

Resumen

Este trabajo es una tesis doctoral para el Programa de Doctorado en Ciencia y Tecnología Aeroespacial de la Universidad Politècnica de Catalunya (UPC). Esta tesis llevó a cabo el estudio, desarrollo e implementación de algoritmos para la navegación con sistemas globales de navegación por satélite (GNSS), enfocándose en el desarrollo de algoritmos y herramientas para la determinación precisa de la posición, la velocidad y la aceleración usando el sistema GPS, en modo de post-procesado y muy lejos de estaciones de referencia.

Uno de los objetivos de esta tesis era el desarrollar herramientas avanzadas de procesado de datos GNSS, y hacerlas disponibles para la comunidad investigadora. Por ello, el esfuerzo de desarrollo del software se hizo dentro del marco de un proyecto preexistente de software libre llamado la GPS Toolkit (GPSTk). El Capítulo 1 presenta características generales de ese proyecto tales como su estructura, funcionalidades básicas y filosofía de desarrollo, mostrando además el gran nivel de portabilidad que presenta la GPSTk.

Una de las primeras tareas realizadas durante el curso de esta tesis fue la validación de las capacidades de la GPSTk para el procesado de datos de pseudorange. Los resultados de las comparaciones con una herramienta de procesamiento de datos probada (BRUS) mostraron un acuerdo excelente, tanto en el modelado como en la solución final de la posición, confirmando la viabilidad de la GPSTk como una base de código fuente confiable para el desarrollo de software de procesado de datos GNSS.

La gestión de datos GNSS demostró ser un asunto importante a tratar cuando se intentó extender las capacidades de la GPSTk al procesamiento de datos obtenidos de las fases de las ondas portadoras de la señal GPS. Esta tarea se desarrolló en el Capítulo 2, donde se presentaron las “Estructuras de Datos GNSS” (GDS por sus siglas en inglés). Se explicó allí la motivación para el desarrollo de las GDS, una visión general de su implementación, así como el *paradigma de procesamiento* asociado. En el Capítulo 2 también se incluyeron varias estrategias de procesamiento de datos basadas en el pseudorange con el fin de mostrar con claridad cómo pueden ser usadas las GDS.

La principal contribución de las GDS consiste en el hecho de que ellas preservan tanto los datos como las relaciones existentes entre ellos, indexando internamente toda la información relevante. Combinadas con su paradigma de procesamiento, el procesado de datos GNSS se convierte entonces en una especie de “línea de ensamblado”, donde las fases de procesado son realizadas de manera secuencial en lugares específicos. Este enfoque proporciona una manera fácil y directa de encapsular y procesar los datos, permitiendo escribir software que es “limpio”, fácil de leer y simple de usar, acelerando el proceso de desarrollo y reduciendo los errores de dicho proceso.

En el Capítulo 3 se trató la extensión de las capacidades de la GPSTk a los algoritmos de procesado de datos basados en la fase. Se presentaron allí algunas aplicaciones de las GDS a este tipo de procesamiento, así como importantes clases accesorias que facilitan el trabajo. También se proporcionaron implementaciones de referencia para su uso por parte de la comunidad GNSS, encontrándose éstas en el directorio `examples` del proyecto GPSTk.

Cuando se compara el rendimiento en el procesado de datos “Precise Point Positioning (PPP)” de estos ejemplos relativamente simples basados en las GDS con otras aplicaciones de reputación ya establecida, se encontró que sus resultados destacan entre los mejores. Esto confirma la validez de utilizar la GPSTk combinada con las GDS para obtener software de procesado de datos GNSS que es a la vez potente y fácil de escribir y mantener. Es más, dado que el diseño de las GDS está basado en la abstracción de datos, éstas permiten un manejo muy flexible de conceptos que están más allá de la simple encapsulación de datos, incluyendo, por ejemplo, resolvedores de ecuaciones genéricos y programables.

El Capítulo 4 se enfocó en el problema de obtener la posición precisa, en post-proceso, de un receptor GPS que se encuentra a cientos de kilómetros de la estación de referencia más cercana. Un requisito adicional era el uso de tasas de datos arbitrarias, resolviendo una importante limitación del método PPP clásico. Las ventajas aportadas por la abstracción de datos de las GDS a los resolvedores de ecuaciones, y en particular la posibilidad de utilizar un “resolvedor genérico”, fueron una pieza clave en la implementación de un procesado semejante a un PPP cinemático basado en una red de estaciones de referencia. Esta estrategia fue bautizada como “*Precise Orbits Positioning (POP)*” porque sólo necesita órbitas precisas para trabajar y es independiente de la información de los relojes de los satélites GPS.

La estrategia POP involucra múltiples estaciones separadas cientos de kilómetros, y presenta un gran número de incógnitas de diferentes tipos. Algunas incógnitas están *indexadas por receptor* (es decir, son específicas de un receptor dado, como las coordenadas o el retraso troposférico), otras incógnitas están *indexadas por satélite* (como el desfase de los relojes atómicos de a bordo), y otras están indexadas tanto por receptor como por satélite (las ambigüedades de fase,

por ejemplo). Por tanto, el número de incógnitas en un instante dado presenta una gran variación, dependiendo ésta de las estaciones de referencia disponibles y del número de satélites visibles. Durante esta tesis se desarrolló la clase de la GPSTk llamada `SolverGeneral` que ayuda a implementar esta clase de sistemas *describiendo* (en vez de escribiendo en el código fuente del software), las ecuaciones, las variables, sus relaciones y los modelos estocásticos asociados a cada una. El programa `example14.cpp` se proporciona como una implementación de referencia de este método de procesamiento de datos.

Los resultados de este enfoque fueron muy similares (como era de esperar) a los del método PPP cinemático estándar, pero proporcionando soluciones de posición con una tasa mayor. Asimismo, la estrategia POP parece proporcionar una mayor robustez a los resultados, incluso para aquellos receptores que se encuentran fuera del área de la red. La distancia desde el receptor móvil (“*rover*”) a la estación de referencia más cercana no parece ser un factor crítico, dado que en las pruebas realizadas los resultados no se degradaron de manera significativa cuando esta distancia se duplicó.

Por otra parte, el tiempo de convergencia con POP disminuye conforme el número de estaciones de la red se incrementa, pero hasta cierto punto. Este asunto representa un problema si se desea aplicar el método POP a vehículos, especialmente si los arcos de datos son cortos.

La última parte de esta tesis se enfocó en la implementación, mejora y prueba de algoritmos para determinar con precisión la velocidad y aceleración de un receptor GPS a cientos de kilómetros de la estación de referencia más cercana. El Capítulo 5 revisó varios métodos para calcular la velocidad y aceleración, haciendo énfasis en el método de las fases de Kennedy debido a su buen rendimiento. Dicho método fue explicado con detalle.

Se desarrolló una implementación de referencia del método Kennedy y se llevaron a cabo varias pruebas. Los experimentos hechos con líneas de base muy cortas mostraron que había una falla en el procedimiento propuesto originalmente por Kennedy para el cálculo de las velocidades de los satélites, introduciendo sesgos en la solución de velocidad. Se propuso entonces una modificación relativamente sencilla, y ésta redujo en un factor mayor que 35 el RMS de los errores 3D en velocidad (promedios a 5 minutos), conduciendo a una versión modificada de dicho método. Adicionalmente, resultados preliminares obtenidos experimentando con los modelos de covarianzas de errores sugieren que versiones más sencillas y rápidas pueden proporcionar resultados equivalentes al del modelo completo propuesto por Kennedy.

Entonces, y tomando ideas del método de Kennedy modificado y del método POP presentado en el Capítulo 4, se desarrolló e implementó un nuevo procedimiento de determinación de velocidad y aceleración que extiende en gran

medida el rango efectivo. Este método fue llamado “Extended Velocity and Acceleration determination (EVA)”.

Un experimento usando una aeronave ligera volando sobre los Pirineos mostró que tanto el método de Kennedy modificado como el método EVA son capaces de responder ante la dinámica de este tipo de vuelos. Cuando se compararon los resultados de estos métodos con una zona de velocidad cero los resultados fueron muy similares, mostrando el método de Kennedy modificado una ligera ventaja. El rendimiento del método EVA estuvo un poco por detrás de las estimaciones de velocidad derivadas de posiciones RTK, pero tanto Kennedy modificado como EVA superaron ampliamente a RTK en lo que a estimaciones de aceleración se refiere.

Finalmente, tanto el método de Kennedy modificado como el método EVA fueron aplicados a una red muy amplia en la zona ecuatorial de Sur América, alrededor del mediodía local y con líneas de base mayores a 1770 km. En este escenario el método EVA mostró una clara ventaja tanto en los promedios como en las desviaciones estándar para todas las componentes de la velocidad y la aceleración. Esto confirma que EVA es un método efectivo para calcular con precisión las velocidades y aceleraciones cuando la distancia a la estación de referencia más cercana supera los mil kilómetros.

Contribuciones

El desarrollo de las GNSS Data Structures (GDS) y su paradigma de procesamiento es una de las contribuciones de esta tesis. Las GDS solucionan algunos aspectos de la gestión de datos GNSS preservando tanto los datos como los metadatos, y proporcionando una manera de escribir software que acelera el desarrollo y reduce los errores.

El procedimiento POP se considera otra contribución. Aunque no es una estrategia original (métodos similares han sido reportados previamente en la literatura) su implementación representa una manera nueva de resolver este tipo de problemas. Es particularmente notable el uso de un resolutor de ecuaciones programable en tiempo de ejecución (`SolverGeneral`) donde las ecuaciones, las variables, sus relaciones y los modelos estocásticos asociados a cada una son *descritos* en vez de *escritos* en el software. Asimismo, este enfoque es lo suficientemente flexible como para ser utilizado en otros tipos de problemas complejos, como se demostró en el Capítulo 5.

El estudio de métodos de determinación de la velocidad y la aceleración basados en la fase representa otra contribución: En particular, la modificación de la manera como el método Kennedy calcula las velocidades de los satélites con-

dujo a mejoras de un orden de magnitud en los sesgos de las estimaciones de velocidad.

Adicionalmente, el desarrollo del nuevo método “Extended Velocity and Acceleration determination (EVA)” soluciona el problema de la determinación precisa en post-proceso de la velocidad y la aceleración a miles de kilómetros de la estación de referencia más cercana. Ésta se considera una contribución original e importante que pudiera tener un impacto en campos tales como la aerogravimetría, donde se aplicaba el método de Kennedy original.

Otras contribuciones relativamente menores fueron la validación inicial del código básico de la GPSTk, la demostración de su proceso de adaptación a una plataforma de cálculo embebida, la extensión de las capacidades de la GPSTk para procesar datos basados en la fase, y en particular el procesado PPP. Las implementaciones de referencia de varias estrategias de procesado de datos deben ser muy útiles para investigadores y estudiantes en el área GNSS.

Como comentario de cierre, el autor de esta tesis quiere enfatizar que este trabajo no solamente proporcionó contribuciones *científicas*, sino que también dio fruto a contribuciones *logísticas* para la comunidad GNSS en su conjunto, esforzándose en proporcionar herramientas que incrementen la productividad de los investigadores GNSS.

Publicaciones

Este trabajo de tesis resultó en una publicación en una revista arbitrada:

Salazar, D., Hernandez-Pajares, M., Juan, J.M. and J. Sanz. “GNSS data management and processing with the GPSTk”. *GPS Solutions*, DOI: 10.1007/s10291-009-0149-9, 2009.

También estuvieron relacionadas con esta tesis un cierto número de publicaciones en *proceedings* de congresos:

Salazar, D., Hernandez-Pajares, M., Juan, J.M. and J. Sanz. “Rapid Open Source GPS software development for modern embedded systems: Using the GPSTk with the Gumstix”. *Proceedings of the 3rd ESA Workshop on Satellite Navigation User Equipment Technologies NAVITEC '2006*. Noordwijk. The Netherlands. December 2006.

Salazar, D., Hernandez-Pajares, M., Juan, J.M. and J. Sanz. “The GPS Toolkit: World class open source software tools for the GNSS research

community". Proceedings of the 7th Geomatic Week. Barcelona. Spain. February 2007.

Harris, R.B., Conn, T., Gaussiran, T.L., Kieschnick, C., Little, J.C., Mach, R.G., Munton, D.C., Renfro, B.A., Nelsen, S.L., Tolman, B.W., Vorce, J. and D. Salazar. "The GPSTk: New Features, Applications and Changes". Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2007). Fort Worth, Texas. September 2007.

Salazar, D., Hernandez-Pajares, M., Juan, J.M. and J. Sanz. "Open source Precise Point Positioning with GNSS Data Structures and the GPSTk". Geophysical Research Abstracts, Vol 10, EGU2008-A-03925, 2008.

Salazar, D., Hernandez-Pajares, M., Juan, J.M. and J. Sanz. "High accuracy positioning using carrier-phases with the open source GPSTk software". Proceedings of the 4th ESA Workshop on Satellite Navigation User Equipment Technologies NAVITEC 2008. Noordwijk. The Netherlands. December 2008.

Salazar, D., Sanz-Subirana, J. and M. Hernandez-Pajares. "Phase-based GNSS data processing (PPP) with the GPSTk". Proceedings of the 8th Geomatic Week. Barcelona. Spain. February 2009.

Gaussiran, T.L., Hagen, E., Harris, R.B., Kieschnick, C., Little, J.C., Mach, R.G., Munton, D.C., Nelsen, S.L., Petersen, C.P., Rainwater, D.L., Renfro, B.A., Tolman, B.W., and D. Salazar. "The GPSTk: GLONASS, RINEX Version 3.00 and More". Proceedings of the 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2009). Savannah, Georgia. September 2009.

Finalmente, un artículo de investigación acerca del método EVA está siendo preparado actualmente, y será enviado a una revista arbitrada en un futuro cercano.

Futuras líneas de investigación

Durante el desarrollo de esta tesis surgieron varias líneas adicionales de investigación. A continuación se presenta una lista con aquellas que se consideraron más prometedoras.

- El tiempo de convergencia del método POP se acelera conforme el número de estaciones aumenta, pero hasta cierto punto, y lo mismo puede decirse

de las mejoras en los valores del error 3D-RMS. Debería investigarse la topología óptima de las redes de referencia para garantizar un nivel dado de rendimiento con el mínimo uso de recursos computacionales.

- El tiempo de convergencia es un problema cuando se aplica el método POP a vehículos en movimiento, especialmente si los arcos de datos son cortos. Un futuro tópico de investigación debería ser el encontrar estrategias para reducir el tiempo de convergencia, con el fin de aumentar la utilidad de esta estrategia de procesamiento de datos.
- La exactitud y el tiempo de convergencia del método POP se podrían mejorar considerablemente si se le pudieran aplicar estrategias de fijación de ambigüedades. Trabajos recientes sobre fijación de ambigüedades en PPP hechos por [Wang and Gao, 2006] y [Ge et al., 2008], entre otros, proporcionan una base que pudiera ser aplicada también a POP.
- Resultados preliminares obtenidos cuando se hacían pruebas con el método de Kennedy sugieren que se podrían utilizar modelos de covarianzas de errores simples y más rápidos, obteniendo no obstante resultados equivalentes en la determinación de la velocidad y la aceleración. Este aspecto debería ser explorado para proporcionar mejores modelos de covarianzas.
- Trabajos previos tales como [Serrano et al., 2004] han intentado extender el método de Kennedy a las aplicaciones en tiempo real, usando un único receptor, efemérides “*broadcast*” y un filtro diferenciador simple de primer orden. El autor de esta tesis considera que se podrían obtener mejores resultados usando un filtro diferenciador más sofisticado, de tipo Infinite Impulse Response (IIR), e incluyendo en el algoritmo correcciones proporcionadas por sistemas SBAS.
- Un trabajo hecho por [Kubo, 2009] mostró cómo se puede usar información de velocidad para mejorar el rendimiento del proceso de fijación de ambigüedades en RTK. El autor de esta tesis considera que sería interesante intentar fusionar los métodos POP y EVA con las estrategias de fijación de ambigüedades en PPP previamente mencionadas, para así crear un sistema robusto y preciso de posicionado en post-proceso capaz de operar a miles de kilómetros de la estación de referencia más cercana.

