

Leica GS18 T

El rover GNSS RTK más rápido del mundo



leica-geosystems.com



- when it has to be **right**

Leica
Geosystems

Dr. Xiaoguang Luo, Stefan Schaufler, Bernhard Richter,
Leica Geosystems AG, Suiza

Resumen

El rápido desarrollo de la fusión de sensores en GNSS y unidades de medición inerciales (IMU) ofrece una gran oportunidad para mejorar la productividad y la experiencia del usuario en el posicionamiento RTK de alta precisión. El nuevo rover Leica GS18 T GNSS RTK combina GNSS e IMU para calcular automáticamente la inclinación del bastón desde la vertical, lo que aumenta la productividad, amplía la aplicabilidad del sistema RTK y reduce los errores humanos. Este enfoque de compensación de la inclinación basado en IMU tiene las principales ventajas de ser inmune a las perturbaciones magnéticas, no requiere calibraciones in situ y es aplicable a grandes ángulos de inclinación. Estas características permiten un RTK de alta precisión en entornos más restrictivos con mayor eficiencia y flexibilidad. Este documento describe los fundamentos técnicos de GS18 T y demuestra las ventajas de aplicar la compensación de inclinación basada en IMU con respecto a la productividad, la precisión y la fiabilidad. Con GS18 T, Leica Geosystems toma un nuevo camino y establece nuevos estándares para un posicionamiento GNSS preciso mediante técnicas de fusión de sensores fáciles de utilizar.

Introducción

En las mediciones RTK, el receptor GNSS no mide la posición directamente del punto buscado, sino del centro de fase de la antena. Para optimizar la recepción de las señales GNSS, el rover suele montarse en un bastón, y la punta del bastón se coloca en el punto de interés. En la medición RTK convencional, en la que el bastón debe nivelarse manualmente con un nivel circular, la posición central de la fase se reduce a la punta del bastón teniendo en cuenta la desviación central de la fase de la antena (PCO; Hofmann-Wellenhof et al., 2008, p. 148) y la longitud del bastón. Este enfoque tiene las siguientes desventajas que limitan el rendimiento del RTK de alta precisión:

- En términos de productividad, la nivelación del bastón lleva tiempo, especialmente en el replanteo, donde es necesario repetirlo de forma reiterativa.
- Con respecto a la precisión, la sujeción vertical del bastón está condicionada por errores humanos e imperfecciones instrumentales, como un nivel circular mal ajustado.
- En cuanto a la aplicabilidad, no siempre es posible sujetar el bastón verticalmente sobre el punto buscado, por ejemplo, cuando se miden las esquinas de un edificio.

Por lo tanto, sería deseable tomar mediciones RTK precisas del punto buscado sin necesidad de nivelar el bastón.

VENTAJAS ÚNICAS

Para mejorar la productividad y la experiencia del usuario con el posicionamiento RTK de alta precisión, Leica GS18 T ofrece las siguientes ventajas únicas:

- Libre de calibraciones in situ
- Inmune a campos magnéticos
- Aplicable en grandes ángulos de inclinación
- Orientación añadida a la visualización 3D



Figura 1 - Rover Leica GS18 T GNSS RTK con controlador de campo Leica CS20.

El rápido desarrollo de los sistemas de navegación integrados GNSS, inerciales y multisensoriales (Jekeli, 2001; Titterton y Weston, 2004; Groves, 2013) ofrece una gran oportunidad para compensar la inclinación en RTK que ajusta automáticamente la inclinación del bastón desde la posición de plomada. Suponiendo que se conozca la longitud del bastón, el error de posición debido a la inclinación puede compensarse si se determina con precisión los ángulos de giro (attitud u orientación angular) del bastón. Mientras que la medición del ángulo del bastón con respecto a la vertical puede lograrse con precisión mediante acelerómetros, por ejemplo, la medición de la orientación del bastón con respecto al norte geográfico es una tarea mucho más difícil. (Hong y otros, 2005). Otros fabricantes de equipos GNSS RTK convencionales con compensación de inclinación utilizan una brújula electrónica, que se basa en mediciones magnetométricas y proporciona la orientación del bastón con respecto al norte magnético (Nichols y Talbot, 1996; Kurtovic y Pagan, 2009). Este enfoque basado en magnetómetros tiene los siguientes inconvenientes:

- Son necesarias calibraciones in situ, las cuales consumen mucho tiempo y reducen la productividad.
- Se necesita un modelo magnético de alta definición y costoso desde el punto de vista computacional. De lo contrario, el ángulo de declinación local (el ángulo entre el norte geográfico y el norte magnético) puede tener un error de hasta tres grados, incluso sin ningún campo perturbador local (Dusha, 2017).
- Las mediciones con magnetómetros se ven afectadas por las perturbaciones magnéticas causadas por metales ferrosos (por ejemplo, automóviles, edificios con acero estructural) y corrientes eléctricas (líneas eléctricas, instalaciones eléctricas...), que suelen estar presentes en los entornos de trabajo en RTK.
- El campo magnético medido en el magnetómetro varía significativamente con el ángulo de inclinación (Pedley, 2012), limitando el rango de compensación de inclinación a menudo a 15 grados.

Para evitar los inconvenientes mencionados anteriormente, la solución de compensación de inclinación de Leica GS18 T utiliza mediciones IMU precisas de sensores microelectromecánicos (MEMS) de grado industrial, que son especialmente apropiados para aplicaciones topográficas. Inspirándose en tecnologías que se han aplicado con éxito en la aviación y la navegación marítima durante años (Crassidis y Markley, 2003), se integra un sistema de navegación inercial (INS) personalizado con el GNSS de forma sofisticada para proporcionar el RTK GNSS más rápido y fácil de usar del mundo.

Productividad y experiencia del usuario

El GS18 T se ha diseñado para mejorar la productividad y la experiencia del usuario en el posicionamiento RTK de alta precisión. La Fig. 2 muestra los componentes clave que permiten que el GS18 T sea el rover GNSS RTK más rápido del mundo. Gracias a la compensación de la inclinación, no es necesario nivelar el bastón, lo que aumenta la productividad en un promedio del 20 % con respecto a las prácticas topográficas GNSS RTK convencionales. Además, el GS18 T utiliza un alto muestreo de aceleraciones y velocidades angulares del MEMS IMU para determinar la disposición del bastón en tiempo real. Dado que estas mediciones IMU no se ven afectadas por los campos magnéticos, el GS18 T es inmune a las perturbaciones magnéticas y no requiere ninguna calibración in situ. Funciona de forma inmediata y es más rápido que los sistemas basados en magnetómetros. Además, la técnica de compensación de inclinación basada en IMU en combinación con RTK instantáneo permite la máxima productividad, especialmente en levantamientos topográficos, y proporciona una precisión similar a la de las mediciones realizadas al nivelar el bastón manualmente.

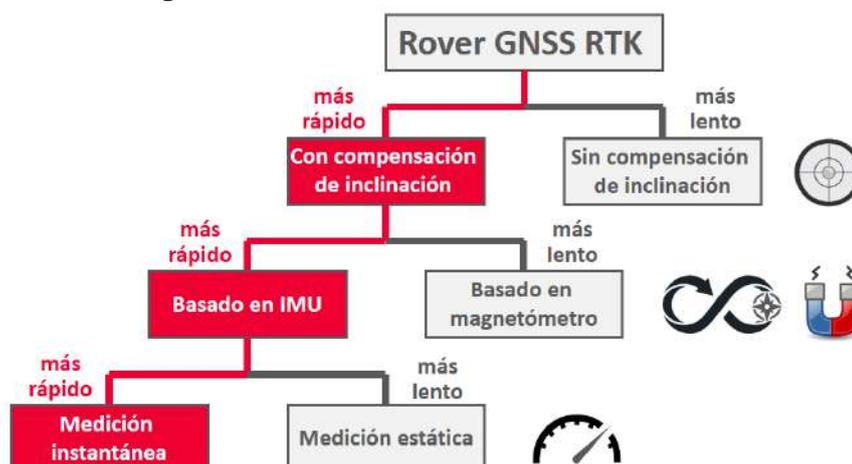


Figura 2 - Leica GS18 T como el rover GNSS RTK más rápido con compensación de inclinación basada en IMU.

En cuanto a la experiencia del usuario, el GS18 T se centra en ampliar la aplicabilidad del RTK de alta precisión y en mejorar la comodidad del usuario en los trabajos de campo. Aplicando la compensación de inclinación basada en IMU, los puntos que antes no eran accesibles con GNSS, como las esquinas de edificios y los puntos obstruidos (Fig. 3), ahora pueden medirse directamente con RTK, incluso con ángulos de inclinación grandes de más de 30 grados.

Sin la nivelación del bastón, que requiere un alto nivel de concentración, el usuario puede prestar más atención a los eventos relevantes para la seguridad en el entorno topográfico, tales como el paso de vehículos y las máquinas en funcionamiento.



Además, la información de posición se utiliza para ayudar a los usuarios a orientarse en el campo actualizando automáticamente la visualización 3D del entorno en función de la orientación del sensor. Esto es particularmente útil cuando se realiza un replanteo. La información sobre la posición de las mediciones compensadas por inclinación es totalmente trazable, lo que permite garantizar la calidad para los propios usuarios y sus clientes. Las mejoras en la productividad y la experiencia del usuario logradas con el GS18 T se basan en una variedad de innovaciones, en particular en el seguimiento de la señal GNSS y en las técnicas de fusión de sensores.



Figura 3 - Uso del Leica GS18 T para medir esquinas de edificios y puntos obstruidos que antes no eran medibles en la medición RTK convencional con un bastón vertical.

Seguimiento de la señal GNSS de alto rendimiento

Desafíos en la compensación de inclinación RTK

En el posicionamiento RTK de alta precisión con compensación de inclinación, el seguimiento fiable y de alta sensibilidad de las señales GNSS en todas las bandas de frecuencia es de gran importancia, especialmente en grandes ángulos de inclinación. Como se ilustra en la Fig. 4, si el bastón se inclina t grados en contra de un satélite, el ángulo de elevación de la señal GNSS entrante con respecto al horizonte de la antena también disminuye t , de α (bastón vertical) a β (bastón inclinado).

Para un ángulo de elevación determinado α , cuanto mayor sea la inclinación t , menor será el ángulo β . Esto indica que una señal GNSS recibida en un ángulo de elevación alto en una medición RTK convencional con un bastón vertical podría convertirse en una señal de baja elevación en el caso de compensación de inclinación, dependiendo del ángulo de inclinación y de la dirección de la inclinación. Además, cuando se realizan mediciones RTK en esquinas de edificios o cerca de vallas y paredes, la recepción de señales con ruido aumenta debido al

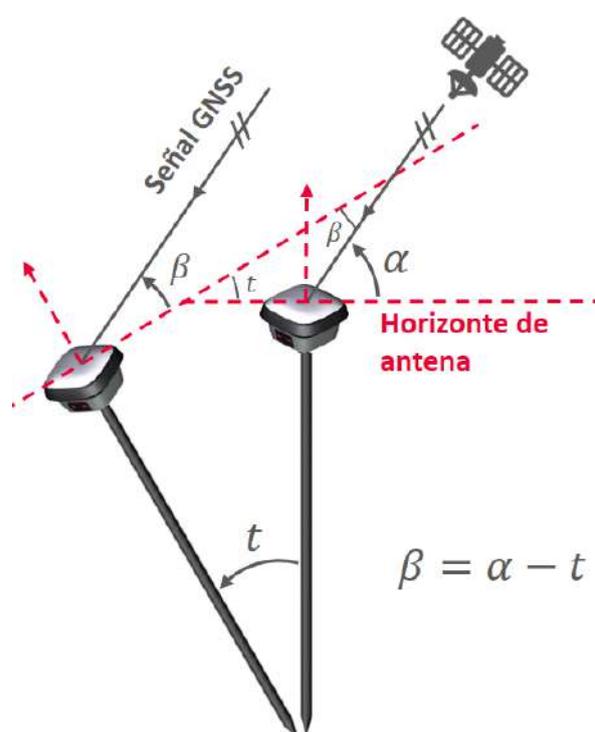


Figura 4 - Disminución del ángulo de elevación de la señal GNSS entrante al inclinar un bastón lejos del satélite (α : ángulo de elevación del satélite para un bastón vertical, β : ángulo de elevación del satélite para un bastón inclinado, t : ángulo de inclinación).

multipath o a interferencias cercanas. Para hacer frente a estos desafíos, el GS18 T cuenta con avanzadas tecnologías de seguimiento de señales, que proporcionan el máximo número de observaciones para soluciones RTK con compensación de inclinación.

Tecnologías avanzadas de seguimiento de señales

La antena y el motor de medición (ME) de un rover GNSS RTK desempeñan un papel clave en el seguimiento de las señales de corrección GNSS y de la banda L. La antena de GS18 T es una antena patch de alto rendimiento, que mantiene una estructura plana y de bajo perfil para tamaños pequeños. Cualquier antena plana puede inevitablemente excitar las ondas de superficie que se propagan a lo largo del entorno entre el aire y el plano de tierra metálico. Estas ondas se difractan en el borde del plano de tierra, causando radiaciones en todas las direcciones hacia el espacio. En el caso de las aplicaciones GNSS, estas radiaciones no deseadas aumentan la recepción del ruido de las señales debido a la propagación por multipath o a interferencias cercanas.

La tecnología de carga de la matriz circular parasitaria ha sido desarrollada por Yang y Freestone (2017) para optimizar el diagrama de radiación de la antena mediante la supresión de la propagación de las ondas de superficie. El concepto de esta tecnología se ilustra en la Fig. 5. Como se puede ver, los monopolos reactivos/resistivos periféricos en forma de espiral se colocan circularmente alrededor del elemento principal de la antena para manipular las ondas superficiales que se

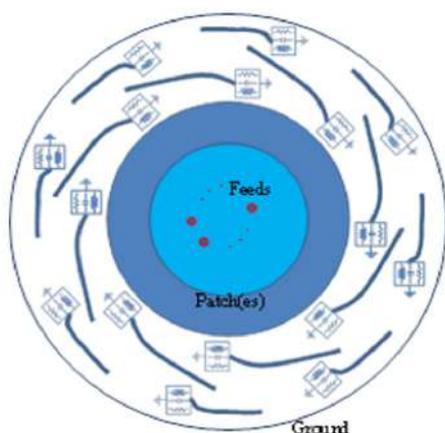


Figura 5 - Concepto de antena con cargas de sistema circular parasitario en forma de espiral (Yang y Freestone, 2016).

originan. Después de interactuar con los monopolos parásitos, las ondas superficiales se convierten en ondas dispersas y se vuelven a irradiar al espacio libre. De esta manera, el diagrama de radiación de la antena se remodela para mejorar las capacidades de seguimiento del ángulo de baja elevación. La capacidad de rastrear

satélites a baja elevación manteniendo al mismo tiempo una alta ganancia para satélites de mayor elevación es particularmente importante para aplicaciones RTK en entornos difíciles como cañones urbanos y cubiertas densas.

Además, la mejora de la capacidad de seguimiento de baja elevación también es beneficiosa para recibir señales de corrección en banda L de satélites geoestacionarios en altas latitudes (Yang y Freestone, 2016).

Además de la tecnología de carga de sistemas circulares parasitarios, la tecnología patentada de alimentación de antenas de banda ultraancha (Yang y Gilbertson, 2016) se ha utilizado para conseguir una polarización circular superior y unos diagramas de radiación simétricos en todo el ancho de banda del GNSS. Tomando como ejemplo la frecuencia L1, los valores de PCO norte y este de la calibración absoluta en campo Geo++ (Schmitz et al., 2002) de la antena del GS18 T son de -1 mm y -0,3 mm, respectivamente, y presentan una estabilidad del centro de la fase por debajo del milímetro. Además, el uso de múltiples puntos de alimentación, en los que las señales GNSS se introducen en la antena, conduce a un diagrama de radiación uniforme y a una baja polarización cruzada (Caizzone et al., 2018). Según la teoría de la antena, la polarización cruzada es una de las principales causas del fuerte ruido multipath y de la baja eficiencia de la radiación.

Además de la antena patch de alto rendimiento, el GS18 T incorpora la última generación del motor de medición ME7. Tiene una arquitectura de 555 canales y es capaz de rastrear todos los satélites actuales y futuros en múltiples frecuencias, incluyendo GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS y NavIC. En el momento de redactar el presente documento, la constelación de Galileo consta de 18 satélites operativos, que ya se benefician del posicionamiento RTK multi-GNSS, como se ha demostrado en Luo et al. (2017). A finales de 2018 se lanzarán un total de 19 satélites BeiDou-3 (18 MEO y uno GEO), con lo que la constelación alcanzará la capacidad operativa inicial (Yang, 2017). El sistema QZSS ha alcanzado una configuración de cuatro satélites que proporciona visibilidad continua de tres satélites en la zona de servicio (Steigenberger et al., 2018). En el caso de la compensación de inclinación, el uso de estos nuevos sistemas, además de GPS y GLONASS, ayuda a mantener soluciones RTK de alta precisión al acercarse a objetos tales como esquinas de edificios y paredes de casas. Además de las señales de los satélites de navegación, ME7 sigue las señales de corrección de banda L multicanal de los satélites de aumentación TerraStar, lo que permite el servicio SmartLink en tiempo real a nivel de cm. Leica SmartLink utiliza la técnica de posicionamiento preciso del punto

(PPP) para producir soluciones GNSS de alta precisión sin datos RTK. Debido a una adquisición de señal más rápida, una mayor sensibilidad de seguimiento y un mejor rechazo multipath, ME7 proporciona un rendimiento de seguimiento de señal superior para la compensación de inclinación RTK.

Ventajas del seguimiento avanzado de la señal

Para demostrar los beneficios del rastreo avanzado de la señal bajo cielo abierto, se compararán las medidas de señal/ruido (SNR; Luo, 2013, Sect. 5.1) del GS18T con otra antena inteligente GNSS comercial de grado topográfico denominada Rover A. Al analizar 24 horas de datos de 1 Hz, la Fig. 6 muestra la mediana de SNR para las señales GPS con ángulos de elevación de 5 grados. En comparación con el Rover A, GS18 T presenta niveles más altos de SNR en todo el rango de elevación, donde se observan mejoras más significativas en las bandas de frecuencias inferiores L2 y L5 (Fig. 6b, c). En promedio, la mediana de SNR aumenta en 2 dBHz (decibelios Hertz), 4 dBHz y 8 dBHz para las señales L1, L2 y L5 del GPS, respectivamente. En condiciones normales, cuanto mayor

sea el SNR, mejor será la calidad de la señal y menor el ruido de observación.

El GS18 T es especialmente adecuado para aplicaciones RTK donde el cielo es parcialmente visible, por ejemplo, operando cerca de líneas de árboles, bajo follaje o en cañones urbanos. Para mostrar los beneficios del seguimiento avanzado de la señal en entornos difíciles, la Fig. 7 compara el número de interrupciones de ciclos entre el GS18 T y el Rover A bajo una cubierta arbolada densa. En un entorno de este tipo, las señales GNSS se bloquean, atenúan y reflejan, lo que da lugar a una gran cantidad de saltos de ciclo. Como se puede ver, en un período de cuatro horas, el GS18 T produce considerablemente menos saltos de ciclo que el Rover A, especialmente para ángulos de elevación de 75°-80° (50%), 55°-60° (64%) y 30°-35° (43%). Esto demuestra las ventajas del GS18 T en el seguimiento de señales potentes y de alta sensibilidad sobre un amplio rango de elevaciones, proporcionando el máximo número de observaciones GNSS continuas para una solución de posicionamiento mejorada.

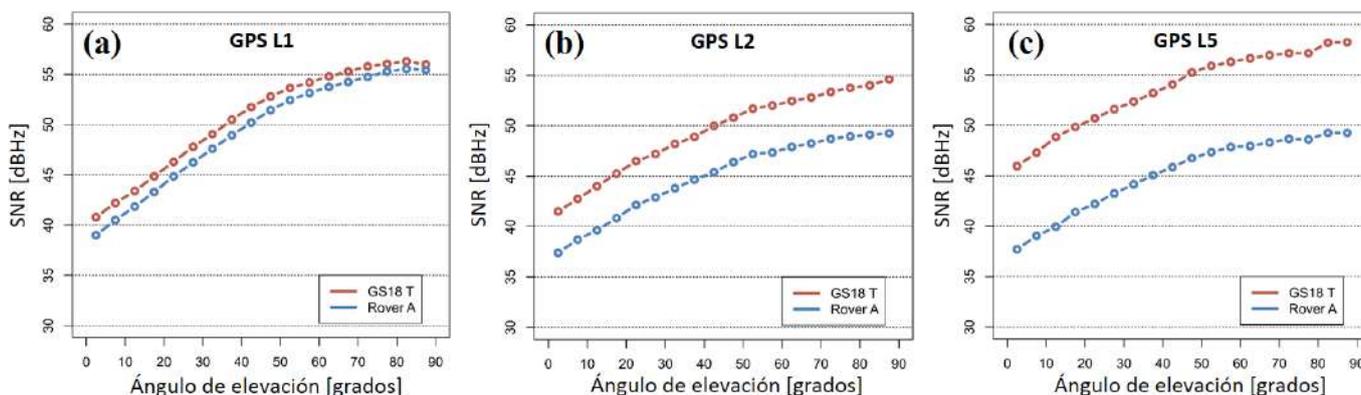


Figura 6 - Comparación de las mediciones de la relación señal/ruido (SNR) del GPS entre el GS18 T y el Rover A en cielo abierto (24 horas de datos de 1 Hz, máscara de elevación: 0 grados).

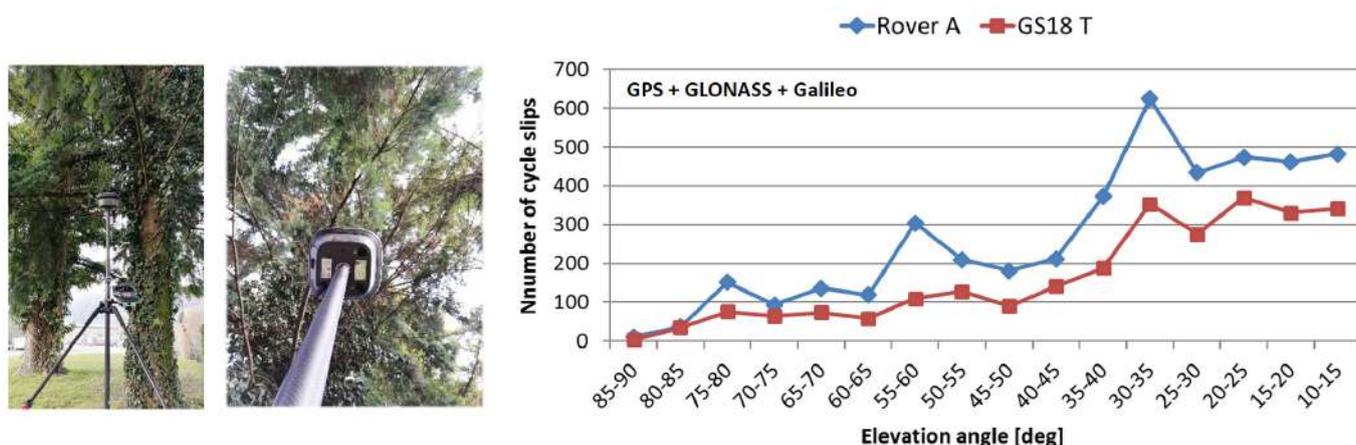


Figura 7 - Comparación del número de interrupciones de ciclo entre el GS18 T y el Rover A bajo cubierta arbórea densa (cuatro horas de datos de 1-Hz, máscara de elevación: 10 grados).

Compensación de inclinación basada en IMU RTK

Interpretación de los ángulos de giro e inclinación del bastón

Suponiendo que se conozca la longitud del bastón, el error de posición debido a la inclinación del bastón puede compensarse determinando con precisión los ángulos de giro (attitud) del bastón (Luo et al., 2018). La Fig. 8 muestra la interpretación de los ángulos de giro (attitud) de los bastones en el GS18 T, que consiste en la inclinación, la dirección de la inclinación y la orientación del sensor. La inclinación t es el ángulo entre el cenit local y el bastón. La dirección de inclinación λ describe la orientación angular de la proyección ortogonal del bastón en un plano horizontal con respecto al norte geográfico. El heading γ muestra la dirección a la que apunta el sensor y también se expresa en relación con el norte geográfico. Nótese que si el bastón es vertical el rumbo γ sigue bien definido, mientras que la dirección de inclinación λ no existe porque la proyección ortogonal del bastón sobre un plano horizontal es un único punto en este caso. Además de los componentes del giro (attitud), el software de campo Leica Captivate también proporciona las correspondientes estimaciones de calidad, junto con la incertidumbre general de la determinación del giro (attitud) en 3D.

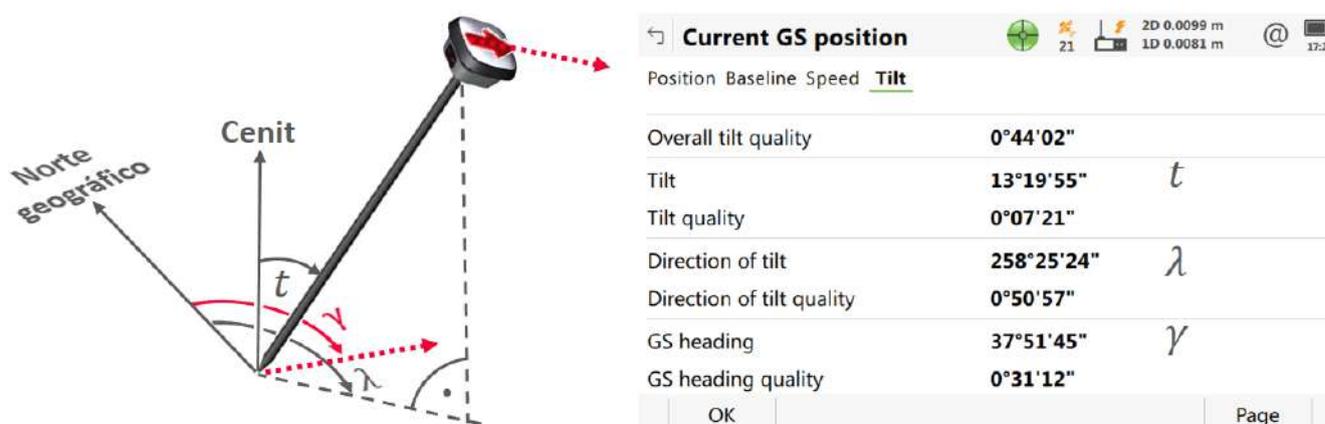


Figura 8 - Interpretación del ángulo de giro del bastón el Leica GS18 T mediante la inclinación t , la dirección de inclinación λ y la dirección del sensor γ .

Integración GNSS/INS

Aprovechando las características complementarias de las dos fuentes de navegación, los sistemas de navegación GNSS/INS integrados que han existido durante mucho tiempo en la industria aeroespacial están ahora disponibles en aplicaciones topográficas (Scherzinger, 2009; Dusha, 2017). En la Fig. 9 se ilustra esquemáticamente la integración GNSS/INS del Leica GS18 T. El MEMS IMU utiliza un acelerómetro de tres ejes y un giróscopo de tres ejes. Cada IMU es calibrada individualmente en fábrica por Leica Geosystems en todo el rango de temperatura de funcionamiento. Se proporcionan al INS mediciones precisas de la aceleración y la velocidad angular de la IMU, junto con estimaciones de la posición y la velocidad a tasas altas de muestreo

del GNSS. El algoritmo INS rota matemáticamente e integra las mediciones IMU para determinar los ángulos de giro del bastón y la medida de calidad asociada. Además, la fusión de sensores de GNSS e IMU permite una estimación en tiempo real de las desviaciones de los acelerómetros y giróscopos para minimizar la deriva temporal de la solución de los ángulos de giro. Basándose en la posición del GNSS, la disposición del INS y la longitud del bastón, el software de campo Leica Captivate calcula la posición compensada de la punta del bastón y la calidad de las coordenadas (CQ), incluidas las incertidumbres GNSS e INS. Además, la información del rumbo se utiliza para actualizar automáticamente la visualización 3D del entorno para ayudar al usuario a orientarse fácilmente en el entorno topográfico.

El GS18 T es autoinicializable y no requiere ningún procedimiento de calibración sobre el terreno. Los mecanismos internos de control de calidad permiten un inicio/parada automática de la compensación de inclinación si la incertidumbre de los ángulos de giro 3D estimados (véase "Calidad general de inclinación" en la Fig. 8) está por debajo o por encima de 2 grados. En condiciones normales con suficientes movimientos, la incertidumbre de los ángulos de giro de 2 grados

puede lograrse inicialmente en cuestión de segundos a través de movimientos del orden de un metro. Las comprobaciones de coherencia entre el GNSS y el INS se realizan constantemente para permitir un sistema robusto que pueda hacer frente a movimientos de bastón extremos, como los choques fuertes. Dado que en el cálculo de las posiciones compensadas por inclinación no intervienen mediciones con magnetómetros, GS18 T es inmune a las perturbaciones magnéticas.

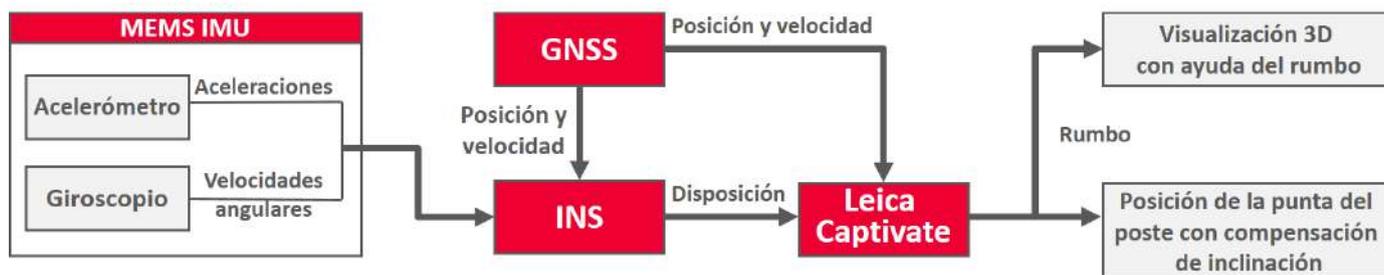


Figura 9 - Ilustración esquemática y simplificada de la integración GNSS/INS implementada en el Leica GS18 T.

Aspectos de precisión

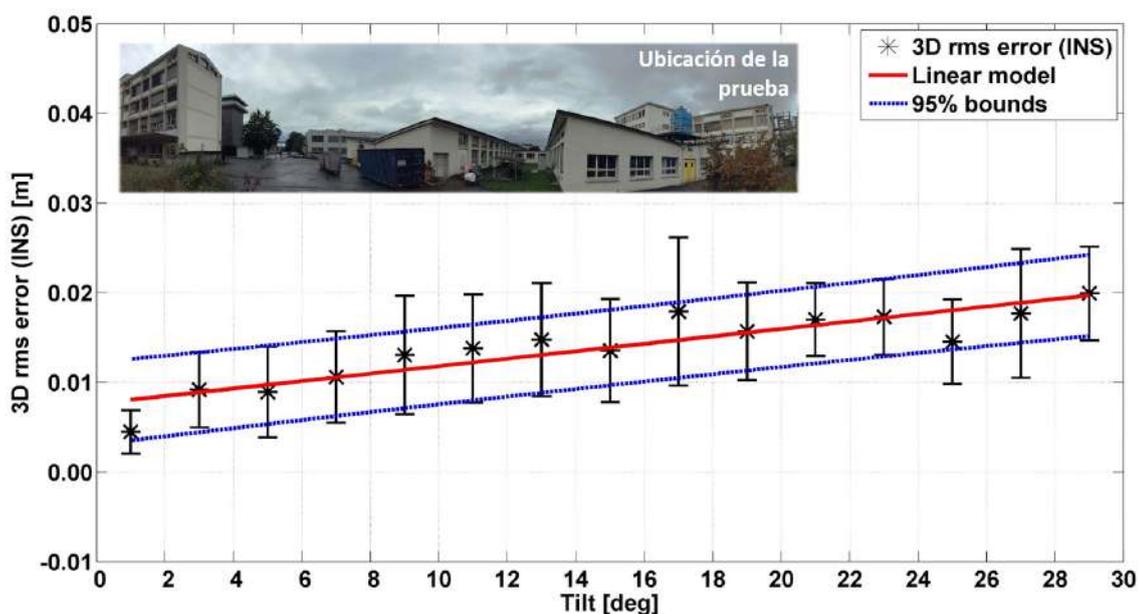


Figura 10 - Error medio cuadrático (rms) 3D de la posición de la punta del bastón debido al error de límite de inclinación del INS utilizando como referencia un sistema de medición basado en láser (longitud del bastón): 1.800 m, límite de inclinación: 2 grados).

Asumiendo que el bastón es un cuerpo rígido, el error compensado en la posición de la punta del bastón se atribuye principalmente al error de posición del GNSS y al error de los ángulos de giro del INS. Utilizando un sistema de medición basado en láser como referencia, se pueden analizar las contribuciones de las fuentes de error individuales del GS18 T al error general de la

posición de la punta del bastón. Basado en conjuntos de datos representativos que incluyen varias dinámicas de bastones, tales como estática, cinemática y detención y movimiento, la Fig. 10 muestra el error medio cuadrático (rms) 3D de la posición de la punta del bastón, el cual es causado puramente por el error de los ángulos de giro del INS a lo largo de una longitud de un bastón de

1.800 m. Se utiliza un límite de 2 grados para el ángulo de inclinación, en el cual las barras verticales indican la dispersión de muestras de error en 3D en el interior de los límites. Utilizando un modelo de regresión lineal, el error de posición 3D rms debido al error de los ángulos de giro aumenta de 8 mm a 2 cm a medida que la inclinación aumenta de 1 a 30 grados.

Dejando de lado las correlaciones entre el error de posición del GNSS y el error de los ángulos de giro del INS, la relación entre el error de posición de la punta del bastón y cada uno de los componentes de error del GNSS/INS puede expresarse de acuerdo con la ley de propagación del error, de la siguiente manera

$$\sigma_{PT} = \sqrt{\sigma_{GNSS}^2 + \sigma_{INS}^2}, \quad (1)$$

donde σ_{PT} denota el error de posición del bastón, σ_{GNSS} es el error de posición del GNSS, y σ_{INS} se refiere al error de posición inducido por el error de los ángulos de giro del INS por encima de la longitud del bastón. A medida que el ángulo de inclinación aumenta, σ_{GNSS} se hace más

grande debido a la degradación en el seguimiento de la señal (Fig. 4). Además, σ_{INS} crece, como se ilustra en la Fig. 10. Por lo tanto, el error de posición de la punta del bastón, σ_{PT} , aumenta con el aumento de la inclinación.

La Tabla 1 proporciona los componentes de error GNSS e INS del GS18 T a partir de dos pruebas de precisión independientes. Se puede ver que la inclinación se determina con precisión con un error medio de 0,2 grados. El error general de ángulos de giro 3D es inferior a 1,5 grados, y su contribución al error de posición de la punta del bastón, σ_{INS} , es inferior a 2 cm sobre una longitud de bastón de 1,800 m. Además, el error de posición de la punta del bastón se calcula utilizando la Ec. (1) es muy coherente con el valor de referencia en milímetros, lo que confirma las correlaciones insignificantes entre los componentes de error del GNSS y del SIN. Tenga en cuenta que el algoritmo actual de compensación de inclinación del GS18 T no tiene en cuenta los efectos de flexión de los bastones, que degradan la precisión de posicionamiento de forma más significativa a medida que aumenta la longitud de los bastones. Por lo tanto, se recomienda un bastón estable de fibra de carbono de 2 metros para lograr la precisión especificada.

	Número de posiciones	Error de inclinación [grados]	Error de actitud 3D [grados]	σ_{GNSS} [m]	σ_{INS} [m]	σ_{PT} [m]	σ_{PT} (Eq. (1)) [m]
Prueba 1	18986	0,15	1,014	0,018	0,011	0,022	0,021
Prueba 2	20499	0,21	1,498	0,024	0,017	0,026	0,029

Tabla 1 - Errores de actitud y posición del Leica GS18 T utilizando como referencia un sistema de medición basado en láser (longitud del bastón: 1,800 m, véase la Fig. 10 para el lugar de ensayo).

Análisis del rendimiento

MEDICIÓN ESTÁTICA VS. MEDICIÓN INSTANTÁNEA

En la medición RTK estática, un punto suele estar ocupado durante un corto período de tiempo, por ejemplo 5 s, en el que se recogen varias posiciones para obtener una solución de media ponderada. En la medición RTK convencional en la que es necesario nivelar el bastón, este enfoque tiene la ventaja de reducir el error humano que aparece cuando se intenta centrar la burbuja. En el caso de la compensación de inclinación, no es necesario nivelar el bastón, por lo que esta ventaja ya no existe. Además, una ocupación estática en tan poco tiempo no se beneficia de la decorrelación de la geometría del satélite, las condiciones atmosféricas y los efectos multipath. Según Hofmann-Wellenhof et al. (2008, p. 158), una altura de antena de 2 m conduce a un período aproximado de 16 minutos para el error multipath. Para realizar mediciones RTK lo más rápido posible, especialmente en levantamientos topográficos, el método instantáneo es más adecuado, en el que la coordenada para una etiqueta de tiempo de medición se interpola entre las

posiciones de las dos épocas vecinas para filtrar los efectos de los movimientos leves.

La Tabla 2 compara los errores rms de las mediciones estáticas e instantáneas compensadas de inclinación de un punto conocido usando el GS18 T en cielo abierto. Se consideraron diferentes tiempos de ocupación, como 5 s, 15 s y 30 s, que se utilizan comúnmente en las prácticas topográficas GNSS RTK. En las tres pruebas, los errores rms de las mediciones estáticas e instantáneas son comparables. El tiempo adicional pasado en la ocupación estática no conduce a una mejor precisión de posicionamiento, lo que indica a su vez una mayor productividad del método instantáneo. Tomando como ejemplo la Prueba 3 de la Tabla 2, la Fig. 11 compara los errores de posición 2D (horizontal), mostrando un rendimiento de precisión similar entre las mediciones estáticas e instantáneas de 30 segundos.

	Prueba 1: Ocupación estática 5 s			Prueba 2: Ocupación estática 15 s			Prueba 3: Ocupación estática 30 s		
	3D	2D	1D	3D	2D	1D	3D	2D	1D
Estático	0,013	0,011	0,005	0,014	0,013	0,007	0,014	0,013	0,005
Instantáneo	0,010	0,009	0,005	0,014	0,012	0,008	0,014	0,012	0,006

Tabla 2 - Comparación de los errores rms [m] de las mediciones estáticas e instantáneas compensadas por inclinación utilizando un Leica GS18 T (longitud del bastón: 1,800 m, a cielo abierto, 100 mediciones para cada prueba).

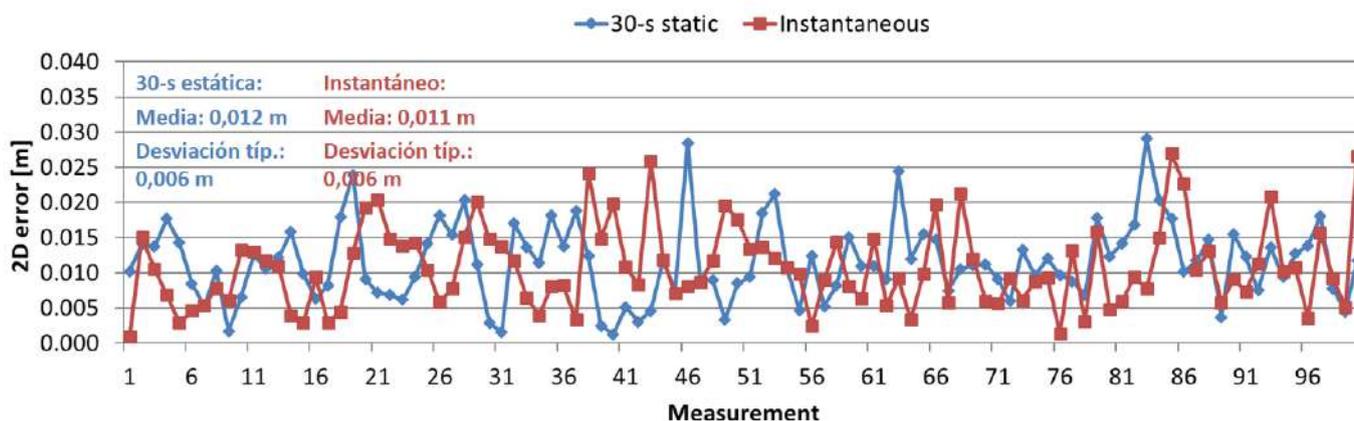


Figura 11 - Comparación de los errores de posición 2D de las mediciones estáticas e instantáneas compensadas de 30 segundos de inclinación utilizando un Leica GS18 T (longitud del bastón: 1,800 m, a cielo abierto; véase el ensayo 3 del cuadro 2).

RTK CONVENCIONAL VS. COMPENSACIÓN DE INCLINACIÓN RTK

Para demostrar las ventajas de utilizar la compensación de inclinación, el GS18 T se comparó con el Rover A en condiciones de cielo abierto y en condiciones de multipath fuertes. En la prueba a cielo abierto (Fig. 12), dos puntos conocidos P1 y P2 que están separados por 8 m fueron medidos alternativamente en el modo instantáneo durante 10 minutos. Con el Rover A, el bastón debe nivelarse con precisión antes de realizar una medición instantánea, lo que no es necesario para el GS18 T debido a la compensación de la inclinación. El número de puntos medidos en 10 minutos representa un indicador simple de productividad. En el cuadro 3 se resumen los resultados de la prueba a cielo abierto con respecto a la productividad y la precisión. Sin necesidad de nivelar el bastón, el GS18 T reduce significativamente el tiempo empleado en una medición y, por lo tanto, aumenta el número de puntos medidos en un 33%, de 57 a 76 en un período de 10 minutos. En el caso de la compensación de inclinación, a pesar del error adicional de la determinación de los ángulos de giro (attitud), el error rms 3D es solo 3 mm mayor en comparación con el Rover A y asciende a 2,4 cm, lo que es aceptable para la mayoría de los levantamientos topográficos.

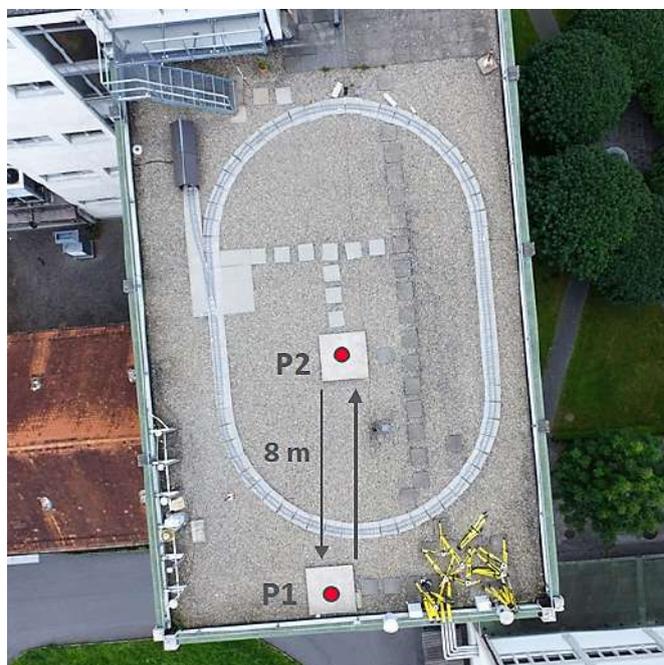


Figura 12 - Evaluación comparativa del rendimiento RTK a cielo abierto midiendo dos puntos alternativamente en el modo instantáneo durante 10 minutos (Rover A vs. GS18 T, longitud del bastón: 1,800 m).

En la prueba bajo fuertes condiciones de multipath (Fig. 13a), se eligió un punto conocido que se encuentra muy cerca de un edificio y que todavía puede medirse con el Rover A sujetando el poste verticalmente. Además, se seleccionó un edificio con fachadas metálicas para mostrar la inmunidad del GS18 T a las perturbaciones magnéticas. Se realizaron un total de 200 mediciones instantáneas bajo diferentes geometrías de satélite y la Tabla 4 resume los resultados en cuanto a disponibilidad, precisión y fiabilidad. Utilizando el GS18 T con compensación de inclinación, la disponibilidad de soluciones fijas RTK aumenta en un 15 por ciento en comparación con los RTK convencionales que utiliza el Rover A. La precisión de posicionamiento se ha mejorado significativamente, en promedio en un 50 por ciento. La fiabilidad da el porcentaje de que el error de posición es menos de tres veces mayor que el CQ, lo que aumenta ligeramente hasta en un 6 por ciento para los componentes horizontales. Estas mejoras con el GS18 T se atribuyen a 1) un seguimiento de la señal GNSS robusto y de alta sensibilidad en entornos difíciles, 2) una mayor distancia de la antena al edificio como resultado de un bastón de medición inclinado



Figura 13 - Prueba de posicionamiento RTK en un entorno multipath fuerte (longitud del bastón: 1,800 m) (a) Marca de medición cerca de un edificio con fachadas metálicas, (b) Medición RTK con compensación de inclinación con el Leica GS18 T.

(Fig. 13b), encontrando efectos multipath más débiles, y 3) una sofisticada integración GNSS/INS que permite una compensación precisa de la inclinación. Obsérvese que un entorno multipath tan fuerte se considera un caso extremo y va mucho más allá de las condiciones estándar relevantes para las especificaciones de precisión y fiabilidad. Además, los puntos a menos de 10 cm de un edificio no pueden medirse con el Rover A, ya que en este caso no es posible nivelar el bastón en el punto objetivo.

	Disposición del bastón	Número de puntos	3D [m]	2D [m]	1D [m]
Rover A	Vertical	57	0,021	0,014	0,016
GS18 T	Inclinado	76	0,024	0,021	0,012

Tabla 3 - Comparación del número de puntos medidos en un periodo de 10 minutos y los errores de rms resultantes entre el GS18 T y el Rover A (cielo abierto, longitud del bastón: 1,800 m, medición instantánea).

	Disposición del poste	RTK fijo/ Total	Disponibilidad [%]	Precisión (rms) [m]			Fiabilidad [%]		
				3D	2D	1D	3D	2D	1D
Rover A	Vertical	141/200	70,5	0,101	0,084	0,057	96,5	92,9	95,7
GS18 T	Inclinado	171/200	85,5	0,051	0,039	0,032	99,4	98,8	99,4

Tabla 4 - Comparación de la disponibilidad, precisión y fiabilidad de las posiciones fijas RTK entre el GS18 T y el Rover A en un entorno multipath fuerte (longitud del bastón: 1,800 m, medición instantánea).

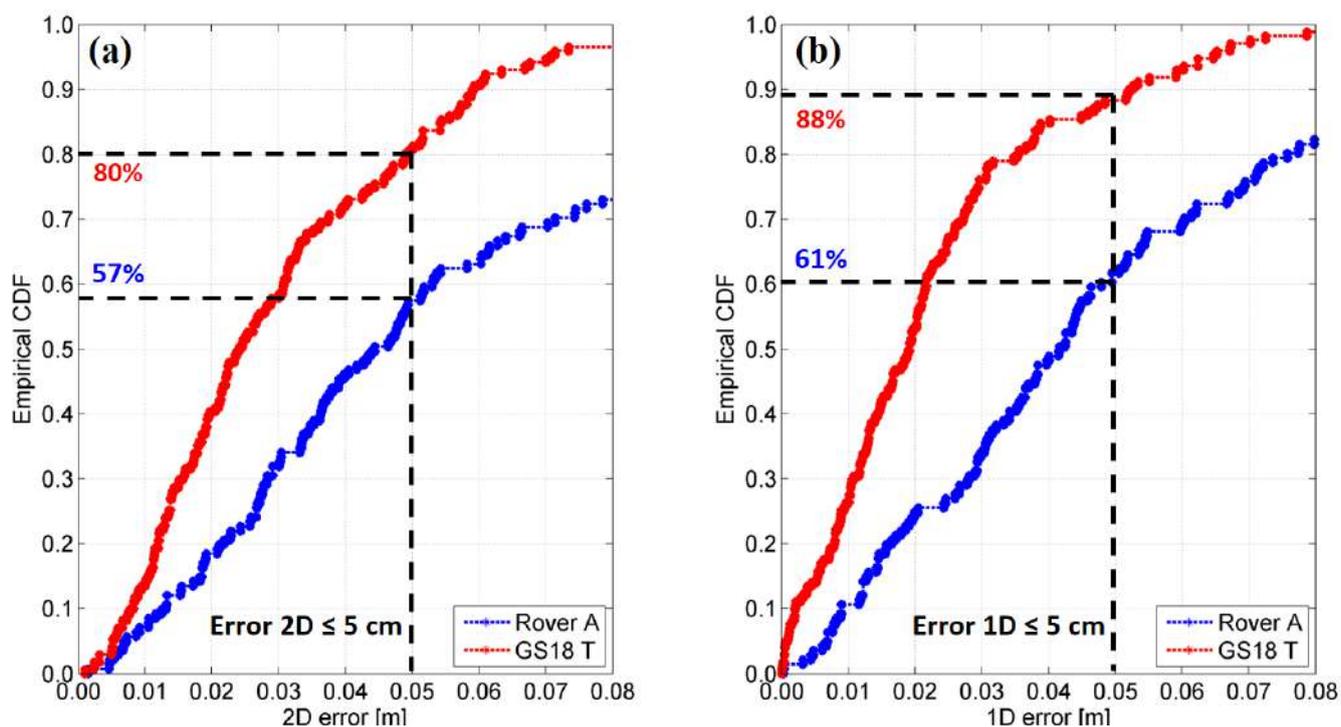


Figura 14 - Comparación de las distribuciones de error entre GS18 T y Rover A en un entorno multipath fuerte (longitud del bastón: 1,800 m, medición instantánea) (a) Error 2D CDF, (b) Error 1D CDF.

En términos de precisión, la Fig. 14 muestra las funciones de distribución acumulativa empírica (FCD) de los errores 2D y 1D de las posiciones fijas de RTK, donde los tamaños de la muestra son 141 y 171 para el Rover A y el GS18 T, respectivamente (Tabla 4). En comparación con el RTK convencional que utiliza el Rover A, la probabilidad de que el error 2D (1D) esté dentro de los 5 cm aumenta en un 23 por ciento (27 por ciento) cuando se aplica el RTK de compensación de inclinación con el GS18 T. Además, las mejoras en la altura parecen ser más significativas en comparación con los componentes horizontales.

ENFOQUE BASADO EN MAGNETÓMETRO VS. ENFOQUE BASADO EN IMU

Aparte de no necesitar calibraciones in situ, una de las principales ventajas de la compensación de inclinación basada en IMU frente al enfoque basado en magnetómetro es la inmunidad a las perturbaciones del campo magnético. Las perturbaciones magnéticas locales pueden ser causadas por automóviles, líneas eléctricas y edificios con acero estructural, que normalmente existen en entornos topográficos RTK. Para demostrar la robustez del GS18 T frente a las perturbaciones magnéticas, se realizaron mediciones estáticas 1-s de un

punto conocido en un aparcamiento. También se utilizó otra antena inteligente GNSS de grado topográfico, denominada Rover B, que permite una compensación de inclinación basada en magnetómetro de hasta 15 grados.

La Fig. 15 ilustra los errores 2D y CQ de 100 mediciones estáticas de RTK con el GS18 T y el Rover B. Al comparar los errores 2D de la Fig. 15a, el GS18 T proporciona mayor precisión y consistencia que el Rover B. Además, las estimaciones 2D CQ coinciden con los errores 2D, reflejando la precisión de posicionamiento de forma realista. Con respecto a los resultados del Rover B en la Fig. 15b, los valores de CQ 2D son significativamente mayores que los errores 2D si se detectan perturbaciones magnéticas, indicando soluciones no fiables compensadas por la inclinación. En este caso, el usuario necesita repetir la medición o cambiar al modo RTK convencional, lo que disminuye la productividad. Bajo ciertas circunstancias, por ejemplo, cuando se miden puntos en ángulos de inclinación más grandes, el usuario no sería notificado por un sistema basado en magnetómetro de que no se puede lograr la precisión visualizada. Si se observan los errores rms resumidos en la Tabla 5, la precisión 2D del GS18 T es aproximadamente 2 cm mejor que la del Rover B, mientras que la precisión 1D es similar.

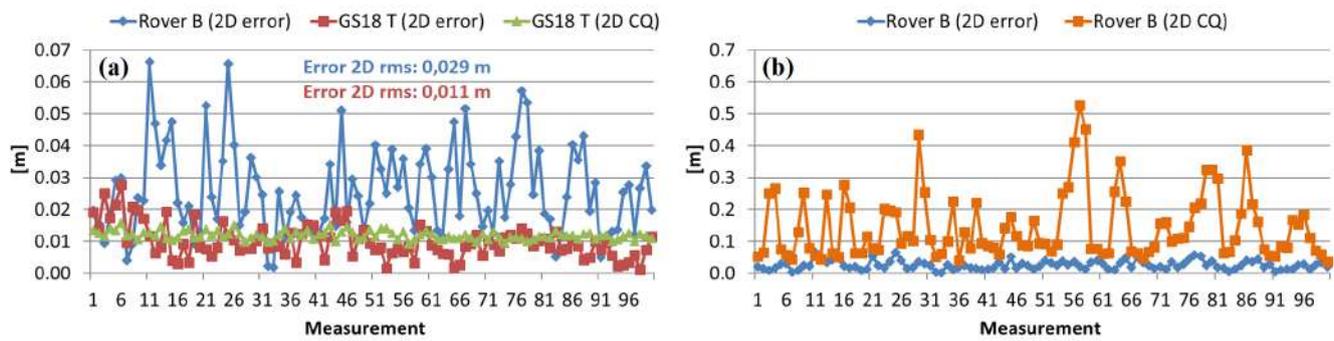


Figura 15 - Comparación de los errores de posición 2D y CQ entre GS18 T y Rover B bajo perturbaciones magnéticas (aparcamiento, longitud del bastón): 1,800 m, 1-s de medición estática).

	Compensación de inclinación	Número de mediciones	3D [m]	2D [m]	1D [m]
Rover B	Basado en magnetómetro	100	0,039	0,029	0,026
GS18 T	Basado en IMU	100	0,025	0,011	0,023

Tabla 5 - Comparación de los errores rms entre el GS18 T y el Rover B bajo perturbaciones magnéticas (aparcamiento, longitud del bastón: 1,800 m, 1-s de medición estática).

RENDIMIENTO CON GRANDES ÁNGULOS DE INCLINACIÓN
 Aplicando la compensación de inclinación basada en IMU del GS18 T, no hay límite al ángulo máximo de inclinación siempre que se rastree un número suficiente de satélites GNSS para poder proporcionar soluciones RTK de alta precisión. Por lo tanto, el GS18 T es aplicable a mediciones de puntos ocultos, por ejemplo, esquinas ocultas o puntos parcialmente bloqueados por coches aparcados. La Fig. 16a muestra un ejemplo, donde el punto de medición está obstruido por un coche y el bastón necesita estar muy inclinado para poder medir el punto. En la Fig. 16b se ilustran los errores 3D y CQ

de 100 mediciones instantáneas, junto con los ángulos de inclinación que oscilan entre 36 y 56 grados. El error rms 3D es de 1,6 cm, y para el 87 por ciento de las mediciones, el error 3D está por debajo del CQ 3D, lo que implica una alta fiabilidad incluso cuando el bastón está muy inclinado. Los errores 2D y 1D rms son de 1,3 cm y 9 mm, respectivamente. El alto rendimiento del GS18 T en el caso de uso con grandes inclinaciones se debe a 1) la mejora de las capacidades de seguimiento de ángulos de baja elevación, 2) el uso de mediciones IMU precisas en lugar de un magnetómetro, y 3) los robustos mecanismos de control de calidad en la integración GNSS/INS.

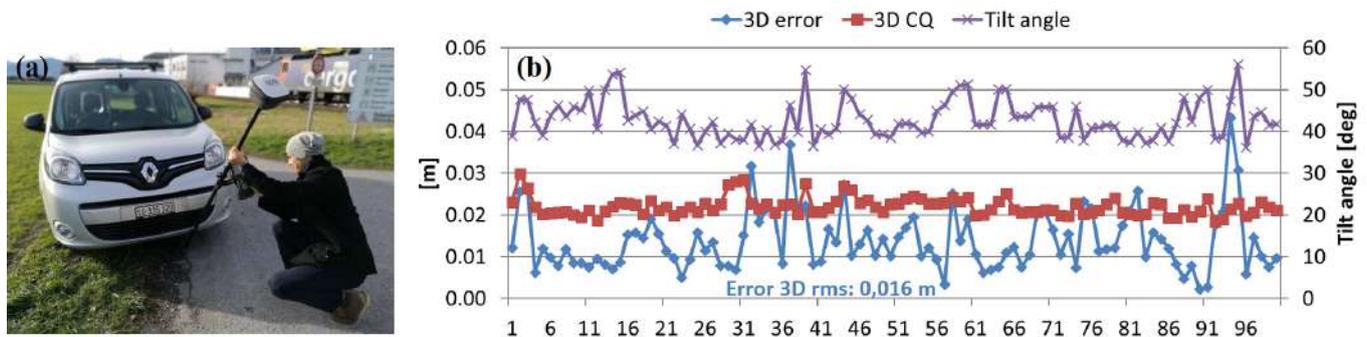


Figura 16 - Errores de posición 3D y CQ de mediciones instantáneas con grandes ángulos de inclinación entre 36 y 56 grados (Leica GS18 T, longitud del bastón: 1,800 m, cielo abierto).

Orientación añadida a la visualización 3D

Además de la inclinación y la dirección de la inclinación, la estimación de los ángulos de giro del INS también incluye el rumbo del sensor (Fig. 8). Esta información se utiliza para ayudar al usuario en el campo actualizando automáticamente la visualización 3D del entorno en función de la orientación del sensor. Tomando como ejemplo las mediciones de replanteo RTK, si cambia el rumbo del sensor, la vista de replanteo y las instrucciones de replanteo del software de campo Leica Captivate se actualizarán en consecuencia. La Fig. 17 muestra cómo la información de rumbo ayuda al marcar puntos con el GS18 T en la vista de navegación. Si el punto de replanteo está a más de 0,5 m, la vista muestra el entorno en la dirección de marcha y sigue al sensor desde arriba y desde atrás (Fig. 17a). La vista en 3D y las instrucciones de replanteo se actualizan automáticamente de acuerdo con la posición actual y el rumbo del sensor, que en este ejemplo cambia de oeste a sur y de nuevo a este (Fig. 17b-d). Al incorporar el heading (orientación) del sensor en la visualización 3D, el usuario puede orientarse fácilmente en el entorno topográfico y moverse rápidamente hacia los puntos objetivo, lo que mejora la experiencia del usuario y la productividad.

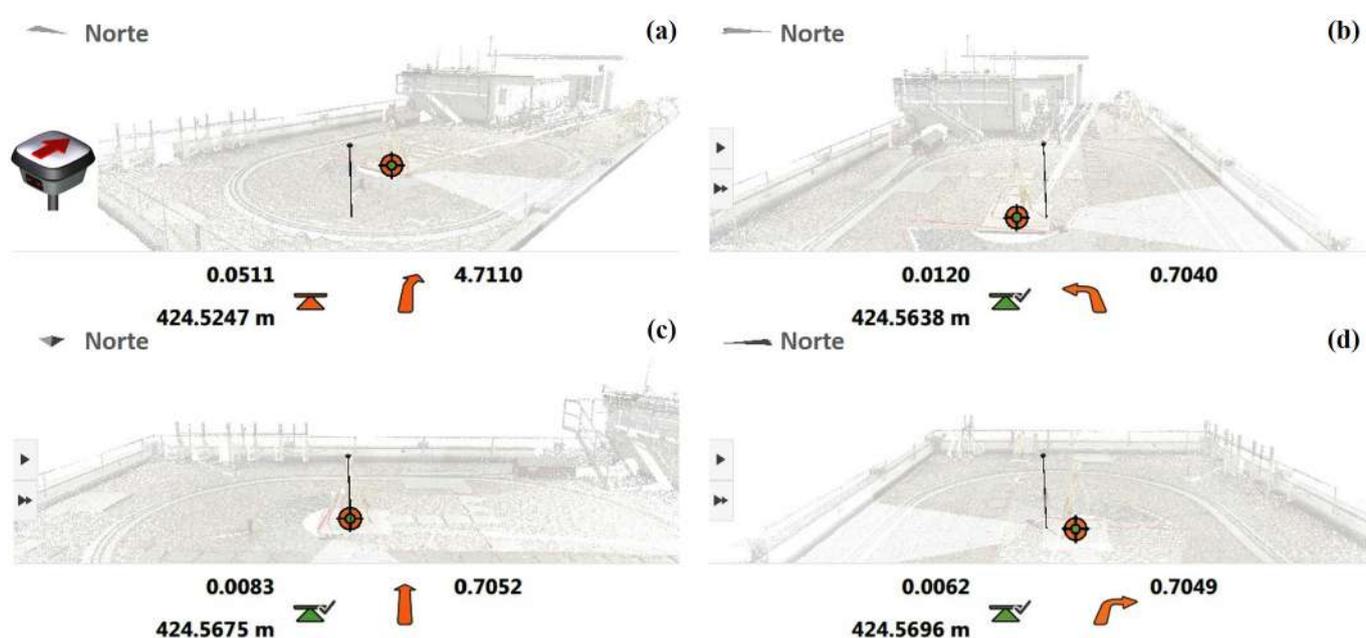


Figura 17 - Ejemplo de visualización 3D con ayuda del heading (orientación) en el replanteo de puntos con el Leica GS18 T (cielo abierto, longitud del bastón: 1,800 m).

(a) Vista de navegación, (b) Vista hacia el oeste, (c) Vista hacia el sur, (d) Vista hacia el este.

Trazabilidad de las mediciones compensadas por inclinación

Utilizando el GS18 T para tomar mediciones RTK con compensación de inclinación, los ángulos de giro (attitud) del bastón y la incertidumbre asociada se almacenan en el registro de puntos, lo que permite una trazabilidad completa y un informe de calidad completo. La información de los ángulos de giro se puede exportar directamente desde Leica Captivate, por ejemplo, mediante una hoja de estilos. Al importar trabajos de campo del GS18 T en el software de oficina Leica Infinity 2.4 (Hanson, 2017, p. 5), los puntos medidos con compensación de inclinación muestran los componentes de los ángulos de giro, incluyendo la inclinación, la inclinación máxima, la dirección de la inclinación y el

rumbo del sensor (Fig. 18). Para mediciones estáticas, la "inclinación" es la última inclinación medida antes de almacenar el punto, mientras que la "inclinación máxima" es la inclinación máxima alcanzada durante la ocupación. Para mediciones instantáneas, los valores de inclinación e inclinación máxima son idénticos. Dentro de Infinity, es posible modificar la longitud del bastón en caso de una entrada incorrecta desde el campo, donde la última disposición medida se utiliza para recalcular la posición de la punta del bastón. De esta manera, todavía se pueden obtener las coordenadas correctas, con una trazabilidad total de los componentes que influye en la calidad de las soluciones RTK compensadas por inclinación.

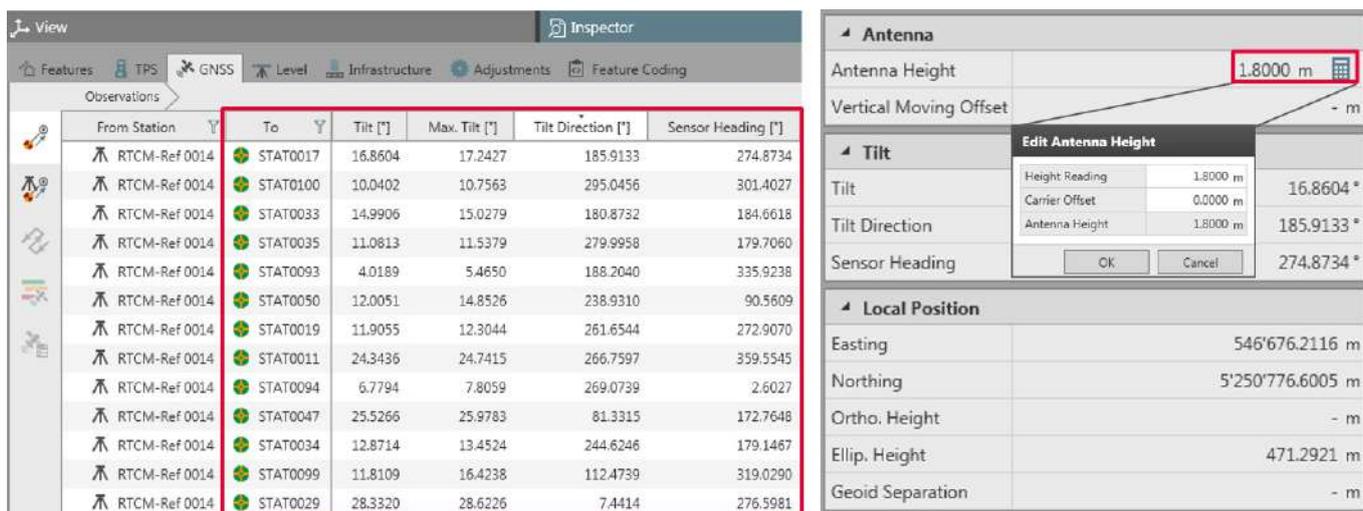


Figura 18 - Presentación de la información de los ángulos de giro (attitud) del Leica GS18 T en el software de oficina Leica Infinity 2.4 con la posibilidad de modificar la longitud del bastón.

Conclusiones

En este artículo se presentó la nueva antena inteligente Leica GS18 T, que utiliza un enfoque de compensación de inclinación basado en IMU para mejorar la productividad y la experiencia del usuario en el posicionamiento RTK de alta precisión. En comparación con los sistemas de compensación de inclinación basados en magnetómetros, la GS18 T tiene las principales ventajas de no necesitar calibraciones in situ, ser inmune a las perturbaciones magnéticas y ser aplicable en grandes ángulos de inclinación. Los resultados representativos de las pruebas y los estudios de referencia mostraron que el uso de la compensación de inclinación de la GS18 T aumenta significativamente la productividad y mejora el rendimiento de posicionamiento del RTK en entornos difíciles. Estos beneficios se logran mediante la aplicación de tecnologías innovadoras en el seguimiento de señales de satélite y la integración GNSS/INS. Las principales características y ventajas de la GS18 T se resumen a continuación:

- Utilizando la compensación de inclinación, la medición instantánea proporciona un nivel de precisión similar al de la medición RTK estática, junto con un efecto favorable de ahorro de tiempo.
- En comparación con el RTK convencional con bastón vertical, el RTK con compensación de inclinación

aumenta significativamente la productividad hasta en un 33% y mejora considerablemente el rendimiento de posicionamiento cerca del edificio en cuanto a disponibilidad y precisión.

- En un estacionamiento con perturbaciones magnéticas, la compensación de inclinación basada en IMU produce posiciones más precisas y un CQ más realista que el enfoque basado en magnetómetro.
- El RTK con compensación de inclinación basado en IMU es aplicable a grandes ángulos de inclinación de más de 30 grados, donde todavía se puede conseguir una precisión de posicionamiento 3D de 2 cm.
- Al incorporar el rumbo del sensor en la visualización 3D del entorno, el usuario puede orientarse fácilmente en el entorno topográfico, lo que mejora la productividad y la experiencia del usuario.
- La información de ángulos de giro (attitud) de las mediciones RTK compensadas por inclinación es totalmente trazable, lo que permite garantizar la calidad para los propios usuarios y sus clientes.

Con el Leica GS18 T, el rover GNSS RTK más rápido del mundo, Leica Geosystems establece nuevos estándares para un posicionamiento preciso mediante técnicas de fusión de sensores fáciles de usar.

Referencias

- Caizzone, S., Circiu, M.-S., Elmarissi, W., Enneking, C., Felux, M., Yinusa, K.-A. (2018) Antenna pattern uniformity – Effects on pseudorange tracking error. *GPS World*, 29(2):18–32.
- Crassidis, J. L., Markley, F. L. (2003) Unscented filtering for spacecraft attitude estimation. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 26(4):536–542.
- Dusha, D. (2017) Surveying system and method. US Patent US9541392B2.
- Groves, P. D. (2013) Principles of GNSS, Inertial, and Multi-Sensor Integrated Navigation Systems (2ª ed.). Artech House, Boston London, 800 pp.
- Hanson, K. (2017) Leica Geosystems Release Notes – Leica Infinity 2.4. Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Switzerland, November 30, 2017, 12 pp.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Wasle, E. (2008) GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo & more. Springer-Verlag, Wien, 516 pp.
- Hong, S., Lee, M. H., Chun, H.-H., Kwon, S.-H., Speyer, J. L. (2005) Observability of error states in GPS/INS integration. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 54(2):731–743.
- Jekeli, C. (2001) Inertial Navigation Systems with Geodetic Applications. Walter de Gruyter, Berlin New York, 352 pp.
- Kurtovic, Z., Pagan, R. (2009) A multi mode active surveying pole. European Patent EP2040029A1.
- Luo, X. (2013) GPS Stochastic Modelling – Signal Quality Measures and ARMA Processes. Springer Theses, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 331 pp.
- Luo, X., Chen, J., Richter, B. (2017) How Galileo benefits high-precision RTK – What to expect with the current constellation. *GPS World*, 28(8):22–28.
- Luo, X., Schaufler, S., Carrera, M., Celebi, I. (2018) High-precision RTK positioning with calibration-free tilt compensation. In: Proceedings of FIG Congress 2018, Istanbul, Turkey, May 6–11, 2018, 17 pp.
- Nichols, M. E., Talbot, N. C. (1996) Pole-tilt sensor for surveyor range pole. US Patent US5512905A.
- Pedley, M. (2012) eCompass: Build and calibrate a tilt-compensating electronic compass. *Circuit Cellar*, 265:1–6.
- Scherzinger, B. M. (2009) AINS enhanced survey instrument, US Patent US2009024325A1.
- Schmitz, M., Wübbena, G., Boettcher, G. (2002) Tests of phase center variations of various GPS antennas, and some results. *GPS Solutions*, 6(1–2):18–27.
- Steigenberger, P., Thielert, S., Hauschild, A., Montenbruck, O., Langley, R. B. (2018) Constellation completed: QZS-3 and QZS-4 join the Quasi-Zenith Satellite System. *GPS World*, 29(2):43–48.
- Titterton, D., Weston, J. L. (2004) Strapdown Inertial Navigation Technology (2nd ed.). IEE Radar, Sonar, Navigation, and Avionics Series, No. 17, Institution of Engineering and Technology, Stevenage Herts, 558 pp.
- Yang, C. (2017) Directions 2018: BeiDou builds, diversifies, expands. *GPS World*, 28(12):16–27.
- Yang, N., Freestone, J. (2016) High-performance GNSS antennas with phase-reversal quadrature feeding network and parasitic circular array. In: Proceedings of ION GNSS+ 2016, Portland, OR, September 12–16, 2016, pp. 364–372.
- Yang, N., Freestone, J. (2017) Patch antenna with peripheral parasitic monopole circular arrays. US Patent US20170047665A1.
- Yang, N., Gilbertson, C. (2016) Wide and low-loss quadrature phase quad-feeding network for high-performance GNSS antenna. US Patent US9343796B2.

Biografías

Xiaoguang Luo se doctoró en geodesia y geoinformática en 2012 en el Instituto de Tecnología de Karlsruhe, Alemania. En septiembre de 2013 se incorporó a Leica Geosystems como ingeniero de aplicaciones GNSS del grupo de gestión de productos GNSS.

Stefan Schaufler se graduó en geodesia e ingeniería geomática en 2016 en la Universidad Técnica de Viena, Austria. Desde septiembre de 2017 es ingeniero de productos GNSS en el grupo de gestión de productos GNSS de Leica Geosystems.

Bernhard Richter obtuvo una máster en geodesia de la Universidad Técnica de Viena en 1999 y un máster en Administración de Empresas de la Universidad de Gloucestershire en 2005. Desde el año 2000 trabaja para Leica Geosystems en Suiza. Desde 2006, es Director Comercial de GNSS y dirige el grupo de gestión de productos GNSS.

Leica Geosystems – when it has to be right

Leica Geosystems es la empresa líder en el sector de las tecnologías de medición e información y, como tal, lleva revolucionando el mundo de la medición y de la topografía desde hace casi 200 años. Creamos soluciones completas para profesionales de todo el mundo. Leica Geosystems es una empresa reconocida por sus productos innovadores y el desarrollo de soluciones y los profesionales de una amplia variedad de sectores, como la topografía y la ingeniería, la seguridad y la vigilancia y la construcción y la energía, confían en ella para satisfacer todas sus necesidades geoespaciales. Gracias a sus precisos instrumentos, a sus sofisticados softwares y sus servicios fiables, Leica Geosystems realiza a diario una valiosa contribución al trabajo de todos aquellos que están dando forma al futuro del mundo.

Leica Geosystems es parte de Hexagon (Nasdaq Stockholm: HEXA B; hexagon.com), un proveedor global líder en soluciones tecnológicas de la información, que incrementan la productividad y la calidad en los sectores geoespaciales e industriales.



Copyright Leica Geosystems AG, 9435 Heerbrugg, Switzerland. Todos los derechos reservados. Impreso en Suiza – 2018. Leica Geosystems es parte de Hexagon. 887333 es – 12.18

Leica Geosystems AG
Heinrich-Wild-Strasse
9435 Heerbrugg, Suiza
+41 71 727 31 31

- when it has to be **right**

Leica
Geosystems