

基于模糊度中误差的 GPS 信号第三民用频率 L_5 的选取研究

郑作亚¹, 陈永奇², 卢秀山¹

(1. 山东科技大学 地球信息科学与工程学院, 山东 青岛 266510; 2. 香港理工大学 土地测量与地理资讯学系, 香港)

Study of Choosing the Third Frequency of GPS Signal Based on the Standard Error of the Estimated Ambiguity

ZHENG Zuo-ya¹, CHEN Yong-qi², LU Xi-shan¹

(1. College of Geo-information Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China; 2. Department of Land Surveying and Geo-informatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract: To achieve high precision positioning with Global Positioning System (GPS) in GPS static positioning or kinematic positioning, carrier phase ambiguity integers must be successfully resolved and fixed. It is well known to us, the US Department of Defence (DoD) has announced, that it would introduce a third civil frequency identical with the currently L_2 frequency, and later, after December, 2004, it would improve the effective and reliability of ambiguity solution. The choice of the third civil frequency is discussed according to the standard error of ambiguity in this paper, and study of determining standard error of ambiguity, the relationship of signal frequency and standard error of ambiguity, finally, we advice the value range of the third civil frequency. It offers an idea and reference for frequency chooses of navigation system signal as GALILEO system, the others navigation systems in the future.

Key words: GPS signal; ambiguity solution; standard error; L_5 frequency; triple frequency observations

摘 要: 从模糊度参数标准中误差角度出发讨论信号 L_5 频率的选取问题, 在双频观测资料模糊度参数估计基础上, 研究三频观测资料模糊度参数估计, 并进行模糊度参数标准中误差确定、讨论信号频率与模糊度标准中误差之间的关系, 最后提出新的民用频率取值范围的建议。为今后的 GALILEO 系统、其他导航系统等信号频率选取提供一种思路和借鉴。

关键词: GPS 信号; 模糊度解算; 标准中误差; L_5 频率; 三频观测值

1 引 言

无论在 GPS 静态单点定位中还是动态定位中, 载波相位观测值中整周模糊度能否成功解算并固定是 GPS 数据处理中的关键问题, 目前已经提出许多关于模糊度搜索并整周化的方法^[1~5]。作为 GPS 现代化内容之一, 美国国防部已经宣布计划在 2004 年 12 月后新发射的 GPS 卫星上要增加一个新的民用频率(预计在 2012 年开始执行^[6]), 这无疑提高了模糊度解算的有效性和可靠性, 从而提高了 GPS 定位或导航的精度和可靠性。同时也引发了我们一些思考, 新的民用频率

信号增加后, 对于基本模糊度参数估计与整周化有何影响, 第三民用频率的选取应该在什么范围内比较适合, 对定位的精度影响如何等等。基于此, 本文首先讨论了双频观测资料的模糊度参数估计方法, 在此基础上研究并推导了三频率观测资料的模糊度参数估计方法, 以及模糊度参数中误差计算公式, 从模糊度参数标准中误差角度出发, 反过来讨论信号 L_5 频率的选取范围问题, 并进行了三频率模糊度参数标准中误差的确定、讨论信号频率与模糊度标准中误差之间的关系, 最后提出了新的民用频率取值范围的建议, 这里从两种情况考虑: L_1 , L_2 两个信号频率是已知的,

收稿日期: 2006-06-30; 修回日期: 2006-10-23

基金项目: 香港 RGC 基金项目(B-Q934); 山东省基础地理信息与数字化技术重点实验室开放基金项目(SD060804)

作者简介: 郑作亚(1978-), 男, 浙江衢州人, 博士, 主要从事 GNSS 定位/定轨与导航数据处理及其应用、空间大地测量研究。

E-mail: caszy@gmail.com

讨论第三民用频率的取值范围;假设在 GPS 信号中, L_1 频率已知, 而 L_2, L_3 频率未知的, 讨论它们的取值范围以及它们之间的关系。

值得一提的是整周模糊度解算有整数解和实数解之分, 在短基线条件下, 可以得到模糊度整数解, 基线解算的精度较高, 而且对观测时间长度要求不高; 在长基线条件下, 模糊度整数解比较困难, 基线解算的绝对精度相对比较低, 而且要求长时间观测。这两种解算方法本质上也存在较大的差别, 但是为了说明模糊度参数中误差与 GPS 第三民用频率的选取之间的关系, 本文根据模糊度参数的一般解算过程中, 通过模糊度参数的中误差反算第三民用频率的选取范围, 只与模糊度参数中误差表达方式有关, 而与具体的模糊度解算方法无关。

2 双频观测资料的模糊度参数估计

卫星与接收机之间双频载波相位观测和码相位观测的基本观测方程为

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= \lambda_1 \phi_1 = \rho + c \cdot (dt - dT) - K_1 d_{ion} + \lambda_1 b_1 + M_{L1} + \varepsilon_1 \\ L_2 &= \lambda_2 \phi_2 = \rho + c \cdot (dt - dT) - K_2 d_{ion} + \lambda_2 b_2 + M_{L2} + \varepsilon_2 \\ P_1 &= \rho + c \cdot (dt - dT) + K_1 d_{ion} + M_{P1} + e_1 \\ P_2 &= \rho + c \cdot (dt - dT) + K_2 d_{ion} + M_{P2} + e_2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中, c 为光速, 取 $2.997\ 924\ 58 \times 10^8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; dt, dT 分别为接收机和卫星钟差; d_{ion} 为电离层影响; K_1, K_2 分别为两个频率上的电离层影响系数, $K_1/K_2 = f_2^2/f_1^2$; $\phi_1, \phi_2, f_1, f_2, \lambda_1, \lambda_2, b_1, b_2$ 分别为 L_1, L_2 观测的相位、频率、波长和模糊度; P_1, P_2 是 L_1, L_2 频段所对应的码观测值; $M_{L1}, M_{L2}, M_{P1}, M_{P2}$ 分别为载波相位观测和码相位观测值上的对流层延迟、多路径效应、相对论效应和潮汐影响等其他误差的综合影响, 与频率无关; ρ 为卫星到测站的真实几何距离; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, e_1, e_2$ 分别为两个频率上的载波相位观测噪声和码相位观测噪声。

根据方程(1), 令

$$L_\delta = \frac{f_1 L_1 - f_2 L_2}{f_1 - f_2} = \rho + c(dt - dT) + \frac{-f_1 K_1 + f_2 K_2}{f_1 - f_2} d_{ion} + \lambda \phi_\delta + M(L_1 + L_2) + \varepsilon(L_1 + L_2) \quad (2)$$

其中, $\lambda_\delta = c/(f_1 - f_2)$ 为宽波长, $b_\delta = b_1 - b_2$ 为双频模糊度互差, 简称模糊度互差。同时, 又令

$$P_\delta = \frac{f_1 P_1 + f_2 P_2}{f_1 + f_2} = \rho + c(dt - dT) + \frac{f_1 K_1 + f_2 K_2}{f_1 + f_2} d_{ion} + M(P_1 + P_2) + e(P_1 + P_2) \quad (3)$$

组合后式(2)和式(3)中电离层影响部分是相等的^[7], $M(L_1 + L_2)$ 和 $M(P_1 + P_2)$ 与频率无关项, 组合后的噪声部分 $\varepsilon(L_1 + L_2)$ 和 $e(P_1 + P_2)$ 表现为偶然误差, 在这里, 为了简化方程, 方便讨论, 暂时忽略它们之间的差异, 可以用平滑方法滤波, 减弱多路径效应的影响。联立方程(2)和(3)可得宽带组合后的模糊度为^[7]

$$b_\delta = b_1 - b_2 = \frac{1}{\lambda_\delta} (L_\delta - P_\delta) = \phi_1 - \phi_2 - \frac{(f_1 - f_2)}{c} \cdot \frac{f_1 P_1 + f_2 P_2}{f_1 + f_2} = \phi_1 - \phi_2 - k_{12} (P_1 + P_2) \quad (4)$$

其中, $k_{12} = \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2} = \frac{17}{137}, P_1 = \frac{P_1}{\lambda_1}, P_2 = \frac{P_2}{\lambda_2}$ 。当然, 这是利用伪距和相位进行模糊度初步解算, 而后的精确模糊度解算还要采用其他模糊度解算和固定方法, 最后对其模糊度解算有效性进行验证。

因此, 从式(4)可以看出, b_δ 与电离层的影响、基线长度无关, 而且, 组合后的观测值噪声(系数为 k_{12}) 比原始码相位观测值带来的噪声影响大大减少。在大部分情况下可以快速解算并固定, 一旦宽带组合模糊度 b_δ 确定下来, 可以得到 L_1 频率上模糊度的解算方程为

$$b_1 = b_\delta + b_2 - e(P_1 + P_2) \quad (5)$$

其中, b_2 为从式(1)得到的初始估计值, $e(P_1 + P_2)$ 为组合后随机噪声误差。从式(1)可以得到 L_1 上模糊度表达式为

$$b_1 = b_1 - \varepsilon_1 \quad (6)$$

b_1 为从式(1)得到的初始估计值, ε_1 为 L_1 频率上的随机误差。令式(5)和式(6)构成的协方差矩阵为 Q , 则 b_1 的最小二乘解为

$$b_1 = (A^T Q^{-1} A)^{-1} A^T Q^{-1} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 + b_\delta \end{bmatrix}, A^T = (1, 1) \quad (7)$$

实践表明, 对于短基线, 电离层影响可以在宽

带组合中消除,利用该方法可以有效地确定模糊度参数,该结论也可从 Almgren^[8] 的数值分析中得到证实。但是,另一方面,对于长基线而言,由于电离层延迟效应,尤其电离层高阶项误差不能得到很好的消除^[12],利用该方法解算模糊度参数并固定效果不佳。

3 三频观测资料的模糊度参数估计

如果卫星和接收机之间传播三个频率的信号,则相应的载波相位观测方程和码相位观测方程为(注:这里将第三民用频率的载波相位观测和码相位观测分别表示为 L_3, P_3 , 相应的物理量类推)

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= \lambda_1 \varphi_1 = \rho + c \cdot (dt - dT) - K_1 d_{ion} + \lambda_1 b_1 + M_{L_1} + \varepsilon_1 \\ L_2 &= \lambda_2 \varphi_2 = \rho + c \cdot (dt - dT) - K_2 d_{ion} + \lambda_2 b_2 + M_{L_2} + \varepsilon_2 \\ L_3 &= \lambda_3 \varphi_3 = \rho + c \cdot (dt - dT) - K_3 d_{ion} + \lambda_3 b_3 + M_{L_3} + \varepsilon_3 \\ P_1 &= \rho + c \cdot (dt - dT) + K_1 d_{ion} + M_{P_1} + e_1 \\ P_2 &= \rho + c \cdot (dt - dT) + K_2 d_{ion} + M_{P_2} + e_2 \\ P_3 &= \rho + c \cdot (dt - dT) + K_3 d_{ion} + M_{P_3} + e_3 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

值得一提的是,根据电离层延迟对载波相位观测和码观测的影响表达式^[11],可以知道,三频率信号组合可以消除电离层的三次项部分,更加精化了电离层改正,从而提高了定位精度。

根据上面双频观测方程同样的方法,从式(8),可以得到宽带组合模糊度为

$$b_{\delta 12} = b_1 - b_2 = \varphi_1 - \varphi_2 - k_{12}(P_1 + P_2) \quad (9)$$

$$b_{\delta 13} = b_1 - b_3 = \varphi_1 - \varphi_3 - k_{13}(P_1 + P_3) \quad (10)$$

其中, $k_{12} = (f_1 - f_2)/(f_1 + f_2)$, $k_{13} = (f_1 - f_3)/(f_1 + f_3)$ 。从式(10)可以看出,如果 L_3 的频率 f_3 非常接近于 L_1 的频率 f_1 的话,则其组合后的码相位观测值系数 k_{13} 非常小,从而有效地减弱了码相位观测值带来的噪声,也说明了宽带组合模糊度中的低噪声影响,提高了模糊度的解算精度可靠性和有效性。

将式(9)和(10)代入式(8)的第二和第三式,可以得到修正后的观测方程,令 $\alpha = f_1/f_2$, $\beta = f_1/f_3$, 则修正后的载波相位观测和码相位观测方程矩阵表达式为

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -\alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & -\beta^2 & \beta \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & \alpha^2 & 0 \\ 1 & 1 & \beta^2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \rho \\ c \cdot \Delta t \\ \frac{d_{ion}}{f_1^2} \\ \lambda_1 b_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_1 - \varepsilon_1 \\ L_2 + \lambda_2 b_{\delta 12} - \varepsilon_2 \\ L_3 + \lambda_3 b_{\delta 13} - \varepsilon_3 \\ P_1 - e_1 \\ P_2 - e_2 \\ P_3 - e_3 \end{pmatrix} \Rightarrow$$

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 1 & -\alpha^2 & \alpha \\ 1 & -\beta^2 & \beta \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & \alpha^2 & 0 \\ 1 & \beta^2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \rho + c \cdot \Delta t \\ \frac{d_{ion}}{f_1^2} \\ \lambda_1 b_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_1 - \varepsilon_1 \\ L_2 + \lambda_2 b_{\delta 12} - \varepsilon_2 \\ L_3 + \lambda_3 b_{\delta 13} - \varepsilon_3 \\ P_1 - e_1 \\ P_2 - e_2 \\ P_3 - e_3 \end{pmatrix} \quad (11)$$

从式(11)可以看出有 6 个观测方程(这里把 $\rho + c \cdot \Delta t$ 作为一个待估参数),但是式(11)中后 3 个方程由码相位观测值构成,观测精度比载波相位观测要低得多。因此,码相位观测资料在方程(11)的最小二乘解算中权重很小,如果暂不考虑码相位观测,并将方程简化为

$$BX = L - e \quad (12)$$

式中,

$$B = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 1 & -\alpha^2 & \alpha \\ 1 & -\beta^2 & \beta \end{pmatrix}, \quad X = \begin{pmatrix} \rho + c \cdot \Delta t \\ \frac{d_{ion}}{f_1^2} \\ \lambda_1 b_1 \end{pmatrix},$$

$$L - e = \begin{pmatrix} L_1 \\ L_2 + \lambda_2 b_{\delta 12} \\ L_3 + \lambda_3 b_{\delta 13} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{pmatrix} \quad (13)$$

根据最小二乘原理,方程(12)解为

$$X = (B^T B)^{-1} B^T L \quad (14)$$

相应的协方差矩阵为

$$Q_{XX} = \sigma_0^2 (B^T B)^{-1} \quad (15)$$

其中, σ_0^2 为单位权方差。

4 基于模糊度中误差的 GPS 信号 L_5 频率的选取

本文主要是讨论基于模糊度参数标准中误差

情况下的 GPS 第三民用频率的选取方案, 下面讨论基本模糊度参数的标准中误差表达式, 在此基础上, 讨论第三民用频率与基本模糊度的标准中误差之间的关系, 并提出第三民用信号频率取值大小范围的建议。

4.1 模糊度参数标准中误差的确定

暂时不考虑 $(\rho + c \cdot \Delta t)$ 和电离层影响参数, 主要考虑基本模糊度 b_1 参数估计的标准中误差, 因此, 根据式(12)和(14), 可以得到基本模糊度 b_1 的标准中误差为

$$\sigma_{b_1} = \frac{\sigma_0}{\lambda_1} (\mathbf{B}^T \mathbf{B})_{33}^{-\frac{1}{2}} \quad (16)$$

其中, σ_0 单位权中误差, 对于载波相位观测值一般取 2~3 mm。

4.2 信号三个频率与模糊度标准中误差的关系

将式(13)中的矩阵 \mathbf{B} 代入式(16), 进一步可得

$$\sigma_{b_1} = \frac{\sigma_0}{\lambda_1} \sqrt{\frac{S_1}{S_2}} \quad (17)$$

其中, S_1, S_2 [9, 10] 分别为

$$S_1 = 2(1 + \alpha^4 + \beta^4 - \alpha^2 - \beta^2 - \alpha^2\beta^2)$$

$$S_2 = 3(1 + \alpha^4 + \beta^4)(1 + \alpha^2 + \beta^2) + 2(1 + \alpha + \beta)$$

$$(1 + \alpha^2 + \beta^2)(1 + \alpha^3 + \beta^3) - (1 + \alpha + \beta)^2$$

$$(1 + \alpha^4 + \beta^4) - 3(1 + \alpha^3 + \beta^3)^2 - (1 + \alpha^2 + \beta^2)^3$$

这样, 就建立起了信号频率与基本模糊度标准中误差之间的关系。

4.3 基于模糊度标准中误差的 GPS 信号频率的选取

根据上面的信号频率与基本模糊度标准中误差之间的函数关系, 可以分两种情况讨论: ① L_1, L_2 两个信号频率是已知的, 讨论第三个频率的取值范围; ② 假定信号中只有一个频率 L_1 是已知的, 另外两个频率 L_2, L_3 是未知的。下面对这两种情况分别讨论。

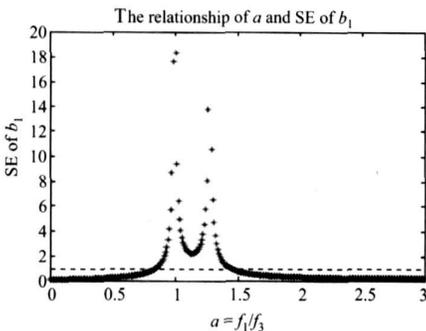


图 1 β 与 L_1 模糊度中误差 σ_{b_1} 的关系图

Fig. 1 The relationship of β and RMS σ_{b_1} of ambiguity L_1

1. 我们知道 L_1, L_2 两个信号频率是已知的, 分别为 1 575. 42 MHz 和 1 227. 60 MHz, 波长分别约为 19 cm 和 24 cm, 则 $\alpha = f_1/f_2 \approx 1.283$ 为已知值。因此, σ_{b_1} 是一个与 β 有关的单变量函数。

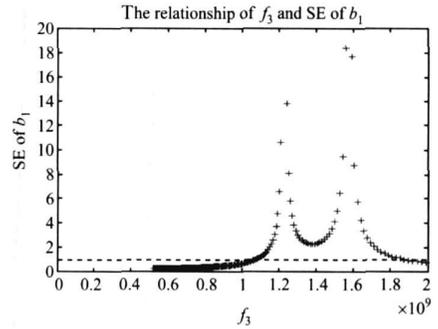


图 2 f_3 频率与 L_1 模糊度中误差 σ_{b_1} 的关系图

Fig. 2 The relationship of frequency f_3 and RMS σ_{b_1} of ambiguity L_1

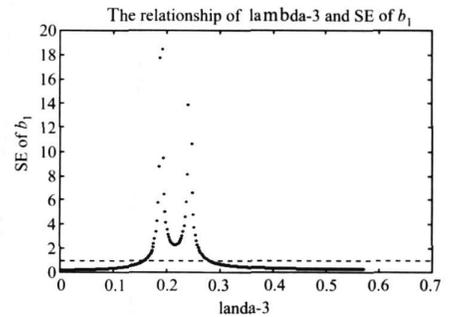


图 3 λ_3 与 σ_{b_1} 的关系

Fig. 3 The relationship of λ_3 and σ_{b_1}

(注: 图中 SE 表示 Standard Error, λ_3 表示波长 λ_3)

上面图 1~3 分别为利用 MATLAB 语言编程计算得到的 β 与 L_1 模糊度中误差 σ_{b_1} 的关系、 f_3 频率与 L_1 模糊度中误差 σ_{b_1} 的关系以及波长 λ_3 与 L_1 模糊度中误差 σ_{b_1} 的关系图。从图中可以看出, L_1 模糊度中误差 σ_{b_1} 与 β, f_3 以及 λ_3 均为 M 型的双波峰曲线(马鞍形曲线)。而且, 当 $\beta = 1$ 即 $f_3 = f_1$ 时, L_1 模糊度中误差 σ_{b_1} 异常大, 为 171 113. 309 10(图中已将该点略去), 具体 β 与 L_1 模糊度中误差 σ_{b_1} 的关系区间划分见图 4。从图 4 种可以看出, 在 $\beta < 1$, 或 $\beta > 1.3$, σ_{b_1} 都比较小, 属于适合选取 f_3 的区域, 相应的频率为 $f_3 >$

1.5754×10^9 或 $f_3 < 1.212 \times 10^9$; 考虑到 GPS 信号频率选取要求, 双波曲线鞍部也比较适合选取, 即 $\beta \in [1.051, 1.25]$, 但可选择区间很小。从有关资料^[10]知道, 美国计划第三民用频率为 $f_3 = 1176.45$ MHz, 波长 $\lambda_3 = 25.44$ cm, 这和上述推论也是相吻合的。

分, 如图 6, 由图 6 反过来确定 β 的范围为 $[1.0, 1.5]$ 。

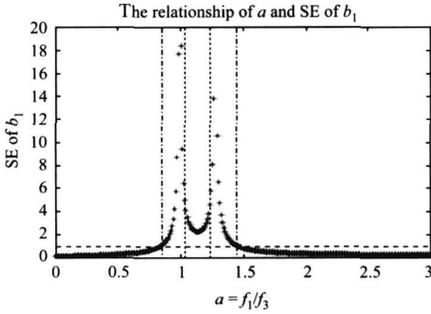


图 4 在 σ_{b_1} 较好情况下的 β 区间示意图

Fig. 4 The β inter-zone when the good σ_{b_1}

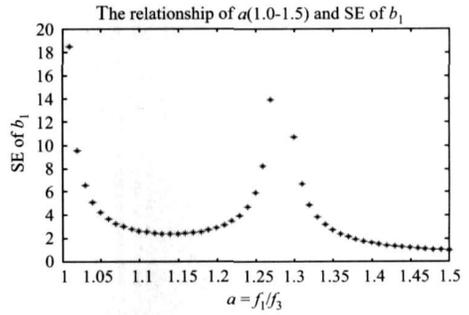


图 6 在 $\beta \in [1.0, 1.5]$ 之间与 σ_{b_1} 的关系

Fig. 6 The relationship of β and σ_{b_1} when β between 1.0 and 1.5

根据文献^[10], 我们可以得到, $\sigma_{b_{\delta 13}}$ 与 β 的函数关系式:

根据式(17)的计算公式, 分别取 $\alpha \in [0.5, 1.5]$, $\beta \in [1.0, 1.5]$ 进行双变量计算, α, β 与 σ_{b_1} 的关系如图 7, 8, 9 所示。

$$\sigma_{b_{\delta 13}} = \frac{\sigma_p |1 - \beta|}{\lambda_1 \beta} \quad (18)$$

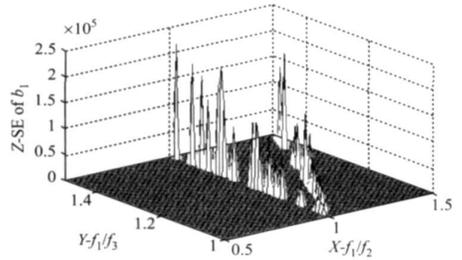


图 7 α, β 与 σ_{b_1} 的关系(方位角-37.5, 仰角 30°)

Fig. 7 The relationship of α, β and σ_{b_1}

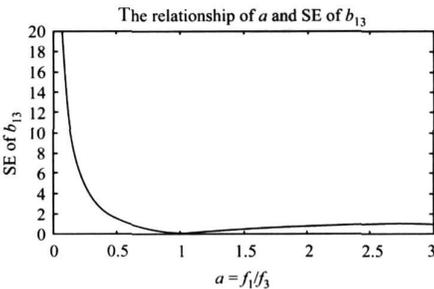


图 5 β 与 f_1, f_3 模糊度差的中误差 $\sigma_{b_{\delta 13}}$ 的关系图

Fig. 5 The relationship of β and RMS $\sigma_{b_{\delta 13}}$ of difference of f_1 and f_3

2. 假设在 GPS 信号中, L_1 频率已知, 为 1575.42 MHz, 波长约为 19 cm, 而 L_2, L_3 频率未知, 则 σ_{b_1} 是一个与 α, β 有关的双变量函数。根据 GPS 信号选择要求和原则, 要求 GPS 为高频信号以减少大气的影响, 因此确定 α 范围 $[0.5, 1.5]$ 。而且, 选取图 1 的中间 σ_{b_1} 较小的部

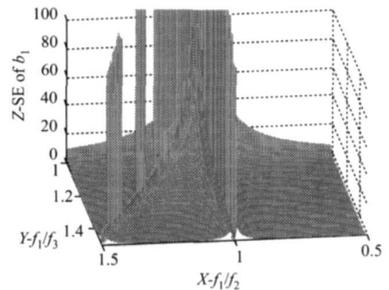


图 8 α, β 与 σ_{b_1} 的关系(方位角 172.5, 仰角 30°)

Fig. 8 The relationship of α, β and σ_{b_1}

其中, 图 7 为 MATLAB 中默认视角(方位角

- 37.5, 仰角 30°) 的 α , β 与 σ_{b_1} 关系的 3 维效果图, 图中截去了 σ_{b_1} 为 100 以上的资料, 形似一只“四趾高脚鹤”, 夹角自左向右分别为 90° , 45° , 45° 。图 8, 9 分别为(方位角 172.5 , 仰角 30°) 和(方位角 -12.5 , 仰角 30°) 的 α , β 与 σ_{b_1} 关系的 3 维效果图。

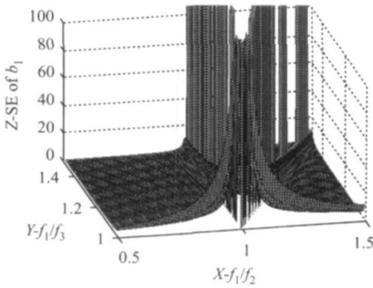


图 9 α , β 与 σ_{b_1} 的关系(方位角 -12.5 , 仰角 30°)

Fig. 9 The relationship of α , β and σ_{b_1}

5 结论

本文双频观测资料的模糊度参数估计方法基础上, 研究并推导了三频率观测资料的模糊度参数估计方法, 以及模糊度参数中误差计算公式, 从模糊度参数标准中误差角度出发讨论信号 L_5 频率的选取问题, 并进行了三频率模糊度参数标准中误差的确定、讨论信号频率与模糊度标准中误差之间的关系, 最后提出了新的民用频率取值范围的建议, 这里从两种情况考虑: ① L_1 , L_2 两个信号频率是已知的, 讨论第三民用频率的取值范围, 认为: 在 $\beta < 1$, 或 $\beta > 1.3$, σ_{b_1} 都比较小, 适合于选取 f_3 的区域, 相应的频率为 $f_3 > 1.5754 \times 10^9$ MHz 或 $f_3 < 1.212 \times 10^9$ MHz; 考虑到 GPS 信号频率选取要求, 双波曲线鞍部也比较适合选取, 即 $\beta \in [1.05, 1.25]$, 但可选择区间很小。这与美国计划第三民用频率用 $f_3 = 1176.45$ MHz, 波长 $\lambda_3 = 25.44$ cm 是吻合的; ② 假设在 GPS 信号中, L_1 频率已知, 而 L_2 , L_3 频率未知的, 讨论它们的取值范围以及它们之间的关系, 认为: 应该避开 $\alpha = 1$, $\beta = 1$ 以及 $(\alpha - 1)/\beta = 1$ ($\alpha \geq 1$) 的条带区。基于基本模糊度参数中误差讨论信号频率选取的方法也为今后的 GALILEO 系统、其他导航系统等信号频率选取提供一种思路和借鉴。

参考文献:

- [1] HATCH R. Instantaneous Ambiguity Resolution [A]. Proceedings of IAG Symposium 107 on Kinematic Systems in Geodesy, Surveying, and Remote sensing [C]. New York: Springer-Verlag, 1990. 299-308.
- [2] FREI E, BEUTLER G. Rapid Static Positioning Based on the Fast Ambiguity Resolution Approach: The Alternative to Kinematic Positioning [A]. Proceedings of the 2nd International Symposium on Precise Positioning with GPS [C]. Ottawa: [s. n.], 1990. 1 233-1 247.
- [3] CHEN D, LACHAPELLE G. A Comparison of the FASF and Least-Squares Search Algorithm for Ambiguity Resolution On The Fly [A]. Proc of the International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation, KIS94 [C]. Banff: [s. n.], 1994.
- [4] YUAN Hong, WANG Y+ju, et al. A New Method for Initial Ambiguity for Short Baseline in DGPS Positioning [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2003, 32(1): 20-25. (袁洪, 王一举, 等. 一种短基线 DGPS 定位中初始化整周模糊度的新方法 [J]. 测绘学报, 2003, 32(1): 20-25.)
- [5] JONGE P De, TIBERIUS C. The LAMBDA Method for Integer Ambiguity Estimation: Implementation Aspects, LGR-Series [M]. Delft: Publications of the Delft Geodetic Computing Center, 1996.
- [6] MOHAMED A-t A-s. Precise Point Positioning Using User Differenced Code and Carrier Phase Observations [D]. Calgary: University of Calgary, 2005.
- [7] ZHENG Zuoya. Study and Software Implementation of GPS Data Pre-processing and Onboard GPS Kinematic Orbit Determination [D]. Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 2005. (郑作亚. GPS 数据预处理和星载 GPS 运动学定轨研究及其软件实现 [D]. 上海: 中国科学院上海天文台, 2005.)
- [8] ALMGREN K. A New Method for GPS Phase Ambiguity Resolution On The Fly [D]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 1998.
- [9] HOREMUZ M, SJOBERG L E. Rapid GPS Ambiguity Resolution for Short and Long Baselines [J]. Journal of Geodesy, 2002, 38: 381-391.
- [10] SJOBERG L E. Triple Frequency GPS for Precise Positioning [A]. Geodesy—The Challenge of the Third Millennium [C]. [s. l.]: [s. n.], 2003. 141-144.
- [11] SJOBERG L E. Unbiased and Biased Estimation of GPS Phase Ambiguities from Dual Frequency Phase and Code Observables [J]. Journal of Geodesy, 1999, 73: 118-124.
- [12] XU Guochang. GPS Theory, Algorithms and Applications [M]. New York: Springer-Verlag; Berlin: Heidelberg, 2003.

(责任编辑: 雷秀丽)