

GPS/Galileo 基線計算軟體之發展

The development of GPS/Galileo baseline computation software

儲豐宥¹

楊名²

Feng-Yo Chu

Ming Yang

陳鶴欽³

曾耀賢⁴

劉正倫⁵

He-Chin Chen

Yao-Hsien Tseng

Jheng-Lun Liou

摘要

隨者美國著手進行之 GPS 現代化以及歐盟未來的 Galileo 衛星系統的發射，衛星訊號將從原有的雙頻觀測系統提升至三頻觀測系統並且擁有更好的觀測量品質，此外 Galileo 訊號與 GPS 完全相容。如此一來聯合 GPS 以及 Galileo 的聯合系統成為全球導航衛星系統(Global Navigation Satellite Systems, GNSS)，將會提供較現有 GPS 系統加倍的衛星、更多的觀測頻率、由此更可進一步提升現有 GPS 衛星定位精度、可靠度以及效率。有鑑於此，成功大學測量及空間資訊學系與內政部土地測量局正著手發展一套國內 GNSS 基線計算軟體，功能具備了模擬將來多頻 GNSS 觀測資料，包含了 GPS 以及 Galileo 三頻觀測資料，在模擬觀測量上並分別加入了電離層、對流層、多路徑、軌道誤差、雜訊之影響。基線計算上以靜態定位為主並配合使用 LAMBDA 整數周波值搜尋法。初步測試下，GNSS 雙系統下之定位成果有比 GPS 單一系統在效率上有顯著的改善。在未來，此套 GNSS 基線計算軟體將會陸續地加入強大的功能使之更為完善、正確。

關鍵詞:全球導航衛星系統、整數週波值搜尋、基線計算軟體

¹ 國立成功大學 測量及空間資訊學系 博士生

² 國立成功大學 測量及空間資訊學系 教授

³ 內政部土地測量局 專員

⁴ 內政部土地測量局 課長

⁵ 內政部土地測量局 副局長

一、前言

GPS 為美國自 1970 年代末期開始發展的導航衛星定位系統，目前有 30 顆衛星運行於距離地球表面約 2 萬公里的軌道中。其定位精度已漸漸無法滿足日益升高的使用需求，因此美國已經著手進行 GPS 系統之現代化(GPS Modernization)，增加新的、改善品質的電碼觀測量，且將原有的雙頻觀測系統提升為三頻觀測系統。在此同時，歐盟(European Union)預計於 2012 年布置完成 30 顆衛星的 Galileo 衛星系統，同樣會提供三個頻率的觀測量，並且其訊號與 GPS 完全相容。若 GPS 與 Galileo 兩系統結合使用將會有加倍的衛星、更多的測量頻率可以使用，因此，本研究利用 Matlab 軟體開發出一套以視窗化介面呈現之軟體，可以產生 GPS 以及 Galileo 之三頻模擬資料以及基線計算之功能。模擬資料中含有模擬出各種類之誤差包含：電離層、對流層、多路徑、軌道誤差、雜訊之影響。軟體並更進一步結合 GPS 以及 Galileo 雙系統之二次差分觀測量分析在未來基線計算下所獲的效益之提升。

二、模擬觀測量設定

模擬參數設定包括以下幾項：

- (一) 模擬日期與時間：程式時間採用 GPS Time System。
- (二) 觀測量頻率如表 1 所示。

表 1 觀測量頻率

		Frequency(MHz)	Wavelength(m)
Modernized GPS	L1	1575.42	0.190
	L2	1227.60	0.244
	L5	1176.45	0.254
Galileo	E1	1575.42	0.190
	E5b	1207.14	0.248
	E5a	1176.45	0.254

- (三) 衛星星曆參數：目前採用克卜勒軌道。
- (四) 週波未定值：程式可自動給定週波未定值。
- (五) 觀測量誤差：誤差設定參考如表二。

表 2 觀測量誤差設定

誤差種類	預設誤差值及說明
雜訊	Phase = $\pm 3mm$ code = $\pm 1m$
接收儀時錶	$\pm 300 m$
電離層延遲	Klobuchar Model
對流層延遲	Modified Hopfield Model
多路徑效應	Colored-noise Model
軌道誤差	GPS = $\pm 5 m$, Galileo = $\pm 2 m$
GPS 與 Galileo 系統時間差	30ns

觀測量模擬利用了 Matlab 7.0 之 GUI(Graphical User Interfaces)功能使之視窗介面得以實現。如圖 1 中所示為觀測量模擬之操作介面，可模擬之觀測量包括 GPS 以及 Galileo 之載波相位及虛擬距離，模擬資料輸出觀測檔格式則採用 RINEX version 3.0。輸入指令則包含了衛星系統、觀測日期、開始與結束時間、觀測間隔、衛星遮仰角、測站坐標、觀測量之選擇(L1、L2、L5、E1、E5a、E5b)、載波相位與虛擬距離觀測量雜訊、系統誤差之選擇(接收儀時鐘、電離層延遲、對流層延遲、多路徑效應、軌道誤差、雙系統時差)。

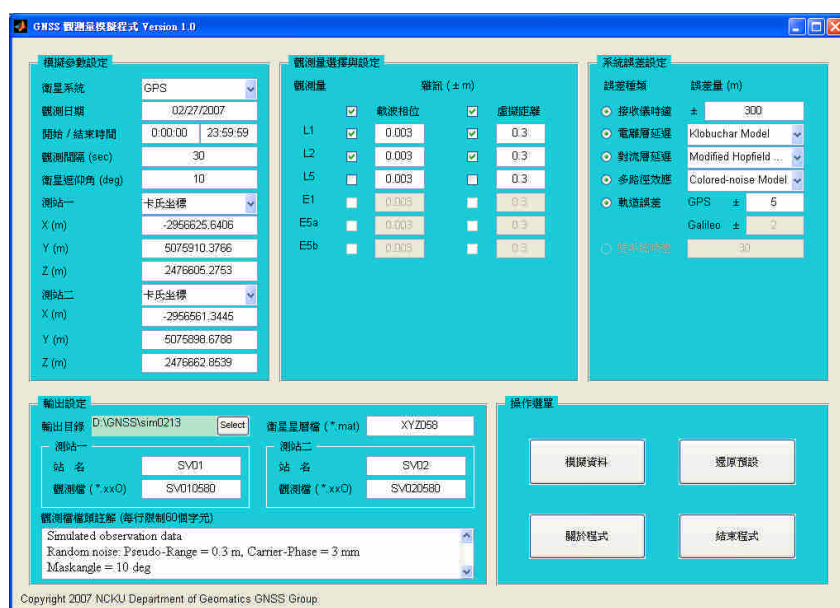


圖 1 GNSS 觀測量模擬程式主視窗

三、GPS/Galileo 觀測量處理模式

3.1 GPS/Galileo 觀測量之差異

GPS 所使用的坐標系統為 WGS84，Galileo 則採行與 WGS-84 不同的三維框架；稱為 Galileo Terrestrial Reference Frame (GTRF)(Hein et al., 2002)。GTRF 與 WGS-84 之間的差別將會被約制在 2 公分左右，因此這系統性的微小差異對絕大多數的使用者而言是可以忽略的。除此之外，現今在雙系統合併使用的情況下必須多加考慮兩者的系統時間差異(GPS-Galileo Time offset, GGTO)，目前對 GGTO 的估計值為數十奈秒(nanoseconds)的量級(Bossche *et al.*, 2004)。由於考慮了在雙系統下的 GGTO 的影響，故吾人假設一參數 τ 代表此項之誤差，並將此項誤差包含在 Galileo 觀測方程式內，推導出 GPS 以及 Galileo 載波相位及虛擬電碼觀測方程式如下：

GPS =>

$$\Phi^k = \lambda\varphi = \rho^k - \frac{I^k}{f^2} + T^k + \lambda N^k + c(dt_i - dt^k) + \varepsilon_\Phi^k \quad (1)$$

$$P^k = \rho^k + \frac{I^k}{f^2} + T^k + c(dt_i - dt^k) + \varepsilon_P^k \quad (2)$$

Galileo =>

$$\Phi^l = \lambda\varphi = \rho^l - \frac{I^l}{f^2} + T^l + \lambda \cdot N^l + c[dt_i - (dt^l + \tau)] + \varepsilon_{\Phi}^l \quad (3)$$

$$P^l = \rho^l + \frac{I^l}{f^2} + T^l + c[dt_i - (dt^l + \tau)] + \varepsilon_P^l \quad (4)$$

其中 k : GPS 衛星

l : Galileo 衛星

τ : GGTO

基線兩端的接受器同時接收兩顆衛星相同頻率的訊號時，則可藉由地面一次差分和空中一次差分的組合組成二次差分。另外，根據推導可知二次差分可以同時消去衛星時錶誤差和接收器時錶誤差以及兩系統間的時間偏差 GGTO 消除掉。

3.2 基線計算模式

基線計算數學模式可分為兩種：短基線以及長基線模式。軟體中對於短基線的定義為假設大氣層的影響可經由二次差分完全消除因此不需要解算大氣誤差參數，故短基線模式中的未知參數設定目前僅包含位置參數以及載波週波未定值參數，如公式(5)。長基線解算則是組無電離層觀測方程式消除電離層影響並估計相對天頂延遲 RTZD(Relative Troposphere Zenith Delay)(Zhang and Lachapelle, 2001)參數吸收對流層之影響。在 GPS+Galileo 雙系統三頻情況下我們可以獲得 L1/L2、L1/L5、E1/E5a、E1/E5b 四種無電離層線性組合，並配合雙頻載波及電碼線性組合(Goad and Yang, 1997; Dach *et al.*, 2007)獲得寬巷以及超寬巷觀測量協助搜尋週波值；未知參數包含了位置參數、週波值參數、以及 RTZD，如公式(6)~(13)。計算模式則都採取傳統靜態定位之方法以及最小二乘模型(Koch, 1999)，藉由法方程式的迭加以累積觀測量數目，將基線計算初始時段到結束時段所收集之觀測量逐步累加最後統一求解基線未知點的坐標以及週波未定值。觀測量處理模式為在求解未知參數前，一律採用二次差分觀測量以消去衛星與接收儀的時錶誤差以及雙系統之系統時間偏差 GGTO。

短基線觀測方程式(Leick, 1995) =>

$$\Phi_{ij,index}^{kl} = \rho_{ij,index}^{kl} + \lambda \cdot N_{ij,index}^{kl} + \varepsilon_{ij,index}^{kl} \quad (5)$$

Φ_{ij}^{kl} : 二次差相位觀測量、 ρ_{ij}^{kl} : 二次差幾何距、 N_{ij}^{kl} : 二次差相位觀測量之週波值、 ε_{ij}^{kl} : 二次差相位觀測量之雜訊、index : L1、L2、L5、E1、E5a、E5b

長基線觀測方程式(Leick, 1995)，以 GPS 三頻(L1/L2/L5)為例 =>

$$\Phi_{ij,IF(L1/L2)}^{kl} = \rho_{ij}^{kl} + T_{ij}^{kl} + \lambda_{L1}\alpha_1 N_{ij,L1}^{kl} + \lambda_{L1}\beta_1 N_{ij,L2}^{kl} + \varepsilon_{\Phi IF(L1/L2)}^{kl} \quad (6)$$

$$\Phi_{ij,IF(L1/L5)}^{kl} = \rho_{ij}^{kl} + T_{ij}^{kl} + \lambda_{L1}\alpha_2 N_{ij,L1}^{kl} + \lambda_{L1}\beta_2 N_{ij,L5}^{kl} + \varepsilon_{\Phi IF(L1/L5)}^{kl} \quad (7)$$

$$\left(\frac{\Phi_{ij,L1}^{kl}}{\lambda_{L1}} - \frac{\Phi_{ij,L2}^{kl}}{\lambda_{L2}}\right) - \frac{1}{(f_{L1} + f_{L2})\lambda_{WL}} (f_{L1}P_{ij,L1}^{kl} + f_{L2}P_{ij,L2}^{kl}) + \varepsilon_{ij,WL}^{kl} = N_{ij,L1}^{kl} - N_{ij,L2}^{kl} \quad (10)$$

$$\left(\frac{\Phi_{ij,L1}^{kl}}{\lambda_{L1}} - \frac{\Phi_{ij,L5}^{kl}}{\lambda_{L5}}\right) - \frac{1}{(f_{L1} + f_{L5})\lambda_{EWL}} (f_{L1}P_{ij,L1}^{kl} + f_{L5}P_{ij,L5}^{kl}) + \varepsilon_{ij,EWL}^{kl} = N_{ij,L2}^{kl} - N_{ij,L5}^{kl} \quad (11)$$

其中

$$\alpha_1 = f_{L1}^2 / (f_{L1}^2 - f_{L2}^2), \quad \beta_1 = -f_{L1}f_{L2} / (f_{L1}^2 - f_{L2}^2), \quad \alpha_2 = f_{L1}^2 / (f_{L1}^2 - f_{L5}^2), \quad \beta_2 = -f_{L1}f_{L5} / (f_{L1}^2 - f_{L5}^2), \quad \lambda_{WL} = c / (f_{L1} - f_{L2}), \quad \lambda_{EWL} = c / (f_{L1} - f_{L5}) \quad (12)$$

Φ_{ij}^{kl} : 二次差相位觀測量、 P_{ij}^{kl} : 二次差電碼觀測量、 ρ_{ij}^{kl} : 二次差幾何距、 N_{ij}^{kl} : 二次差相位觀測量之週波值、 ε_{ij}^{kl} : 二次差相位觀測量之雜訊、 T_{ij}^{kl} : RTZD

3.3 LAMBDA 法

無論單系統或雙系統、短基線或長基線，在週波值搜尋方面則都採用 LAMBDA (Least-Squares AMBiguity Decorrelation Adjustment) 解算二次差整數週波未定值之方法。LAMBDA 是一種離散之搜尋之技巧，主要是利用實數解以及實數解之變方-協變方高相關性的矩陣進行低相關化之計算(de Jonge et al., 1996、Teunissen, 1995)，低相關化可以使超扁橢球變得近似圓球狀，進而可以提高搜尋效率並且可以提高轉換後週波未定值之精度，因此相當有利於整數週波值之搜尋，在 χ^2 大小搜尋範圍如下(14)所示。

$$(\hat{z} - z)^T Q_z^{-1} (\hat{z} - z) \leq \chi^2 \quad (14)$$

其中， \hat{z} : 週波值實數解、 z : 週波值整數解 Q_z : 週波值之變方-協變方矩陣；在效益分析上使用了週波值成功率(Success rate)，Success rate 定義為正確週波值可估計出之機率，可利用下式計算出其 lower bound (LB)值 (Teunissen, 1998)。

$$LB = \prod_{i=1}^n \left[2\Phi\left(\frac{1}{2\sigma_{i/l}}\right) - 1 \right] \leq P(\hat{a} = a) \quad \Phi(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}z^2} dz \quad (15)$$

Success rate 會受到函數模型(function model)以及觀測量之先驗模型(stochastic model)影響，因此可以說是週波值成功搜尋與否的先驗指標， $P(\hat{a} = a)$ 為整數週波值之搜尋正確機率， $\sigma_{i/l}$ 代表低相關化後之週波值精度， $\Phi(x)$ 為機率密度函數。下所示圖 2 為基線計算介面，程式介面主要分為 PART 1、PART 2、PART 3 三個部份，PART 1 為觀測資料之讀入部分，負責讀入主站以及未知站觀測檔案以及星曆檔、PART2 部分為輸入須計算之觀測量頻率、PART 3 為計算所需之參數設定，分別為 Edit multiplier、Ratio cutoff、連續時間間隔、衛星遮仰角、週波脫落偵測門檻值及成果輸出。

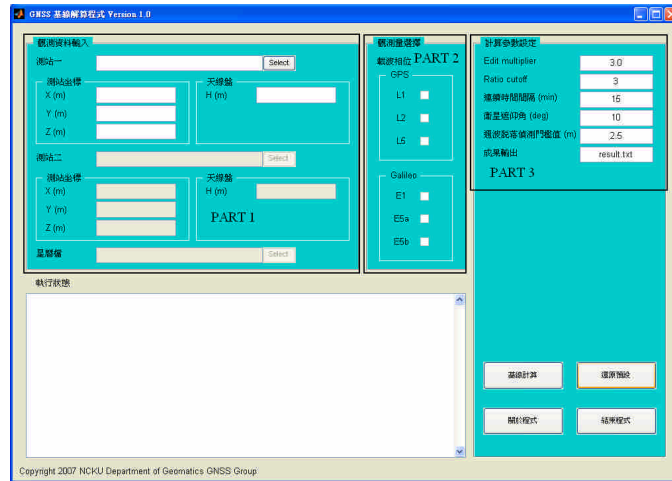


圖 4 GNSS 基線計算程式主視窗

四、整數週波值解算效益分析

本文使用 LAMBDA 整數週波值搜尋法以決定靜態基線下週波未定值之正確整數值，並利用 Success Rate(Teunissen, 1998)作為檢視之項目。短基線使用模擬器產生距離約 8 公里之兩站坐標下產生 7 顆 GPS 衛星的三頻(L1、L2、L5)，以及 7 顆 Galileo 衛星的三頻(E1、E5a、E5b)的模擬觀測資料，時間長度為 20 分鐘、長基線則產生相同衛星數目以及三頻之模擬觀測量，基線長度約為 100 公里，時間長度約 50 分鐘，模擬精度相位觀測量都為 $\pm 3\text{mm}$ 、電碼則為 $\pm 1\text{m}$ 。模擬資料的整數週波值搜尋效益如圖 1 短基線模式計算效益、圖 2 長基線模式計算效益所示，圖 1 中的 4 條曲線 GPS(L1)：使用 GPS 系統單頻的觀測量、GPS(L1, L2)：使用 GPS 系統雙頻之觀測量、GPS+Galileo(L1, E1)：使用雙系統單頻的觀測量、GPS+Galileo(L1, L5, E1, E5a)：使用雙系統雙頻的觀測量，四種二次差分觀測量時所得到的成果

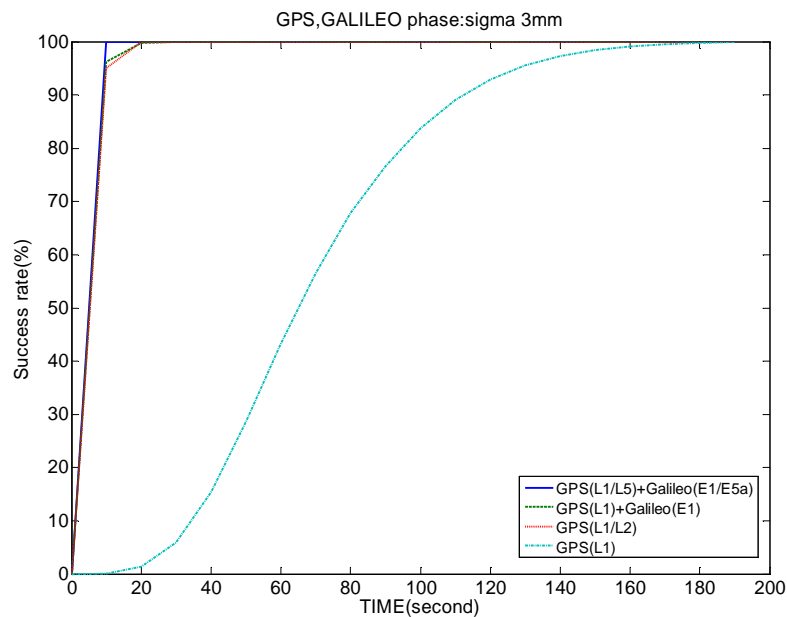


圖 1 不同時間長度下不同系統的整數週波值搜尋 Success Rate 值(短基線模式)

圖 2 中的 3 條曲線 GPS(L1/L2)：使用 GPS 系統雙頻的觀測量、GPS(L1/L2/L5)：使用 GPS 系統三頻之觀測量、GPS(L1/L2/L5)+Galileo(E1/E5a/E5b)：使用雙系統三頻的觀測量，三種二次差分觀測量時所得到的成果。

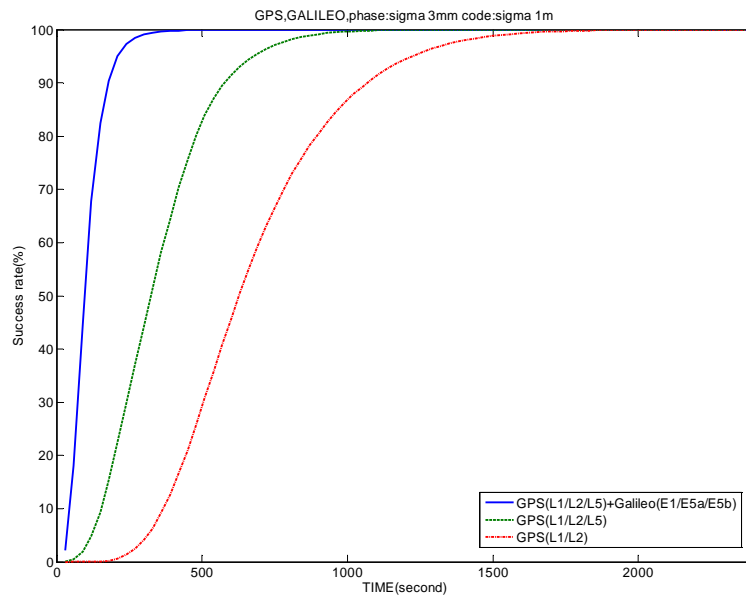


圖 2 不同時間長度下不同系統的整數週波值搜尋 Success Rate 值(長基線模式)

圖 1 顯示了，在未來加入 Galileo 系統之後，短基線整數週波值搜尋效益可獲得非常顯著的提升，尤其在 GPS+Galileo(L1 E1, L5 E5a)雙系統雙頻時可以在 2 筆資料的時間內(2 epochs)即獲得 100%的 Success Rate；在長基線，由圖二可以由 GPS(L1/L2/L5)以及 GPS(L1/L2)看出三頻的幫助對於無電離層觀測量之計算對於僅僅雙頻有顯著性的提升，若 GPS(L1/L2/L5)+Galileo(E1/E5a/E5b)雙系統三頻更可以加快 Success rate 達到 100%之速度

五、結論及建議

短基線與長基線計算模式上差異在於短基線為一個週波值對應著一個觀測量，而長基線由於組無電離層觀測量之原因會產生一個觀測量含有兩個週波值的現象，這將會造成求解法方程式秩缺的問題，因此長基線須要有額外的線性組合如寬巷觀測量來解決長基線之秩缺問題。

短基線在很短的時間內可以達到 100%的成功率，若是雙系統雙頻幾乎在第 2 個 epoch 就已經達到 100%的成功率，這代表未來短基線可以在極短的時間獲得精準的坐標值，並可實行在未來 RTK 上。

長基線無電離層線性組合觀測下，週波值搜尋將會受到電碼精度不好的影響以至於 LAMBDA 搜尋效率較短基線差，這便是長基線 Success rate 劣於短基線之原因。

圖 2 中，由於三頻觀測可以獲得兩組無電離層觀測方程式，自由度上比以往 GPS 雙頻組一組無電離層觀測方程式還要來的好，因此未來長基線要凸顯效益建議使用三頻之觀測量，若再配合雙系統增加空間上之幾何強度更可達到更好的效

益。

未來軟體功能還會加入動態基線之功能，並加強軟體介面操作之完善度，可供為業界以及學術使用之軟體。

參考文獻

- Bossche, M., Bourga, C. and Lobert, B., 2004, GPS Galileo Time Offset: How it Affects Positioning Accuracy and How to Cope with It, Proceedings of ION GNSS-04, 21-24 September, Long Beach, CA, pp. 654-659.
- de Jonge, P.J. and Tiberius, C.C.J.M., 1996, The LAMBDA Method for Integer Ambiguity Estimation : Implementation Aspects, Delft Geodetic Computing Centre LGR Series, No. 12, Delft University of Technology, The Netherlands.
- Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P., and Meindl, M., 2007, Bernese GPS Software Version 5.0, Astronomical Institute, University of Bern, Switzerland.
- Goad, C.C. and M. Yang, 1997, A new approach to precision airborne GPS positioning for photogrammetry, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 63(9): 1067-1077.
- Hein, G.W., Godet, J. I., Jean-Luc M., Jean-Christophe E., Philippe L., Rafael, and Pratt, T., 2002, Status of Galileo frequency & signal design, Proceedings of the US Institute of Navigation (ION) GPS'2002 meeting, September 24-27, Oregon Convention Center, Portland, Oregon, USA (CD).
- Joosten, P. and Tiberius, C.C.J.M., 2000, Fixing the ambiguities: are you sure?, GPS World, Vol. 11, No. 5, pp. 46-51.
- Teunissen P. J. G., 1995, The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation, Journal of Geodesy, Vol. 70, pp. 65-82.
- Teunissen, P. J. G., 1998, On the integer normal distribution of the GPS ambiguities, Artificial Satellites, 33(2): 49-64.
- Koch, K. R., 1999, Parameter Estimation and Hypothesis Testing in Linear Models, 2nd edition, Springer-Verlag, Germany.
- Leick, A., 1995, GPS Satellite Surveying, second edition, John Wiley & Sons, INC, New York, USA.
- Zhang, J. and Lachapelle G., 2001, Precise estimation of residual tropospheric delays using a regional GPS network for real-time kinematic applications, Journal of Geodesy, Vol. 75, pp. 255-266.