

SISTEMA DE NAVEGACIÓN INTEGRADO (INS/GPS) APLICADO A UN SAR AEROTRANSPORTADO

J. I. Giribet^{c,b}, M. España^{a,b} y J. Péres^a

^a Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE)

Paseo Colón 751 – CP1063 Ciudad Autónoma de Bs. As. - Argentina.

^b Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires (FI-UBA)

Paseo Colón 850 – CP1063 Ciudad Autónoma de Bs. As. - Argentina.

^c Instituto Argentino de Matemática - CONICET

Saavedra 15 – CP1083 Ciudad Autónoma de Bs. As. - Argentina.

Email: jgiribet@fi.uba.ar

RESUMEN

Se presenta un sistema de navegación integrada que fusiona datos inerciales y de GPS desarrollado por el CONAE para su SAR aerotransportado (SARAT). Se evalúa su potencial para compensar el movimiento del avión que lo transporta usando imágenes captadas por el propio sistema SAR. Se justifican líneas futuras de investigación y desarrollo tendientes a integrar el sistema de navegación con el procesamiento de los datos crudos provistos por el SAR.

Palabras clave: navegación INS/GPS, compensación de movimiento, radar de apertura sintética.

INTRODUCCIÓN

Las imágenes georreferenciadas (aéreas y satelitales) tienen un número creciente de aplicaciones exitosas en nuestro país a la gestión de emergencias, la supervisión de costas, la minería, los rendimientos agrícolas y superficies cultivadas y la meteorología o la hidrología, entre otras. Las imágenes aéreas complementan a las adquiridas con satelitales vista su mayor disponibilidad y oportunidad de adquisición. Así mismo es más simple obtener imágenes de alta resolución desde la altura de un avión que desde una plataforma espacial. Mediante el uso de un sistema de navegación asociado al sensor remoto, es posible lograr la georreferenciación directa de las imágenes sin las limitaciones o los costos asociados que acarrear otros procedimientos, como aquellos que requieren la instalación de puntos de control terrestres para calibrar los parámetros externos del sensor. Más aún, en aplicaciones como los radares aerotransportados de apertura sintética (SAR), un sistema de navegación se torna necesario dado que la decodificación de la señal y correspondiente enfoque de la imagen captada dependen fuertemente del conocimiento de la orientación de la antena, de la posición y de la velocidad del avión durante la emisión y recepción de los pulsos de radar.

La CONAE desarrolla actualmente un sistema SAR para su serie de satélites SAOCOM. Una primera versión del mismo realiza actualmente servicios operativos de adquisición de imágenes a bordo de un Beechcraft B-200 de la Armada Argentina (ver Figura 1). El sistema SARAT dispone de un sistema de navegación, también desarrollado por la CONAE, que fusiona datos de una unidad de mediciones inerciales (UMI) y de un receptor GPS. En este trabajo se describe dicho sistema de navegación, se compara su performance con los provistos por un sistema comercial de la firma iMAR y se evalúa el efecto que sobre la calidad de las imágenes SAR tienen ambos sistemas de navegación.

El artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se realiza una breve introducción a la navegación integrada, en particular a los sistemas que fusionan mediciones inerciales con datos de pseudorange y delta-pseudorange provistos por un receptor de GPS. En la sección 3 se describe el hardware y la arquitectura del sistema de navegación construido por la CONAE. En la sección 4 se presentan resultados sobre la performance del sistema de navegación; para esto se comparan los datos de posición, velocidad y orientación obtenidos con el sistema de navegación de la CONAE y con el sistema comercial. Además, se analizan imágenes SAR procesadas con la información provista por

ambos sistemas. Por último, en la sección 5 se presentan conclusiones sobre el trabajo y se discuten perspectivas y posibles líneas futuras de investigación y desarrollo en el tema.



Figura 0 Beechcraft B-200 de la FAA que transporta el SAR de la CONAE.

SISTEMAS DE NAVEGACIÓN INTEGRADA

Un navegador inercial (INS), constituido por la unidad de mediciones inerciales (UMI) y el algoritmo de integración numérica de las ecuaciones cinemáticas, puede proveer estimaciones de posición, velocidad y orientación a una tasa de muestreo sólo limitada por la velocidad de muestreo adoptada, lo cual resulta de gran interés en aplicaciones en las cuales es necesario disponer de información de posición, velocidad y/o actitud en forma instantánea. Sin embargo, los errores de medición de la UMI y de las condiciones iniciales del vuelo, así como las aproximaciones de la integración numérica, se traducen en errores que crecen indefinidamente con el tiempo. Esto exige utilizar instrumentos inerciales (giróscopos y acelerómetros) de alta calidad junto con complejos métodos de alineación inicial del vehículo. Como es esperable, una mejora en la calidad de los instrumentos inerciales acarrea importantes incrementos en los costos del sistema de navegación. A esto se le suman las restricciones existentes para la comercialización de estos instrumentos, debido a las limitaciones internacionales en la transferencia de esta tecnología.

Una alternativa viable para acotar y aún reducir los errores del INS, es utilizar instrumentos externos suplementarios que adquieren mediciones en instantes discretos de tiempo. Así es posible combinar alta frecuencia de datos de navegación con buena precisión. Una fuente usual de información externa es el sistema GPS. Mediante un filtro de fusión de datos es posible integrar los datos inerciales de la UMI con la información provista por el receptor GPS y utilizar esta información para mejorar la precisión del sistema de navegación global. A estos sistemas, que fusionan datos de diversos instrumentos de navegación, se los conoce como sistemas de navegación integrada.

En la figura 2 se presenta un esquema del sistema de navegación integrada utilizado para este proyecto. Para determinar la posición, velocidad y actitud de un vehículo a partir de mediciones inerciales (acelerómetros y giróscopos), es necesario integrar, en tiempo real, las ecuaciones diferenciales de la cinemática que vinculan estas variables [1]. El algoritmo encargado de resolver esta tarea es el *algoritmo de navegación inercial*, el cual recibe como entrada la velocidad angular (ω) y la fuerza específica (f) y devuelve como salida las *variables de navegación* (posición, velocidad y orientación) del vehículo.

Adicionalmente, el sistema recibe información provista por un receptor de GPS (pseudo rango: ρ y delta pseudo rango: $\Delta\rho$). Esta información es utilizada para estimar el error en el cálculo de las variables de navegación cometido por el INS y los parámetros que caracterizan a los instrumentos inerciales. La tasa de muestreo a la cual se recibe esta información es aproximadamente 1Hz, sensiblemente menor que la tasa de datos que proporcionan los instrumentos inerciales del INS.

Para poder comparar la información del GPS (ρ y $\Delta\rho$) con la información del INS, se recurre a un *modelo de los sensores externos*, que permite calcular el pseudo rango (ρ_1) y delta pseudo rango ($\Delta\rho_1$), correspondientes a la posición y velocidad calculadas por el INS.

Un Filtro de Kalman Extendido, recibe el resultado de esta comparación ($Y=[\rho-\rho_1; \Delta\rho-\Delta\rho_1]$) y estima el error en el cálculo de las variables de navegación. Mediante un modelo estadístico de los errores de los instrumentos inerciales y del GPS, el EKF estima además los errores de los instrumentos (sesgo, factor de escala, falta de ortogonalidad en los ejes de la UMI, drift del reloj de GPS, etc.). Estas estimaciones son utilizadas para corregir el cálculo de las variables de navegación y compensar las mediciones del GPS y de los instrumentos inerciales, lo que permite reducir el error de cálculo del INS, aún en los intervalos de tiempo en los que no se cuenta con información de GPS.

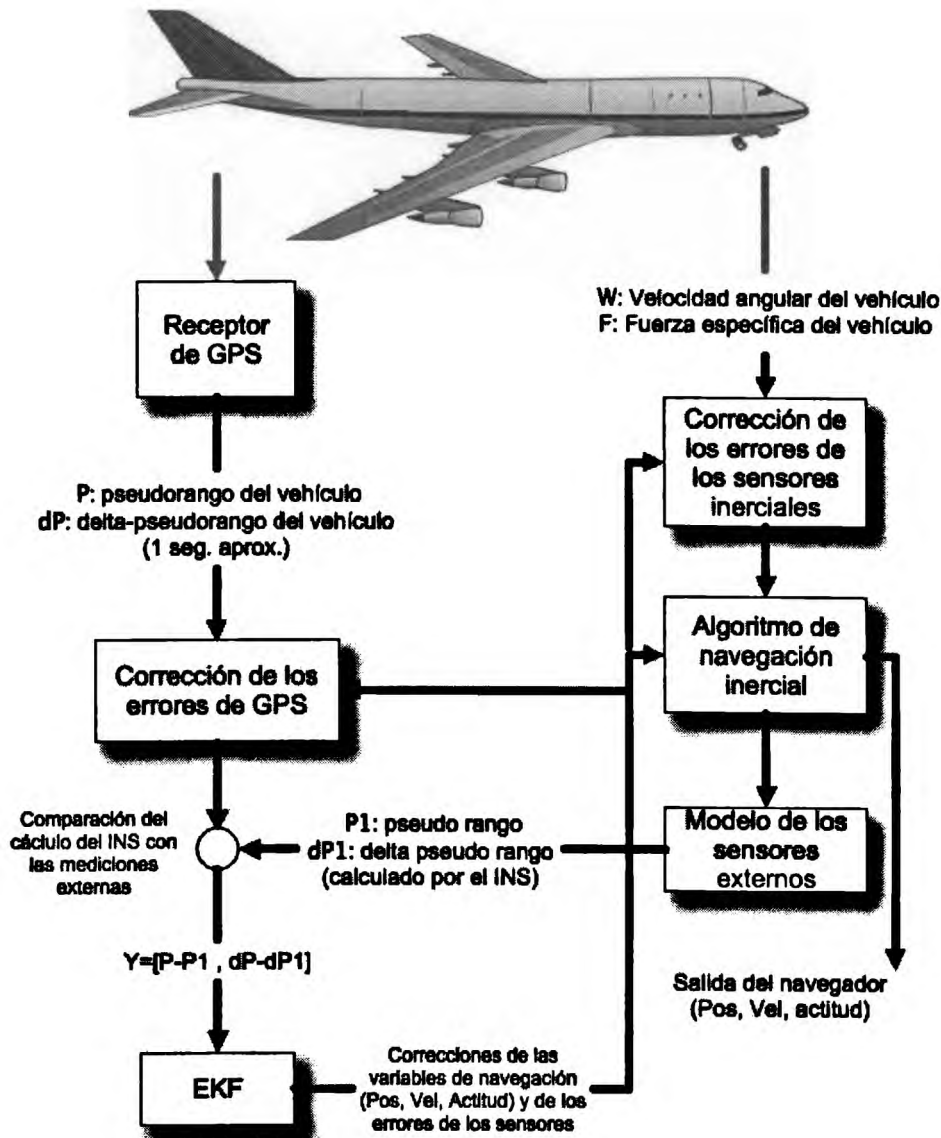


Figura 2 Esquema del navegador integrado INS/GPS.

ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE NAVEGACIÓN INTEGRADA DEL SARAT

A partir del año 2005, la CONAE con el apoyo de la Facultad de Ingeniería de la UBA inició el desarrollo de un sistema de navegación integrada INS/GPS para su sistema SARAT. A comienzos del año 2006, dicho sistema comenzó a ser utilizado a bordo del Beechcraft 200 arrojando los primeros

datos en vuelo. El sistema, operativo en la actualidad pero en una versión experimental o modelo de laboratorio, demostró ser de gran utilidad para procesar las imágenes adquiridas por el SAR. A continuación se detallan sus características salientes.

El sistema está compuesto por dos módulos interconectados, el módulo de los sensores (MS) (Fig. 3) y el módulo de procesamiento (MP) (Fig. 4). El MS está conformado por una UMI Systron Donner/Motion Pack (Fig. 3 (1)), un magnetómetro/inclinómetro vectorial True North Rev. 2X (Fig. 3 (2)) y un regulador de temperatura (Fig. 3 (3)). El MP está conformado por una computadora de navegación Matrox 4-sight/PC-104 Industrial (Fig. 4 (1)), un receptor de GPS de la firma Globalsat con chipset SIRC-II (Fig. 4 (5)), el módulo de alimentación (Fig. 4 (6)) y los filtros anti-aliasing y de adaptación de las señales de la UMI (Fig. 4 (7)) construidos en la CONAE.

Para asegurar el sincronismo de los datos adquiridos y permitir la navegación en tiempo real, se utiliza un sistema operativo de tiempo real basado en el sistema operativo Linux. Varios desarrollos de software posteriores a la aparición de Linux agregaron a este sistema operativo la capacidad de manejar correctamente el tiempo y prioridades en las tareas en ejecución requeridas por un sistema de tiempo real consiguiendo niveles muy adecuados de desempeño consistentes con el estándar POSIX. Entre estos desarrollos se destacan el RT-Linux [7,9] pionero de esta tecnología, el RTAI [3] y el XENOMAI [2]. Las variantes mencionadas, comparten como concepto la inclusión de una capa de programación entre el kernel de Linux y el hardware, proveyendo una interfase de programación que cumple con el estándar POSIX.4a para la programación de las tareas de tiempo real [8]. El kernel de Linux con toda su funcionalidad permanece corriendo como una tarea más del sistema con la prioridad más baja.

Transmisión de datos y sincronización de los instrumentos:

El magnetómetro/inclinómetro mide el vector campo geomagnético local y el ángulo de inclinación respecto del plano local y envía las muestras a la PC por un puerto serie RS-232 a una tasa de 10 muestras/seg. La computadora recibe las muestras, comprueba su integridad y las almacena en disco etiquetadas con el tiempo del RTLinux. También a través de un puerto RS232, el receptor de GPS transmite cada segundo el mensaje de navegación junto con la señal del pulso por segundo (PPS) cuyo flanco ascendente coincide con el inicio del segundo GPS. Del mensaje se extraen: la efemérides de la constelación, el pseudo rango y el delta pseudo rango a cada satélite visible y el número del segundo asociado al siguiente PPS. Este número lo recibe el módulo de tiempo real que maneja el sincronismo mediante una FIFO de tiempo real.

El PPS interrumpe al RTLinux para ejecutar la función encargada de leer el tiempo RTLinux y almacenarlo en disco junto con el valor del segundo GPS previamente almacenado en la FIFO. Este proceso permite la sincronización de los datos de los distintos instrumentos.

La UMI envía 7 señales analógicas (1 temperatura, 3 aceleraciones y 3 velocidades angulares) que son filtradas (anti-aliasing) y muestreadas a 2Ks/s con una placa adquisidora (Diamond 16bits, 100Ks/s). Con cada dato disponible la placa envía una interrupción al RTLinux que almacena los datos indexados con su correspondiente tiempo. Los datos de aceleración y velocidad angular son integrados numéricamente a intervalos de 10ms (100Hz) y entregados al algoritmo de navegación integrada INS/GPS [4]. Las condiciones iniciales del INS se obtienen del GPS (posición y velocidad) y del magnetómetro (azimut e inclinación). Hasta el momento el magnetómetro sólo se utiliza para la alineación inicial, sin embargo, dado que sus medidas están disponibles todo el tiempo, podría utilizarse esta información durante el vuelo. Esto redundará en una mejor estimación del *heading*, principalmente durante las fases de adquisición de imágenes en las cuales el vuelo es recto y nivelado [6].

DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE NAVEGACIÓN

Esta sección tiene por propósitos, demostrar la influencia de los datos de navegación sobre el procesamiento de las imágenes SAR y evaluar el desempeño del sistema de navegación construido por la CONAE.



Figura 3 Módulo de sensores del sistema de navegación integrado del SARAT

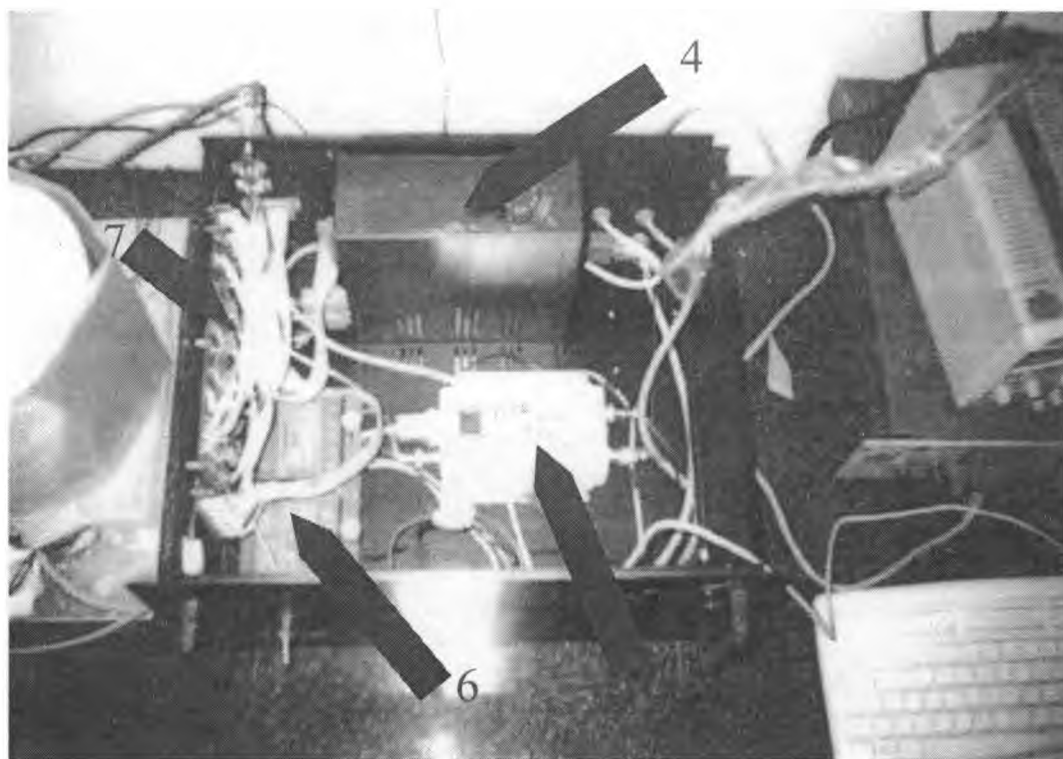


Figura 4 Módulo de procesamiento del sistema de navegación integrado del SARAT.

Para evaluar el desempeño del sistema de navegación se comparan sus resultados de navegación con los provistos por un sistema de navegación comercial (basado en la IMU iNAV-FJI-0025-AIRSURV integrado con un GPS de la firma NovAtel) de la firma iMAR con características de precisión conocidas [5]. Si bien se presentan los resultados correspondientes a un sólo vuelo, han sido procesados tres vuelos diferentes, arrojando resultados similares. Una objeción que se podría hacer a la comparación que aquí se presenta, es que se desconoce la desalineación relativa entre ambos sistemas de navegación. Sin embargo, es posible estimar la incidencia de esta desalineación teniendo en cuenta que es constante durante el vuelo. Para esto, se tomaron distintos tramos de la trayectoria del avión en vuelo nivelado estable y se estimó en cada tramo la desalineación entre ambos sistemas de navegación, usando un método de mínimos cuadrados. Se comprobó así que el desalineamiento no variaba con el vuelo. El resultado se usó para alinear los datos del sistema de navegación de la CONAE con los provistos por el sistema de navegación de referencia. Si bien no es posible asegurar que el sesgo se deba sólo a una desalineación mecánica entre ambos sistemas, se observó una disminución en la diferencia entre los valores calculados por ambos sistemas. Claro que, si el sistema de navegación de la CONAE presenta un sesgo debido a otro factor que no sea la desalineación mecánica, y éste se mantiene constante de un vuelo a otro, con el método empleado no es posible distinguir entre este sesgo y una desalineación mecánica.

En la Tabla 1 se comparan el desempeño del sistema de navegación de la CONAE con el del iMAR de referencia. La columna iMAR contiene los errores que figuran en la hoja de especificaciones especificaciones [5] de este instrumento, performance que hasta el presente no ha podido ser validada ya que para esto se requeriría otro sistema de navegación de mayor precisión. La columna CONAE contiene la diferencia entre la información provista por el sistema de navegación de la CONAE y las especificaciones del sistema de referencia. La columna CONAE (sin sesgo) contiene la misma información que la columna CONAE, pero eliminando el sesgo de alineación entre ambos sistemas de navegación. Se destaca que los resultados obtenidos se condicen con los resultados teóricos previstos en [1]. Como puede verse en la Tabla 1, la mayor incertidumbre en la orientación del avión corresponde al *rumbo*; una de las mejoras que se tiene planeado realizar en el sistema de navegación del SARAT, es precisamente introducir información de rumbo con una brújula GPS. Esto permitiría mejorar el desempeño en el cálculo de la orientación del avión, en particular el parámetro mencionado que es el más comprometido y el que más incidencia tiene en la focalización numérica de la imagen.

Tabla 1. Cuadro comparativo del desempeño del sistema de navegación de la CONAE.

Comparación de errores	iMAR	CONAE	CONAE (sin sesgo)
Roll	0.01deg	0.04deg	0.04deg
Pitch	0.01deg	0.06deg	0.06deg
Heading	0.04deg	0.16deg	0.1deg
Posición (lat., long.)	<1m	4m	4m
Altura	<1m	6m	6m
Velocidad	0.01m/s	0.03m/s	0.03m/s

Procesamiento de imágenes SAR

El propósito de esta sección es demostrar cómo se mejora la calidad de las imágenes SAR cuando, para su procesamiento, se utiliza información provista por un sistema de navegación. Por otro lado, si bien los resultados de la Tabla 1 reflejan el desempeño relativo de ambos sistemas de navegación (se advierte de la Tabla 1 que estrictamente desde el punto de vista de la calidad de navegación el desempeño del sistema de la CONAE es ligeramente inferior al iMAR) estos datos no dan información sobre cuánto y cómo se mejorará la calidad de la imagen SAR al utilizar un sistema de navegación u otro. En efecto, a los fines del proyecto SARAT, decidir si un sistema de navegación es mejor que otro depende solamente de los resultados obtenidos en el procesamiento de las imágenes. Por esto se compara además una misma imagen SAR obtenida utilizando información provista por el sistema de navegación de la CONAE y por el sistema iMAR.

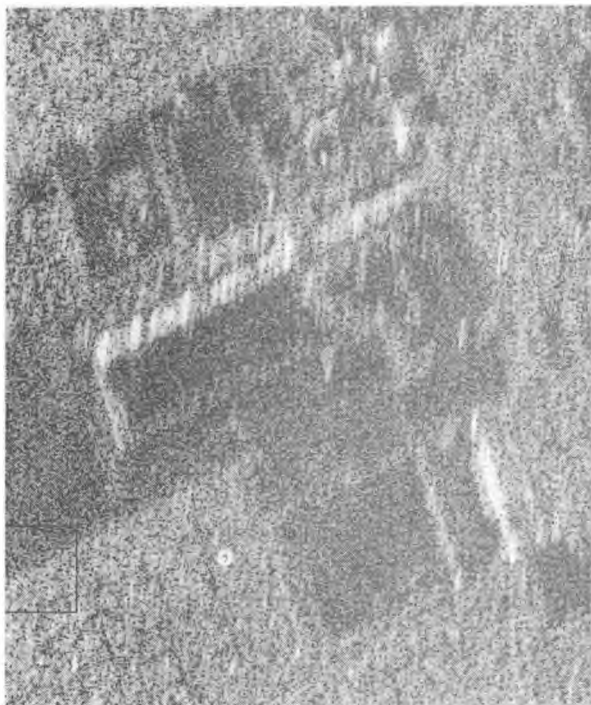


Figura 6.a Imagen SAR procesada sin utilizar información de orientación del avión.

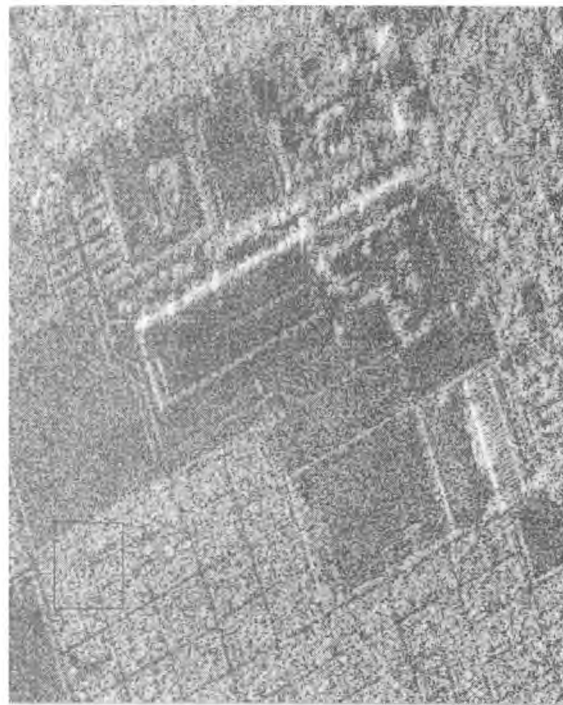


Figura 6.b Imagen SAR procesada utilizando información del sistema de navegación de la CONAE.

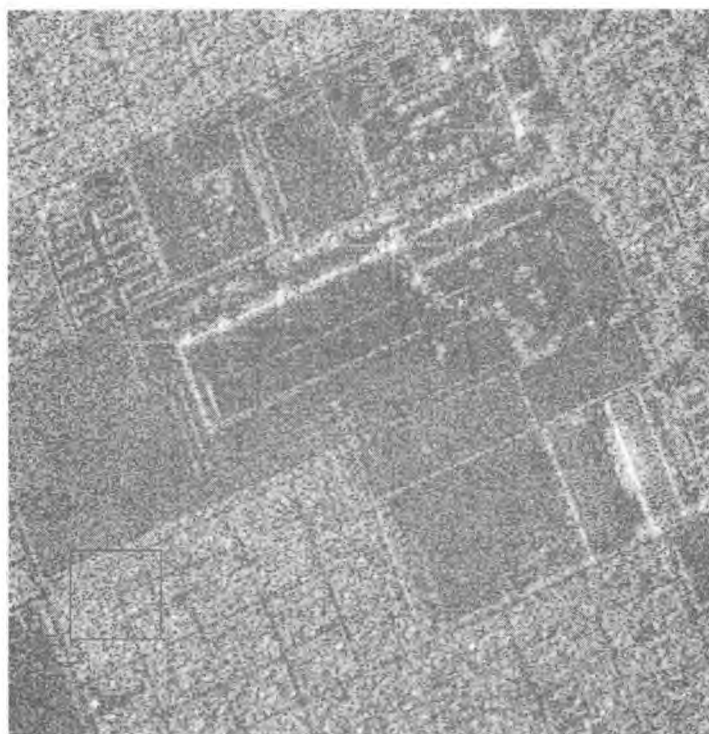


Figura 6 c: Imagen SAR procesada utilizando información del sistema de navegación iMAR.

La figura 6 presenta tres imágenes SAR procesadas utilizando tres tipos distintos de información. La figura 6.a es la imagen SAR procesada sin utilizar información sobre la orientación del avión. Para el procesamiento de la imagen 6.b se utilizó la información de navegación provista por el sistema de navegación desarrollado por la CONAE y para la figura 6.c se utilizó el sistema de navegación iMAR. Comparando la figura 6.a con las figuras 6.b y 6.c se aprecia una sensible mejora en la nitidez de la

imagen cuando se utiliza información de navegación de cualquiera de los dos sistemas. Sin embargo, comparando las figuras 6.b y 6.c, se concluye que ambos sistemas arrojan resultados similares. De este resultado se concluye que la performance de la navegación no puede ser evaluada independientemente sino que debe estar supeditada a los requerimientos del procesamiento de las imágenes SAR para asegurar una alta calidad de las mismas. Para esto será necesario definir un índice de calidad de imagen SAR en base al cual se diseñe o establezcan los requerimientos deseables de la performance de futuros diseños del sistema de navegación del SARAT.

CONCLUSIONES Y PRESPECTIVAS FUTURAS

En este trabajo se analiza el desempeño de un sistema de navegación integrada INS/GPS desarrollado y construido por la CONAE en cooperación con investigadores de la FI-UBA. El desempeño del sistema se evalúa en vuelo comparándolo con la información de navegación provista por un sistema comercial. Los resultados obtenidos se condicen con resultados teóricos previamente publicados en [1]. El sistema de CONAE es aún un modelo de laboratorio que requiere mejoras y actualizaciones tecnológicas actualmente en curso de definición. No obstante, cabe destacar que dicho sistema se encuentra operativo desde hace dos años, habiendo cumplido muchas horas de vuelo sin fallas.

La calidad de los datos obtenidos con el sistema de navegación iMAR corresponde al modo integrado INS/GPS pos-procesado (sin pérdida de GPS), sin embargo este sistema ofrece la posibilidad de agregar información de DGPS. Actualmente se estudia la posibilidad de desarrollar un sistema de navegación de referencia de alta precisión que incluya información DGPS, un receptor para portadoras L1 y L2 con tecnología RTK (real time kinematics) de seguimiento de fase de portadora y medición de actitud vía interferometría de portadora (brújula GPS).

Una línea de trabajo de gran interés práctico se desprende de este trabajo. Resulta necesario establecer un índice de calidad absoluta de las imágenes SAR que permitan evaluar y diseñar el sistema de navegación del SARAT no como un accesorio del procedimiento de enfoque de las imágenes sino como parte constitutiva de todo el sistema de procesamiento de los datos crudos. Más aún, vista la relación existente entre los procesos de navegación y de enfoque numérico de la imagen, esta línea de trabajo debería conducir a un nuevo esquema de navegación integrada que integre los datos crudos del SAR teniendo como objetivo maximizar la calidad de la imagen resultante.

REFERENCIAS

1. M. España, J. I. Giribet: Navegación integrada y georreferenciación directa de sensores remotos aerotransportados; Actas del Congreso Argentino de Control Automático, 2006.
2. Philippe Gerum, Xenomai; Implementing a RTOS emulation framework on GNU/Linux, 2004, <http://www.xenomai.org>
3. Giovanni Racciu, Paolo Mantegazza; RTAI-3.4 User Manual rev. 0.3, 2006, <http://www.rtai.org>
4. J. I. Giribet, M. España, C. Miranda; Desarrollo de Nuevos Algoritmos de Navegación Integrada y su Validación en Simulación; Informe interno CONAE, Julio, 2003.
5. iMAR GmbH, iNAV-FJI-LSURV - iNAV-FJI-RAIL Configuration and Usage, 2008, <http://www.imar-navigation.de>.
6. J. M. Joffrion, J. F. Raquet, D. S. Brungart; Head Tracking for 3D Audio Using a GPS-Aided MEMS IMU; InsideGNSS, Jan-Feb 2006.
7. RT-Linux, 2008, <http://www.rtlinuxfree.com/>
8. Simon Hill; Introduction to Linux for Real-Time Control, National Institute of Standards and Technology, 2005.
9. Victor Yodaiken; The RT-Linux approach to hard real-time, Department of Computer Science New Mexico Institute of Technology Socorro, 2000, <http://luz.nmt.edu/~rtlinux>