多频多系统 GNSS 的状况进行模型参数的适配,且随机模型的构建和测试工作不是针对特定型号接收机进行展开,对于移动测量、变形监测这类高精度定位领域而言,通用的随机模型处理得到的最终结果往往不是最优解;而通过特定型号接收机建立大规模观测数据库,利用云计算和大数据技术能够实现随机模型精细化处理,从而提升 GNSS 高精度定位的可用性及可靠性.基于上述分析,本文使用特定的接收机数据对随机模型进行精细化处理与分析:在提取多频多系统伪距、相位噪声的基础上,利用三维函数拟合精化高度角 SNR 混合模型,并在丰富场景的动态实验下验证该模型定权的准确性.

## 1 GNSS 观测值噪声提取

### 1.1 站间单差提取伪距噪声

以短基线为例,综合考虑卫星信号从生成、到传播,再到被捕获的过程中,出现的各种误差,可将伪距和载波相位原始观测值表示为<sup>[10]</sup>

$$\begin{cases} P_i = \rho_i + c \cdot (dt_i^s - dt_i) - I_i + T_i + \varepsilon_{P_i} \\ \phi_i \lambda = \rho_i + c \cdot (dt_i^s - dt_i) + I_i + T_i - \lambda N_i + \varepsilon_{\phi_i} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\rho_i$  为卫星到接收机的几何距离;  $dt_i^s$  和  $dt_i$  分别为卫星钟差和接收机钟差;  $I_i$  和  $T_i$  为电离层和对流层误差;  $\lambda$  为载波的波长;  $N_i$  为载波的模糊度,以周作为单位;  $\varepsilon_{P_i}$ ,  $\varepsilon_{\phi_i}$  分别表示伪距和观测噪声.

对于伪距的噪声可以通过站间单差来提取,  $A$ 、 $B$  两测站间进行站间单差,可以消除卫星端钟差、卫星端初始相位小数偏差等与卫星端相关的误差.站间单差观测值为

$$\begin{aligned} \Delta P_{AB} &= \Delta \rho_{AB} - c \cdot \Delta dt_{AB} - \Delta I_{AB} + \Delta T_{AB} + \\ &\Delta \delta P_{AB} + \Delta \varepsilon_{AB} + \Delta \varepsilon_{P_{AB}} \end{aligned} \quad (2)$$

站间单差观测值中,包含  $A$ 、 $B$  两站的基线长度,电离层和对流层误差残余,站间单差的接收机误差、接收机端的硬件延迟以及站间单差的伪距噪声.通过代入高精度的  $A$ 、 $B$  测站的位置信息可以计算基线长度,在短基线 (SBL) 的情况下,电离层、对流层误差可以认为被完全消除.接收机钟差可以通过参数估计的方法进行消除,较为简单的方法则通过对某一系统某一频点的残差进行排序取中位数,该中位数可当作该系统该频点的接收机钟差,扣除接收机钟差后,得到的残差即可认为是站间单差的伪距噪声.对于伪距

噪声,可通过固定探测阈值或  $3\sigma$  原则进行粗差检测.

本实验的流动站、基准站采用同一款接收机,两站伪距噪声可以认为独立同分布,于是根据误差传播定律可得

$$\sigma_{\text{rove}} = \frac{\sigma_{\text{rove,base}}}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

式中:  $\sigma_{\text{rove}}$  为流动站伪距噪声大小;  $\sigma_{\text{rove,base}}$  为伪距站间单差的噪声大小.

### 1.2 历元间三次差提取相位噪声

相位噪声的提取和伪距噪声提取存在差异,相位测量值中包含模糊度参数,通过站间单差只能消除卫星端的误差和具有空间相关性的大气误差,无法消除模糊度参数,而模糊度参数估计过为复杂,并且正确估计出全部卫星的模糊度就更具挑战性了.本文通过历元间三次差来提取相位噪声<sup>[11-12]</sup>.

因为卫星钟差、卫星端初始相位小数偏差等与卫星端相关的误差较为稳定,短时间内可认为卫星端的误差为常数项,同时短时间内电离层和对流层的变化较为缓慢,在采样率较高的情况下,历元间单差也能够很好地消除上述误差;但在采样率低的情况下,历元间单差的效果往往不理想,而通过历元间三次差能够有效解决低频情况下历元间单差对上述误差削弱效果差的问题.历元间三差观测值为

$$\begin{aligned} \psi &= \phi_{t_k} - 3\phi_{t_{k-1}} + 3\phi_{t_{k-2}} - \phi_{t_{k-3}} = \Delta\Delta\Delta\rho - c \cdot \Delta\Delta\Delta dt - \\ &\Delta\Delta\Delta I + \Delta\Delta\Delta T - \Delta\Delta\Delta N \cdot \lambda + \Delta\Delta\Delta\varepsilon_{\phi} \end{aligned} \quad (4)$$

历元间三差观测值中,卫地距的三次差  $\Delta\Delta\Delta\rho$  可以通过高精度的参考坐标 (静态数据无需参考坐标) 和卫星坐标 (卫星精密星历) 计算得到;电离层、对流层误差在历元间三差的情况下可以被认为完全消除;通过历元间三次差,接收机钟差的常数项、一阶项及二阶项得到了消除,为了进一步消去接收机钟差的影响,此处也采用参数估计的方法消去接收机钟差的影响;如果不发生周跳,则认为同一颗卫星的模糊度是一个常数,即  $\Delta\Delta\Delta N$  为 0,但实际情况肯定存在着发生周跳的情况,历元间三次差观测值扣去接收机钟差、位移大小得到的残差,该残差接近于 0,如果出现该残差的大小大于半个波长的情况,即认为发生了周跳,将此数据剔除即可.相位观测值大多数的粗差可能会被当作周跳进行剔除,为了防止小粗差,采用  $3\sigma$  原则进行粗差检测.

不失一般性,通常认为各个历元的载波观测值是独立不相关的,其方差相同,根据误差传播定律有

$$\sigma_{\psi}^2 = \sigma_{\phi}^2 + 9\sigma_{\phi}^2 + 9\sigma_{\phi}^2 + \sigma_{\phi}^2 \quad (5)$$

式中:  $\sigma_\psi$  表示相位历元间三差的噪声大小;  $\sigma_\phi$  为单个历元相位噪声大小.

可得相位噪声大小

$$\sigma_\phi = \frac{\sigma_\psi}{2\sqrt{5}}. \quad (6)$$

## 2 随机模型精细化处理

### 2.1 随机模型

#### 2.1.1 基于高度角的随机模型

基于高度角的随机模型是通过高度角  $E$  来描述观测值噪声水平的函数. 通常认为卫星高度角越大, 观测值受大气误差、多路径效应影响越小. 目前应用较为广泛的高度角定权函数有三角函数、分段函数等. 如 GAMIT 则采用正弦函数模型<sup>[13]</sup>, 本文也采用该定权模型

$$\sigma^2 = a^2 + \frac{b^2}{\sin^2 E}. \quad (7)$$

传统的经验模型会根据信号的噪声水平, 将  $a$ 、 $b$  皆取值为信号波长 (或者码宽度) 的 1%.

PANDA 软件采用分段函数进行高度角定权<sup>[14-15]</sup>, 其定权策略为

$$\sigma^2 = \begin{cases} a^2, & E \geq 30 \\ \frac{a^2}{4\sin^2 E}, & E < 30 \end{cases}. \quad (8)$$

#### 2.1.2 基于 SNR 的随机模型

GNSS 信号功率是对其质量的一种评估指标, 大多数接收机评估 GNSS 信号的指标有 SNR 和载噪比 (CNR). 二者在实际使用中极易混淆, 所以在此进行区分. SNR 是接收机输出端的载波信号与噪声的能量密度比, CNR 是指接收机输入端的载波信号与噪声的能量密度比. SNR、CNR 存在如下关系<sup>[16]</sup>:

$$\text{SNR} = \text{CNR} + G_p. \quad (9)$$

式中,  $G_p$  表示接收机处理增益. 由此可见, SNR 不仅与 CNR 相关, 而且与接收机处理信号的方式相关. 因为 CNR 与带宽相关, 因此通常情况下, 把 1 Hz 带宽上的载噪比 ( $C/N_0$ ) 作为 SNR 观测值, 单位为 dB/Hz.

SNR 从信号功率方面很好地反映了信号质量, Brunner 等<sup>[17]</sup> 基于 SNR 建立了载波相位观测值的 Sigma- $\varepsilon$  定权模型, 本文的 SNR 模型使用该模型

$$\sigma^2 = C_i \cdot 10^{-\frac{C/N_0}{10}}. \quad (10)$$

式中,  $C_i$  为常数项, 该值与接收机的相位跟踪环带宽有关, 不同系统不同频点的值不一样. Brunner 给出  $C_i$  的经验值为  $C_1 = 0.00224 \text{ m}^2\text{Hz}$ ,  $C_2 = 0.00077 \text{ m}^2\text{Hz}$ ,  $C_3 = 0.00224 \text{ m}^2\text{Hz}$ .

上述定权模型针对不同系统不同频点,  $C_i$  的拟合需要大量数据, 实际操作较为复杂, 文献 [7]、[18] 等使用了一种改进的 SNR 定权模型

$$\sigma^2 = a + b \cdot 10^{-\frac{C/N_0}{10}}. \quad (11)$$

式中,  $a$ 、 $b$  为待拟合的经验参数.

#### 2.1.3 高度角、SNR 混合随机模型

高度角体现了接收机和卫星的空间关系, 并不能完全表征信号传播过程发生的遮挡、反射等异常情况以及接收机捕获信号的质量. 在开阔环境下, 发生信号遮挡较少同时多路径效应不明显, 此时观测值的误差绝大多数是来自大气误差, 高度角越高, 所受的大气误差影响越小, 此时可以认为信号质量好. 但实际导航观测环境复杂多变, 特别是在城市导航中, 发生信号遮挡、衍射的概率极高, 此时仅仅通过高度角进行定权准确性会大大降低. 当信号发生衍射时, SNR 值发生明显地衰减, 但电离层、对流层延迟导致信号传播距离增长, 给 SNR 带来的衰减极小, 所以 SNR 能很好地通过表征信号反映传播过程中发生的遮挡、反射等异常情况, 但对于大气误差较不敏感. 在实际观测情况下, 也容易出现高高度角低 SNR、低高度角高 SNR 的情况. 单一的评估指标难以应对复杂的观测环境. 通过上述分析, 高度角和 SNR 模型存在一定的互补关系, 通过融合高度角、SNR 测量值的随机模型更为可靠、鲁棒性更强. 因此, 本文提出了一种高度角、SNR 混合的随机模型, 简称混合模型

$$\sigma^2 = w_{\text{SNR}} \left( a_{\text{SNR}} + b_{\text{SNR}} \cdot 10^{-\frac{C/N_0}{10}} \right) + w_{\text{EL}} \left( a_{\text{EL}}^2 + \frac{b_{\text{EL}}^2}{\sin^2 E} \right). \quad (12)$$

式中,  $w_{\text{SNR}}$ 、 $a_{\text{SNR}}$ 、 $b_{\text{SNR}}$ 、 $w_{\text{EL}}$ 、 $a_{\text{EL}}$ 、 $b_{\text{EL}}$  为待拟合的经验参数.

### 2.2 多频多系统随机模型精化

多频多系统的随机模型的主要内容有观测值的噪声水平、伪距与载波相位噪声比以及卫星系统间/频率间观测值噪声比的确定<sup>[4]</sup>. 本节通过函数拟合确定测量值的噪声水平; 通过对伪距、相位噪声单独进行拟合, 间接确定伪距与载波相位噪声比; 通过对多频多系统观测数据噪声进行拟合, 间接确定卫星系统间/频率间观测值噪声比.

本节超短基线实验数据采集于武汉大学测绘学

院大楼楼顶,数据时长为 3 天,视野较为开阔,测站周围环境如图 1 所示.流动站和基准站皆采用 Trimble Alloy 接收机,采样间隔为 5 s,卫星截止高度角设为 10°.



图 1 测站周围环境示意图

拟合前,需对 SNR 和高度角分别以 0.25 dB/Hz 和 1°为间隔对噪声进行统计计算,通过下述两种方法进行三维函数拟合:

1) 对式 (13) 中的所有参数进行拟合;

2) 先对高度角和 SNR 模型进行拟合,得到  $a_{SNR}$ 、 $b_{SNR}$ 、 $a_{EL}$ 、 $b_{EL}$  后,随后通过三维函数拟合得到  $w_{SNR}$ 、 $w_{EL}$ .

经过实验发现第一种方法容易拟合失败或者拟合的曲线合理性较差,如图 2 所示,方法一拟合时,会出现拟合的误差偏大、误差主要与单一指标信息相关,而与另一指标信息相关性小等情况.因此本文采用第二种方法进行拟合,以 GPS L1C/A 信号为例,详细描述随机模型拟合过程.

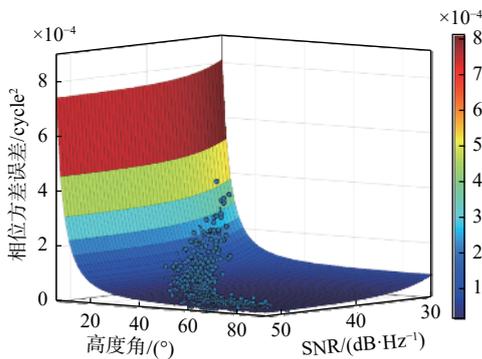


图 2 方法一拟合失败示例图

首先对高度角、SNR 随机模型进行拟合,拟合效果如图 3 所示,表 1 给出高度角、SNR 拟合参数.

随后使用三维函数拟合工具箱对高度角 SNR 混合随机模型进行拟合,拟合效果如图 4 所示.

表 2 给出混合模型拟合参数及统计残差的  $\sigma$ 、 $2\sigma$ 、 $3\sigma$  的占比.

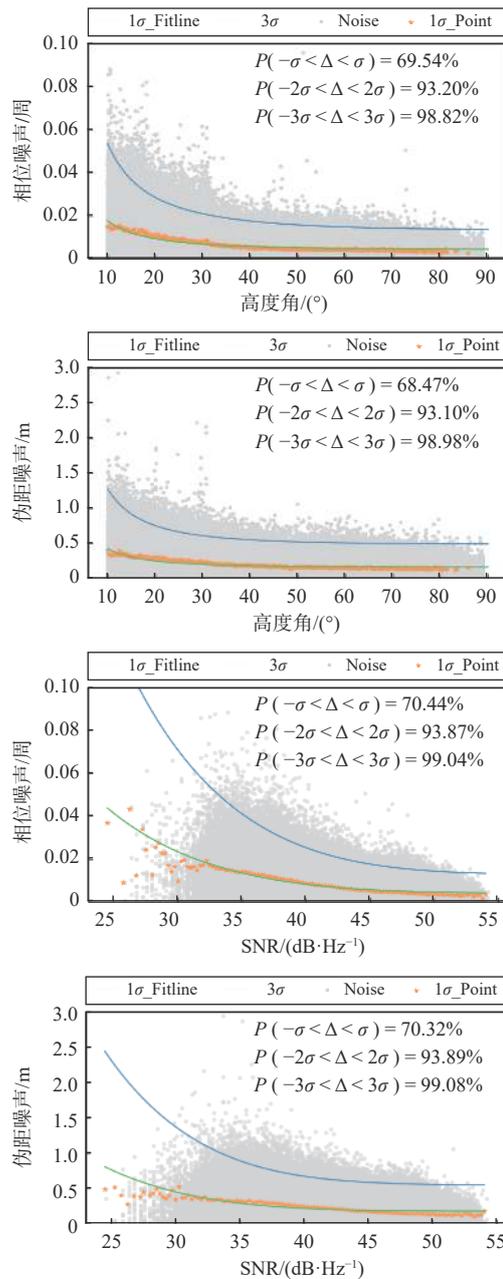


图 3 高度角、SNR 模型函数拟合图

表 1 高度角、SNR 拟合参数

拟合类型	高度角模型		SNR模型	
	$a$	$b$	$a$	$b$
伪距	$1.49 \times 10^{-1}$	$6.91 \times 10^{-2}$	$3.36 \times 10^{-2}$	$1.77 \times 10^{-2}$
相位	$3.53 \times 10^{-3}$	$3.04 \times 10^{-3}$	$1.83 \times 10^{-5}$	$5.39 \times 10^{-1}$

表 2 混合模型拟合参数及误差分布统计表

拟合类型	拟合参数		$p\{-k\sigma < \Delta < k\sigma\}/\%$		
	$w_{EL}$	$w_{SNR}$	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$
伪距	0.64	0.39	69.84	93.87	99.16
相位	0.30	0.67	69.67	93.47	98.92

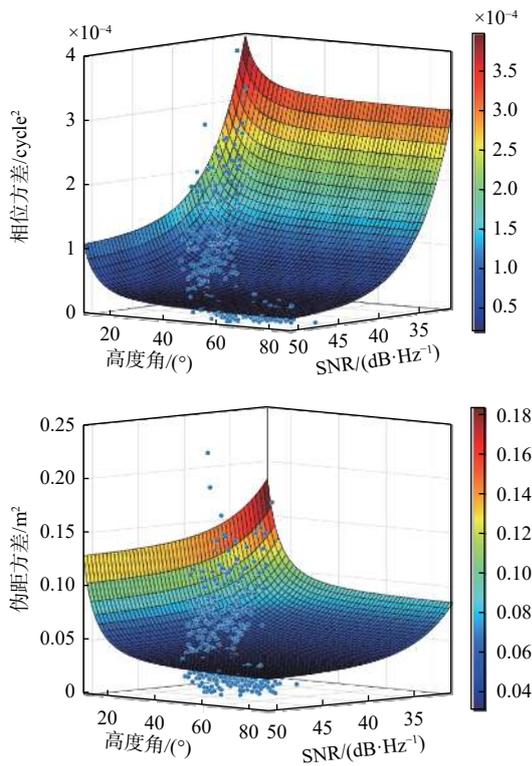


图 4 混合模型三维函数拟合图

三个模型的 $3\sigma$ 占比率较为接近,但混合模型融合了高度角和 SNR 的信息.当 SNR 较小、高度角较大时,混合模型最终评定的方差也是较大,能有效地抑制异常情况对定位结果的影响.同时通过函数拟合可以看出,在不同高度或不同 SNR 下,伪距与相位噪声比值不是一个常数项,传统随机模型会将伪距与相位噪声比固定,会导致部分观测值精度虚高或虚低的假象,从而影响最终定位精度.本文不固定伪距与相位噪声比,而是将伪距和相位噪声单独进行拟合.

基于上述拟合过程,本文继续对 GPS L2P (通过 Z 跟踪技术进行捕获)、Galileo 的 E1 和 E5a 以北斗二号 (BDS-2)/北斗三号 (BDS-3) 的 B1I 和 B3I 的随机模型进行拟合,其中表 3 详细地给出 GPS/Galileo/BDS-2/BDS-3 的混合模型最终拟合参数及误差分布情况.

通过拟合函数来看,卫星系统间/频率间观测值噪声比值在不同 SNR 或不同高度角下是不同的;因此本文混合随机模型不固定伪距相位噪声比和卫星系统间/频率间观测值噪声比,而是给出每个卫星系统每个频段的伪距和相位的随机模型函数.

表 3 GPS/Galileo/BDS-2/BDS-3 混合模型拟合参数及误差分布情况

卫星系统	频段	拟合类型	$p\{-3\sigma < \Delta < 3\sigma\}/\%$	与高度角相关的参数			与 SNR 相关的参数		
				$w_{EL}$	$a_{EL}$	$b_{EL}$	$w_{SNR}$	$a_{SNR}$	$b_{SNR}$
GPS	L1	伪距	99.16	0.64	$1.49 \times 10^{-1}$	$6.91 \times 10^{-2}$	0.39	$3.36 \times 10^{-2}$	$1.77 \times 10^{-2}$
		相位	98.92	0.30	$3.53 \times 10^{-3}$	$3.04 \times 10^{-3}$	0.67	$1.83 \times 10^{-5}$	$5.39 \times 10^{-1}$
	L2	伪距	99.03	0.60	$1.21 \times 10^{-1}$	$7.53 \times 10^{-2}$	0.35	$2.85 \times 10^{-2}$	$1.22 \times 10^{-1}$
		相位	99.27	0.44	$8.62 \times 10^{-4}$	$3.31 \times 10^{-3}$	0.68	$2.40 \times 10^{-5}$	$2.28 \times 10^{-2}$
Galileo	E1	伪距	98.91	0.69	$7.20 \times 10^{-2}$	$5.72 \times 10^{-2}$	0.27	$1.18 \times 10^{-2}$	$2.17 \times 10^{-2}$
		相位	98.84	0.72	$3.46 \times 10^{-3}$	$2.11 \times 10^{-3}$	0.25	$2.43 \times 10^{-5}$	$2.67 \times 10^{-1}$
	E5a	伪距	98.90	0.40	$5.89 \times 10^{-2}$	$5.59 \times 10^{-2}$	0.56	$2.89 \times 10^{-3}$	$2.96 \times 10^{-2}$
		相位	99.04	0.19	$2.57 \times 10^{-3}$	$2.35 \times 10^{-3}$	0.79	$6.03 \times 10^{-6}$	$5.21 \times 10^{-1}$
BDS-2	B1I	伪距	98.91	0.13	$1.18 \times 10^{-1}$	$7.36 \times 10^{-2}$	0.86	$2.47 \times 10^{-2}$	$1.04 \times 10^{-2}$
		相位	99.07	0.17	$4.82 \times 10^{-3}$	$3.10 \times 10^{-3}$	0.85	$1.91 \times 10^{-5}$	$4.44 \times 10^{-1}$
	B3I	伪距	99.61	0.26	$5.89 \times 10^{-2}$	$4.78 \times 10^{-2}$	0.99	$2.32 \times 10^{-3}$	$9.29 \times 10^{-1}$
		相位	99.39	0.78	$4.27 \times 10^{-3}$	$2.63 \times 10^{-3}$	0.53	$1.79 \times 10^{-5}$	$2.65 \times 10^{-1}$
BDS-3	B1I	伪距	98.91	0.14	$5.31 \times 10^{-2}$	$7.03 \times 10^{-2}$	0.77	$1.61 \times 10^{-2}$	$1.42 \times 10^{-2}$
		相位	99.43	0.55	$2.64 \times 10^{-3}$	$2.55 \times 10^{-3}$	0.42	$2.07 \times 10^{-5}$	$4.61 \times 10^{-1}$
	B3I	伪距	99.21	0.27	$4.65 \times 10^{-2}$	$4.78 \times 10^{-2}$	0.73	$6.22 \times 10^{-3}$	$1.38 \times 10^{-2}$
		相位	99.42	0.48	$2.34 \times 10^{-3}$	$2.17 \times 10^{-3}$	0.52	$1.47 \times 10^{-5}$	$2.55 \times 10^{-1}$

### 3 随机模型验证与性能评估

本章选取了 1 组动态数据对高度角随机模型、SNR 随机模型和高度角、SNR 混合随机模型性能进行评估。数据采集于 2020 年 11 月 07 日武汉市光谷科技城,观测时长为 6 000 s,流动站接收机采样频率为 1 Hz。由图 5 可知,该数据场景信息较为丰富,既有比较开阔的郊区场景,也有高楼林立、容易发生遮挡的城市复杂场景。



图 5 实测数据轨迹图

流动站基准站皆采用 Trimble Alloy 接收机,两站距离小于 20 km。车上同时搭载一台惯导器件 NovAtel SPAN (FSAS),通过商业软件 Inertial Explorer 8.7 进行事后双向 GNSS/INS 紧组合平滑处理,最终通过归算杆臂值得到流动站的参考坐标 (GNSS 接收机相位中心)。表 4 给出了软件解算策略。

表 4 解算配置表

解算参数	参数定义
卫星系统	GPS BDS-2 BDS-3 Galileo
模糊度固定ratio阈值	2.5
截止高度角/(°)	10

首先,三种随机模型采用上述的策略进行实时动态 (RTK) 解算,将其解算结果与参考轨迹进行比较,并绘制误差序列图。

由图 6 可得,基于 SNR 模型的解算结果最差,高度角模型较好,混合模型解算结果最优。统计高度角、SNR、混合模型水平误差 RMS 分别为 8.9 cm、3.6 cm、1.8 cm,高程误差 RMS 分别为 17.6 cm、6.2 cm、3.9 cm。混合模型相比于高度角模型,水平方向上定位精度提升约为 50.0%,高程方向精度提升为 37.1%。通过时序图可以看出,开始和结束时段误差较大、跳变点多;中间时段的误差小、轨迹接近参考轨迹。开始和结束时段是位于高楼遮挡的城市环境,该时段容易发现信号遮挡、多路径效应,该环境对随机模型定权准确性是一个极大的考验。在开始时段,SNR 模型中的跳点频发,且在零值附近的误差波动大;高度角模型在零值附近的误差波动小,但跳点情况也很频繁;混合模型的定位误差波动小,且跳点抑制情况好。在结束时段,三者误差序列波动较小,高度角模型跳点情况最为频繁,SNR 和混合模型对跳点的抑制情况较好。从定位精度来看,在城市复杂场景下,混合模型比单一 SNR、高度角模型定权更加准确。

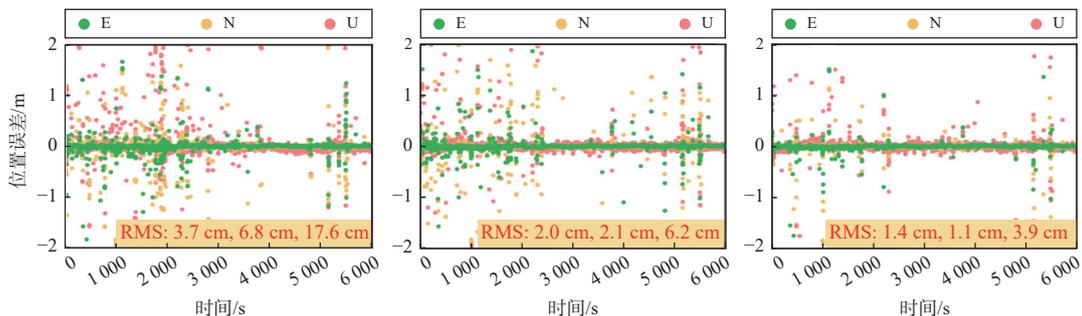


图 6 E、N、U 误差序列图 (从左到右依次为 SNR、高度角、混合模型)

随机模型定权对模糊度解算的可靠性和成功率存在很大的影响,而模糊度能否正确固定直接决定了定位结果的好坏,因此本文进一步分析随机模型对模糊度固定性能的影响。定位解算中浮点解精度由选择的定位函数模型和随机模型共同决定<sup>[19]</sup>,在定位函数相同的情况下,随机模型是影响浮点解精度的主要因素;若模型赋予观测值的权重不合理,浮点解精度

较差,模糊度搜索空间增大,容易导致模糊度无法固定。本文采用部分模糊度固定方法,通过比较模糊度固定的卫星数可在一定程度上反映模糊度固定的性能,进而反映随机模型的准确性。图 7 给出了三种随机模型中模糊度固定的卫星数,混合模型的模糊度固定的卫星数明显大于 SNR 和高度角模型的固定卫星数,SNR 模型的固定卫星数目最少。对整个时段进行

统计, SNR 模型、高度角模型、高度角 SNR 混合模型模糊度固定的平均卫星数目分别为 19.29、20.82、22.26 颗。

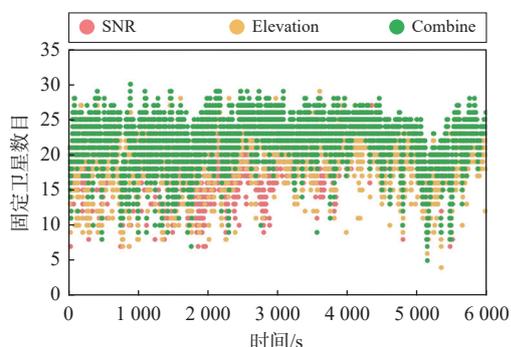


图 7 模糊度固定的卫星数序列

但如果定权过于乐观, 观测值精度虚高, 也会导致模糊度错误固定。下面对三个模型的模糊度固定率进行分析, 并比较模糊度正确固定率, 本文模糊度固定正确的评判标准为相比于参考坐标, 水平误差小于 10 cm, 高程误差小于 15 cm。

由图 8 可知, SNR 模型、高度角模型、混合模型的模糊度固定率依次提升, 但三者的模糊度固定率差距较小, 混合模型相对于 SNR 模型仅提升 1.78%。而此处更加关注的是三个模型的模糊度正确固定率, 混合随机模型的模糊度正确固定率, 相较于 SNR 模型、高度角模型, 分别提升了 5.27% 和 1.84%。通过计算可得, 混合模型的模糊度错误固定率 (模糊度固定率减去模糊度正确固定率) 仅为 1.68%, 是三者中最小的, 说明混合模型出现观测值虚高的情况少于 SNR 和高度角模型, 能够更好地反映观测值误差的真实分布, 从而验证了混合模型定权准确性高于单一高度角、SNR 模型。

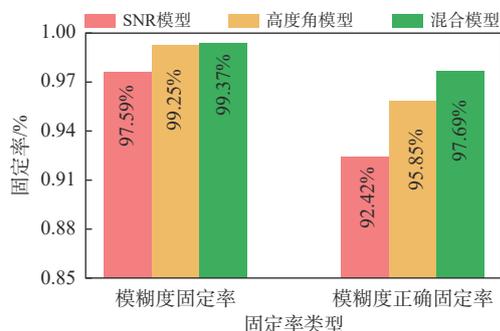


图 8 模糊度固定情况对比

## 4 结束语

本文通过站间单差、历元间三次差来提取 GPS/BDS/Galileo 的伪距、相位噪声, 利用三维函数拟合精度高度角、SNR 混合模型。得出如下结论:

1) 对拟合得到的随机模型函数分析可得, 不同 SNR 或不同高度角下, 伪距相位噪声比、系统间/频率间噪声比值不是固定的, 固定这些比值会导致部分观测值精度虚高或虚低的假象, 偏离真实误差分布。

2) 在动态实测数据中, 通过平均固定卫星数目、模糊度固定率、定位性能来反映混合模型定权准确性高于 SNR、高度角模型。混合随机模型的模糊度正确固定率, 相较于 SNR 模型、高度角模型, 分别提升了 5.27% 和 1.84%。SNR 模型定位精度低于高度角和混合模型, 混合模型相比于高度角模型, 混合模型相比于高度角模型, 水平方向上定位精度提升约为 50.0%, 高程方向精度提升为 37.1%。

本文通过先验信息 (高度角、SNR) 对观测值进行定权, 未来可以更进一步融入卫星的几何分布状态和卫星数目进行定权以及验后通过方差分量估计<sup>[20]</sup>来动态调整观测值权重。

## 参考文献

- [1] 宁津生, 姚宜斌, 张小红. 全球导航卫星系统发展综述[J]. 导航定位学报, 2013(1): 3-8.
- [2] 张小红, 马福建. 低轨导航增强GNSS发展综述[J]. 测绘学报, 2019, 48(9): 1073-1087.
- [3] 李盼. GNSS精密单点定位模糊度快速固定技术和方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2016.
- [4] 曾琪. BDS/GPS组合动态相对定位及其质量控制方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- [5] HU H, XIE X F, GAO J X, et al. GPS-BDS-Galileo double-differenced stochastic model refinement based on least-squares variance component estimation[J]. Journal of navigation, 2021, 74(6): 1-16. DOI: 10.1017/S0373463321000564
- [6] 戴吾蛟, 丁晓利, 朱建军. 基于观测值质量指标的GPS观测值随机模型分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, 33(7): 718-722.
- [7] 刘云朋, 尹潇, 楼立志. 高度角信噪比联合随机模型的抗差GPS/COMPASS实时差分定位算法分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2014, 34(4): 145-148.
- [8] 任超, 黄惠, 杨兴跃. 高度角与信号强度联合对精密单点定位的影响[J]. 测绘科学, 2016, 41(4): 24-27.
- [9] 吕明慧, 李薇, 张宝成, 等. 联合高度角与信噪比的精化随机模型及其对高纬度精密单点定位的影响[J]. 全球定位系统, 2021, 46(3): 15-23, 53.
- [10] 李征航, 黄劲松. GPS测量与数据处理. [M]. 第2版. 武汉: 武汉大学出版社, 2010.
- [11] 刘万科, 史翔, 朱锋, 等. 谷歌Nexus 9智能终端原始GNSS观测值的质量分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(12): 1749-1756.
- [12] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗/全球卫星导航系统

- (GNSS)测量型接收机观测数据质量评估方法[R]. 中国卫星导航系统管理办公室, 2019.
- [13] KING R W, BOCK Y. Documentation for the GAMIT GPS analysis software[J/OL]. [2022-03-21]. Mass. inst. of Technol, 1995. <http://www-gpsg.mit.edu/simon/gtgk/GAMIT.poy>.
- [14] GE M, GEBDT G, ROTHACHER M, et al. Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in precise point positioning (PPP) with daily observations[J]. *Journal of geodesy*, 2008, 82(7): 389-399. DOI: [10.1007/s00190-007-0187-4](https://doi.org/10.1007/s00190-007-0187-4)
- [15] GENDT G, DICK G, REIGBER C, et al. Near real time GPS water vapor monitoring for numerical weather prediction in germany[J]. *Journal of the meteorological society of japan. Ser. II*, 2004, 82(1B): 361-370. DOI: [10.2151/jmsj.2004.361](https://doi.org/10.2151/jmsj.2004.361)
- [16] 黄劲松, 刘峻宁, 刘成宝, 等. GPS信号载噪比研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(5): 427-430.
- [17] BRUNNER F K, HARTINGER H, TROYER L. GPS signal diffraction modelling: the stochastic SIGMA- $\delta$  model[J]. *Journal of geodesy*, 1999, 73(5): 259-267. DOI: [10.1007/S001900050242](https://doi.org/10.1007/S001900050242)
- [18] 王颖喆, 陶贤露, 朱锋, 等. 利用智能手机实现GNSS原始观测值的高精度差分定位[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(12): 1941-1950.
- [19] 邓辰龙. 多频多系统 GNSS 实时双差模糊度解算理论与方法研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2016.
- [20] 邝英才, 吕志平, 陈正生, 等. 基于方差分量估计的多模 GNSS/声学联合定位方法[J]. 中国惯性技术学报, 2019, 27(2): 181-189.

### 作者简介

蔡亲青 (1999—), 男, 硕士, 研究方向为 GNSS/SINS 组合导航智能后处理, 定位定姿数据集群处理.

朱锋 (1989—), 男, 硕士生导师, 研究方向为多传感器集成技术, GNSS/惯性/视觉/激光雷达多源融合理论与方法, 精密定位定姿技术及其应用.

陈曦 (1998—), 男, 硕士, 研究方向为 GNSS/SINS 组合导航及信息融合.

马立焯 (1993—), 男, 博士, 研究方向为 GNSS 精密相对定位, GNSS/惯性组合导航.

## Refinement of GNSS stochastic model combining elevation angle and SNR and its effect on RTK positioning performance

CAI Qinqing<sup>1</sup>, ZHU Feng<sup>1,2</sup>, CHEN Xi<sup>1</sup>, MA Liye<sup>1</sup>

(1. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy of Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** The accuracy of Global Satellite System Navigation (GNSS) observations will be affected by atmospheric delay, NLOS signal, multipath and other factors. However, the sensitivity of elevation angle or SNR model to different error sources is different. As a result, the traditional single random model based on elevation angle or signal noise ratio (SNR) cannot meet the high-precision positioning and navigation of the whole scene, coupled with the emergence of multi frequency and multi system, the accuracy of observations in different frequency bands of different GNSS systems and even the same system will also be different, which also brings a great challenge to the traditional model weighting. Based on the analysis of the advantages and disadvantages of elevation random model and SNR random model, a combined random model of elevation angle and SNR is proposed in this paper; The pseudo-range and phase noise of GPS, BDS, Galileo are extracted respectively through single difference between stations and cubic difference between epochs, and the combined random model of extracted and SNR is refined. Experiments show that the correct fixing rates of ambiguity of SNR model, elevation angle model and combined model are 92.42%, 95.85% and 97.69% respectively; Compared with the elevation angle model, the positioning accuracy of the combined model is improved by 50.0% in the horizontal direction and 37.1% in the elevation direction.

**Keywords:** multi-frequency and multi-system Global Navigation Satellite System (GNSS); noise extraction; stochastic model; function fitting; ambiguity fixing