

# Procesamiento de señales en tiempo discreto aplicadas a sensado remoto por ondas de radio

M. A. Cabrera<sup>1,2,3</sup>, M. G. Molina<sup>2,4</sup>, J. M. López<sup>3</sup>, R. G. Ezquer<sup>2,3,5</sup>, L. A. Scidá<sup>2</sup>,  
E. Zuccheretti<sup>6</sup>, M. G. Ferreyra<sup>2</sup>, S. A. Grupalli<sup>2</sup> y C. A. Iván<sup>2</sup>.

(1) Laboratorio de Telecomunicaciones, D.E.E.C, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Tucumán (FACET-UNT), Argentina.

(2) Laboratorio de Ionósfera, Dpto. de Física, FACET- UNT.

(3) Centro de Investigación sobre Atmósfera Superior y Radiopropagación (CIASUR), FRT, Universidad Tecnológica Nacional, Tucumán, Argentina.

(4) Dpto. de Ciencias de la Computación, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.

(5) CONICET, Argentina.

(6) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Rome, Italy.

## Resumen

La técnica de detección de envolvente fue el método tradicional utilizado en sensado remoto por ondas de radio para aplicaciones geofísicas, tales como los Sondadores Ionosféricos. En la actualidad existen desarrollos basados en la técnica de esparcimiento de espectro que permiten alcanzar altas resoluciones en la determinación del rango con baja potencia emitida. La modulación de fase con algún esquema de codificación permite obtener un ancho de banda similar a la detección por envolvente de pulsos angostos. Para extraer información de las señales recepcionadas (el eco) es necesario utilizar métodos de procesamiento de señales.

En este trabajo se propone el modelado de algunas etapas del procesamiento de señales como: generación de código, modulación bifásica, muestreo en cuadratura, correlación e integración de pulsos. El modelado se realiza con el software Matlab © utilizando métodos de simulación. Esto permite analizar las señales que participan a lo largo del proceso con el fin de establecer criterios cualitativos y cuantitativos que permitan realizar un aporte a los estudios teóricos-prácticos para radares de aplicaciones geofísicas.

Para el estudio se analizaron dos situaciones; reflexiones sobre dos estratificaciones ionosféricas y otra de reflexión simple, usando frecuencia fija de 3.5 MHz durante 5 s. Se incluyó la técnica de integración de ecos, necesaria para lograr energías suficientes para hacer visibles los ecos de la señal recepcionada inmersa en ruido.

Se implementan dos algoritmos, en el dominio de tiempo discreto, Correlación de Amplitud de Componentes (CAC) y Correlación de Amplitud de Módulo (CAM); para detectar ecos de radar y obtener así información de la amplitud del eco y el desplazamiento temporal, para señales sintetizadas, a lazo cerrado y ecos reales obtenidos del Advanced Ionospheric Sounder (AIS-INGV). Los resultados muestran que en el método de CAC, aunque requiere más cálculos de correlación, la señal del eco es más visible respecto del piso de ruido que en el método CAM, por lo que se necesitan un menor número de integraciones para obtener un resultado aceptable.

Palabras clave: código, correlación, espectro, radar, señales.

---

*Signal Processing in Discrete Time Applied to Remote Sensing Through Radio Waves*

**Abstract**

*The technique of envelope detection was the traditional method used in remote sensing through radio waves for geophysical applications, such as Ionospheric Sensing.*

*Nowadays, there are improvements based on scattering techniques of the spectrum that allow to get high resolutions in range determination with low emitted power. Phase modulation with some codification pattern allows to obtain a bandwidth similar to the envelope detection of narrow pulses. It is necessary to use methods of signal processing to extract information of the received signals (the echo).*

*This work puts forward the modelling of some phases of signal processing such as: code generation, biphasic modulation, quadrature sampling, pulse integration and correlation. Modelling is carried out by Matlab software using simulation methods. This enables to analyze the signals that take place along the process with the aim of setting up qualitative and quantitative criteria that support theoretical and practical researches for radars of geophysical applications.*

*Two situations were analyzed for this study: reflections concerning two ionospheric stratifications and one of simple reflection, using a fixed frequency of 3.5 MHz during 5 s. The Integration technique in echoes necessary to get enough energy to visualize the echoes of the received signal within the noise, was included in this study.*

*Two algorithms in discrete time are implemented: Amplitude Correlation of Components (ACA) and Module Amplitude Correlation (MAC) to detect radar echoes and get information of echo amplitude and temporal displacement for synthesized signals, in close loops and real echoes obtained from the Advanced Ionospheric Sounder (AIS-INGV). The results show that in ACA method, although more calculations of correlation are required, the echo signal is more visible than the MAC method as regards the noise floor. Thus, a smaller number of integrations are required to obtain an acceptable result.*

*Key Words: code, correlation, spectrum, radar, signals.*

## Introducción

Se propone el modelado de algunas etapas y señales utilizadas en el diseño de radares digitales utilizando Matlab® (Mahafza, 2000; Roberts, 2004; entre otros). La simulación permite analizar las señales que participan a lo largo del proceso, a fin de establecer criterios cualitativos y cuantitativos sobre el procesamiento de las señales. Este trabajo trata sobre la técnica de modulación de portadora por código utilizada para mejorar la resolución del rango y la relación señal ruido (SNR) en las señales de radio recibidas en el radar. Se analizan dos métodos de procesamiento de señales en el dominio de tiempo discreto basados en el muestreo en cuadratura y correlación, para varios casos particulares, que permitan obtener información de la altura virtual y la amplitud a partir del eco recepcionado. En particular, los siguientes casos han sido examinados: una señal senoidal sintética codificada y desplazada en el tiempo, señales a lazo cerrado y ecos geofísicos reales obtenidos del sistema de sondaje ionosférico (AIS-INGV) de Roma, **Zuccheretti et al.** (2003).

## Procesamiento de Señales para aplicaciones de radar

Desde los inicios de la investigación ionosférica, los radares que operan en bandas de HF, llamados Sondadores Ionosféricos (IS), basaron su desarrollo en las técnicas de repetición de pulsos y detección de envolvente. Con el fin de hacer posible la detección, del débil eco inmerso en ruido, estos sistemas necesitan

emitir señales de radio de alta potencia (**Jursa, 1985**). Los modernos radares para aplicaciones geofísicas utilizan la técnica de esparcimiento de espectro para mejorar la resolución de rango emitiendo bajas potencias (**Reinisch, 2000; Bianchi y Altadill, 2005**).

Los métodos de codificación de señales, utilizados en radares, permiten obtener un ancho de banda similar al que se logra con las técnicas de detección de envolvente utilizando transmisión de pulsos muy estrechos. Esta técnica de codificación basada en la transmisión de señales portadoras de radio codificadas se denomina "compresión de pulso" y hace posible obtener altas resoluciones del rango con bajas potencias emitidas. Luego, para obtener información del eco es necesario procesar la señal recibida mediante algoritmos numéricos, en particular utilizando métodos de correlación (**Mohamed, 1991; entre otros**). Es posible demostrar que para un ancho de banda definido, si aumenta la densidad de energía espectral en las señales transmitidas, mejora la SNR en las señales recibidas, ya que más energía es reflejada por el objetivo (**Curry, 2005**).

En el caso de codificación binaria son necesarios métodos de procesamiento de señales para extraer información de las señales codificadas recibidas con el fin de obtener tiempo de retardo del eco y la amplitud de la energía, (**Bianchi et al, 2003**). Para desarrollar estos algoritmos es necesario considerar los aspectos teóricos y prácticos en el manejo de señales de radio, para detectar las señales

débiles y ruidosas, como las usadas en el diseño de radares (Skolnik, 1980, 1990).

### Codificación y Correlación

Se pueden lograr alta resolución y la mejora en la SNR, con el uso de los pulsos de radar lo más largos posibles, si están debidamente codificados (**Rastogi y Sobolewski**, 1990), aunque esto afecta la distancia mínima de detección, o distancia ciega (**Barton and Leonov**, 1997). Así, la resolución en la determinación del rango se relaciona con el ancho de banda equivalente que, en pulsos codificados, equivale a la inversa del salto mínimo binario en el propio código. (**Patro et al**, 1990; entre otros).

Dentro del proceso de detección, la correlación es la herramienta matemática que permite extraer la información a partir del eco. Así las señales recepcionadas, después de ser filtradas, amplificadas y convertidas a valores de frecuencia intermedia se muestrean en cuadratura (**Tomasi**, 1996) obteniéndose muestras digitales llamadas *I* y *Q*. Esta operación recupera la información del código, y mediante operaciones de correlación con una muestra del código local (LC) es posible obtener información de la posición temporal y amplitud del eco.

En este trabajo se analizan dos métodos para el procesamiento de señales en tiempo discreto, para detectar ecos de radar, el primero que combina los canales *I* y *Q* tomando

$$A = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad (\text{Skolnik, 1980})$$
 y, a continuación se correlaciona la amplitud *A* con el LC, método al que denominaremos Correlación de Amplitud de Módulo (CAM); en el segundo método las componentes *I* y *Q* se correlacionan por separado con el LC, para luego sumar los resultados de las correlaciones, a este método lo denominaremos Correlación de Amplitud de Componentes (CAC) (**Skolnik**, 1990).

Existen diferentes tipos de códigos utilizados en aplicaciones de radar (**Ioannidis y Farley**, 1972), en este trabajo se utiliza una secuencia de Código Complementario (CC) (**Golay**, 1961). Desde el punto de vista teórico, los pares complementarios de código tienen la importante propiedad de que la suma de las funciones de auto-correlación de cada secuencia es igual a cero para todos los valores de la función que están desplazados, a excepción del desplazamiento en cero. **Sultzter y Woodman** (1984) sugirieron como criterio general de diseño en radares de alta atmósfera la utilización de códigos con funciones de

autocorrelación con grandes lóbulos principales y lóbulos secundarios mínimos donde especifican que, la potencia total en la correlación de los lóbulos laterales debe ser del orden del 20% o menor que el lóbulo principal. Cuando se comparan las funciones de autocorrelación o diferentes secuencias se obtiene información útil que permite seleccionar la secuencia binaria más adecuada para las diferentes aplicaciones de radar. En esta simulación se utiliza una secuencia de código complementario de 16 bits (Apéndice I), con una longitud de poco 30 $\mu$ s, definiendo así una resolución de 4.5 km (Apéndice II) (**Arokiasamy et al**, 2002; **Zuccheretti et al**, 2003).

Los códigos complementarios, en sus diferentes versiones son muy apropiados para aplicaciones de radares de alta atmósfera terrestre (**Ghebrebrhan et al**, 2004), pues aunque su desempeño en velocidad no es óptimo, comparado por ejemplo con un código Barker (**Barker**, 1953); así si el objetivo a detectar puede considerarse estacionario durante todo el tiempo de medición, este tipo de codificación tiene además la ventaja adicional de una eficiente eliminación del ruido de base luego de sumar las dos secuencias (**Bianchi et al**, 2003).

### Modelado del procesamiento de señal

La simulación es una herramienta para validar hipótesis antes de la implementación del sistema. El modelo permite una comprensión más profunda del sistema real, analizar las relaciones entre las etapas y los parámetros en el diseño (**Cabrera et al**, 2007).

Las herramientas de software juegan un papel central dentro del proceso de modelado. Son capaces de producir los resultados que se introducen en el modelo, lo realimentan, obteniéndose nuevos resultados para ajustarlos y validarlos. En el paso siguiente será posible conseguir el desarrollo real del sistema (**Etter**, 1997).

Matlab© se ha utilizado para modelar algunas etapas, es un lenguaje técnico-científico que trabaja con variables vectoriales y matriciales (**Mahafza**, 2000). Para el cálculo de correlación sobre la muestra de la señal y el código local se definió un algoritmo adecuado con el fin de ahorrar en términos de tiempo de procesamiento.

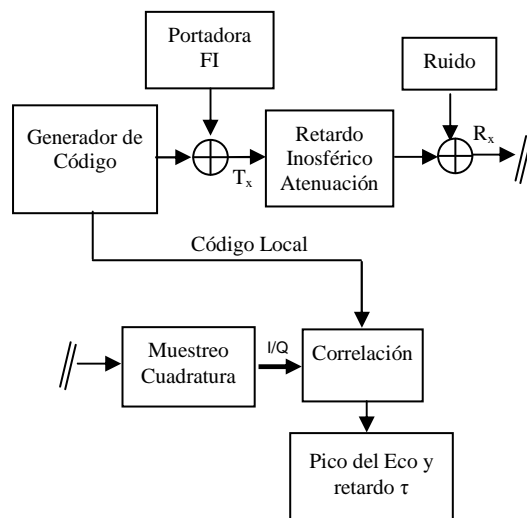


Fig. 1 Diagrama de proceso del sistema modelado.

En radiocomunicaciones es muy conocido el uso de procesos de traslación de frecuencia por la que es posible llevar las señales y bandas laterales de radiofrecuencia (RF) a valores de frecuencia intermedia (FI), manteniendo el ancho de banda y de esta manera la información original en la señal portadora (Terman, 1977). En este trabajo la simulación parte después de realizada la conversión en la señal de RF. Siguiendo criterios de diseño del radar AIS, con el que se chequearon los resultados de este trabajo, se seleccionó una FI=100 kHz de manera de que tres periodos de señal de FI estén comprendidos dentro de la longitud de un bit de código (Arokiasamy et al, 2002).

La figura 1 muestra un diagrama de flujo simplificado del modelado de las señales sintetizadas. Se generan dos secuencias de código complementario de 16 bits. La longitud de cada bits es 30 $\mu$ s, por tanto, la longitud total para cada secuencia es de 480 $\mu$ s. Se modula una señal senoidal mediante la técnica de modulación Bifásica (BPSK) (Tomasi, 1996). Un bloque introduce el "retardo ionosférico ( $\tau$ ) y la atenuación", luego se suma ruido aleatorio en la banda de interés. En otro bloque, se realiza el proceso de muestreo en cuadratura, lo que permite recuperar el código de la señal receptionada. Los resultados del muestreo son dos señales, I y Q.

En las etapas siguientes se aplicarán los métodos CAM y CAC, con el fin de obtener el tiempo de retardo del eco ( $\tau$ ) y la amplitud.

En el método CAM se obtiene la amplitud A1 y A2 y se correlacionan con la correspondiente secuencia de LC. Como se indica a continuación:

$$\text{Cor}_1 = A_1 * \text{Cod}_1$$

$$\text{Cor}_2 = A_2 * \text{Cod}_2$$

A continuación, los beneficios del código complementarios se obtienen añadiendo la primera y segunda secuencia de la siguiente manera:

$$C_{\text{CAM}} = \text{Cor}_1 + \text{Cor}_2$$

En el método CAC las muestras I1 y Q1; las muestras I2 y Q2 se correlacionan con las muestras locales de los códigos Cod1 y Cod2 respectivamente. Así el procesamiento se puede escribir como sigue:

$$\text{Cor } I_1 = I_1 * \text{Cod}_1$$

$$\text{Cor } Q_1 = Q_1 * \text{Cod}_1$$

$$\text{Cor } I_2 = I_2 * \text{Cod}_2$$

$$\text{Cor } Q_2 = Q_2 * \text{Cod}_2$$

La operación de correlación es un proceso lineal por lo que no altera la fase de las señales. Ahora para obtener los beneficios del código complementario se realiza la suma algebraica de los resultados de las correlaciones de las señales en fase de las dos secuencias como sigue:

$$\text{Sum } I = \text{Cor } I_1 + \text{Cor } I_2$$

$$\text{Sum } Q = \text{Cor } Q_1 + \text{Cor } Q_2$$

Lo siguiente es combinar el resultado de la correlación de los canales que se encuentran en cuadratura, SumI y SumQ, tomando la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados, de la siguiente manera:

$$\text{Sum}_{\text{CAC}} = \sqrt{(\text{Sum } I)^2 + (\text{Sum } Q)^2}$$

Esta operación es posible debido a que la correlación no cambia la información de fase inicial en los canales I y Q, manteniendo las propiedades del muestreo en cuadratura.

En la siguiente sección se hará el análisis de señales básicas en el sistema.

### Análisis de las señales

En esta sección se describe de manera simbólica los valores que asumen las señales a

lo largo del proceso hasta obtener la información del eco. En general podemos considerar una señal portadora,  $a(t)$ , en su expresión polar en el dominio del tiempo continuo de la siguiente manera:

$$a(t) = Ae^{j\omega_0 t}$$

Donde  $A$  es la amplitud,  $j = \sqrt{-1}$  la notación compleja y  $\omega_0 = 2\pi f_0$ , la frecuencia angular, con la frecuencia  $f_0$  en Hz. Si a la señal  $a(t)$  se la modula con el código  $C(t)$ , el código se lo denota con  $C(t)$  pero es una señal inherentemente discreta que tendrá dos valores +1 y -1, podemos escribir la señal transmitida  $s(t)$  de la siguiente manera:

$$s(t) = A \cdot C(t)e^{j\omega_0 t}$$

Después de las reflexiones, la señal recibida  $r(t)$  tendrá como resultado una suma de múltiples ecos atenuados y superpuestos. Es posible escribir como:

$$r(t) = \sum_{i=1}^n b_i s(t - \tau_i) \quad (1)$$

Donde  $b_i$  y  $\tau_i$  son los íesimos valores del factor de atenuación y el tiempo de retraso debido a las contribuciones de la señal refleja total. Para esta simulación, se adoptó  $n = 1$ . Así, la ecuación 1 se puede escribir como sigue:

$$r(t) = b_1 \cdot A \cdot C(t - \tau_1)e^{j\omega_0(t - \tau_1)}$$

Como se sabe, el proceso de muestreo en cuadratura elimina la portadora. Después de este proceso, el componente de la fase en la señal estará representado con el coeficiente complejo de amplitud  $\beta$ . Ahora, es posible representar como  $r(t)$  a la señal en el dominio de tiempo continuo y  $r(n)$  en el dominio del tiempo discreto, así queda:

$$r(n) = \beta C(n - d_1)$$

Para extraer el valor de retardo temporal  $d_1$  de esta ecuación, se realiza un proceso de correlación en tiempo discreto con el código local  $C(n)$ , así se puede escribir:

$$r_c(n) = r(n) * C(n)$$

Realizando esta operación sobre la señal recibida con muestras de LC, la expresión obtenida es:

$$r_c(n) = N\beta \delta(n - d_1)$$

(2)

Donde  $d_1$  representa el único retraso considerado, para este caso, mientras el valor de la función impulso  $\delta(n - d_1)$  vale uno o cero dependiendo del desplazamiento en la función de correlación y  $N$  es el número de bits que constituyen el código. Al usar codificación complementaria de fase, sin presencia de ruido, los lóbulos secundarios se eliminan, por lo tanto la ecuación 2 representa el resultado exacto y  $N$  representa una ganancia para la señal recuperada. La ganancia para señales no correlacionadas, como el ruido, es distinta de cero y vale  $\sqrt{N}$ . Si se calcula la relación Señal/Ruido (SNR) para este caso se obtiene  $\sqrt{N}$ , esto significa una ganancia en la SNR (**Ghebrebrhan et al**, 2004). La ganancia de potencia sin considerar el ruido será  $(10 \log N + 3)$  [dB], donde los 3 dB adicionales se logran como beneficio de la suma de las dos secuencias (**Bianchi et al**, 2003, entre otros). Con el fin de facilitar la comprensión del proceso de restauración del código de las expresiones matemáticas antes mencionadas, se suprimió el ruido, pero se tendrán en cuenta en el procesamiento de los ecos de la AIS en la sección siguiente.

### Resultados obtenidos

Se presentan los resultados obtenidos para una señal senoidal sintética, codificada, a lazo cerrado y muestras reales de ecos del AIS que opera en el observatorio ionosférico Roma del INGV (**Zuccheretti et al**, 2003). Con el proceso de modelado se logró detectar ecos, obteniendo su retardo temporal y amplitud. La figuras 2a y 2b muestran los resultados de los métodos CAM y CAC, respectivamente, en el dominio de tiempo discreto de señales sintetizadas sin ruido. El tiempo de retardo programado fue el que corresponde a una altura virtual de 145 km.

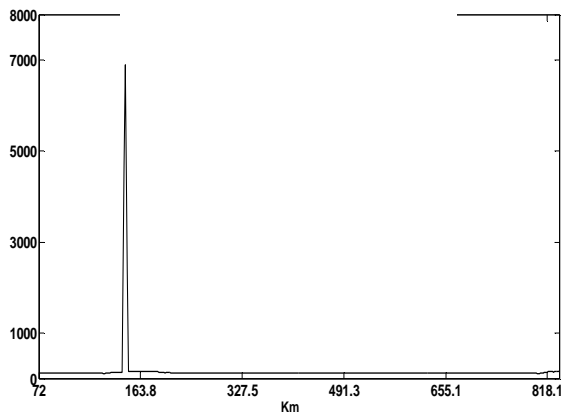


Fig. 2a Resultados CAM en dominio de tiempo discreto para una señal sintetizada sin ruido.

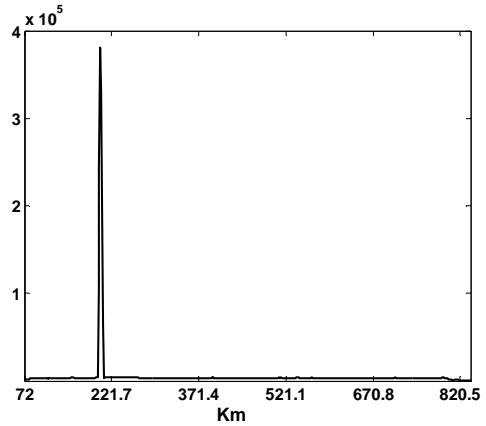


Fig. 3b Resultados CAC en dominio de tiempo discreto para la señal AIS generada en lazo cerrado.

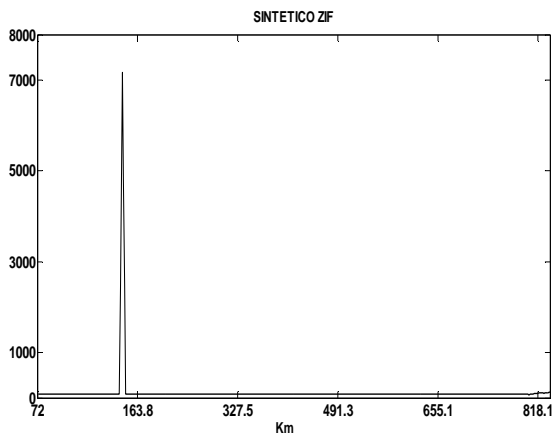


Fig. 2b Resultados CAC en dominio de tiempo discreto para una señal sintetizada sin ruido.

Las figuras 3a y 3b muestran los resultados de los métodos CAM y CAC, respectivamente, en el dominio de tiempo discreto para señales AIS generadas a lazo cerrado, con un retraso de tiempo programado.

Los resultados de los dos métodos se presentan para un solo impulso transmitido, esto es un par complementario. Es posible ver resultados similares en la altura virtual programada, este caso a 201km. Las diferencias observadas están en los valores de amplitud, mostrando que el método CAC presenta una ligera ganancia respecto del método CAM, de un 7% para las señales sintetizadas y un 5% para señales de lazo cerrado.

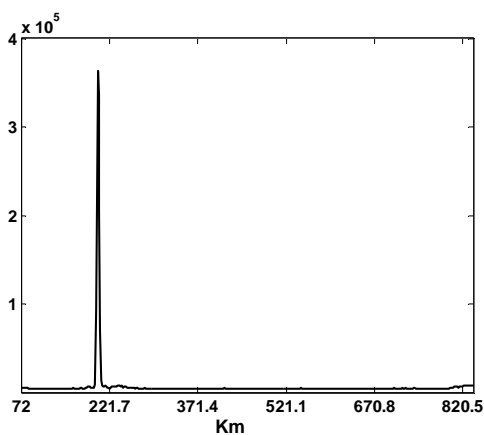
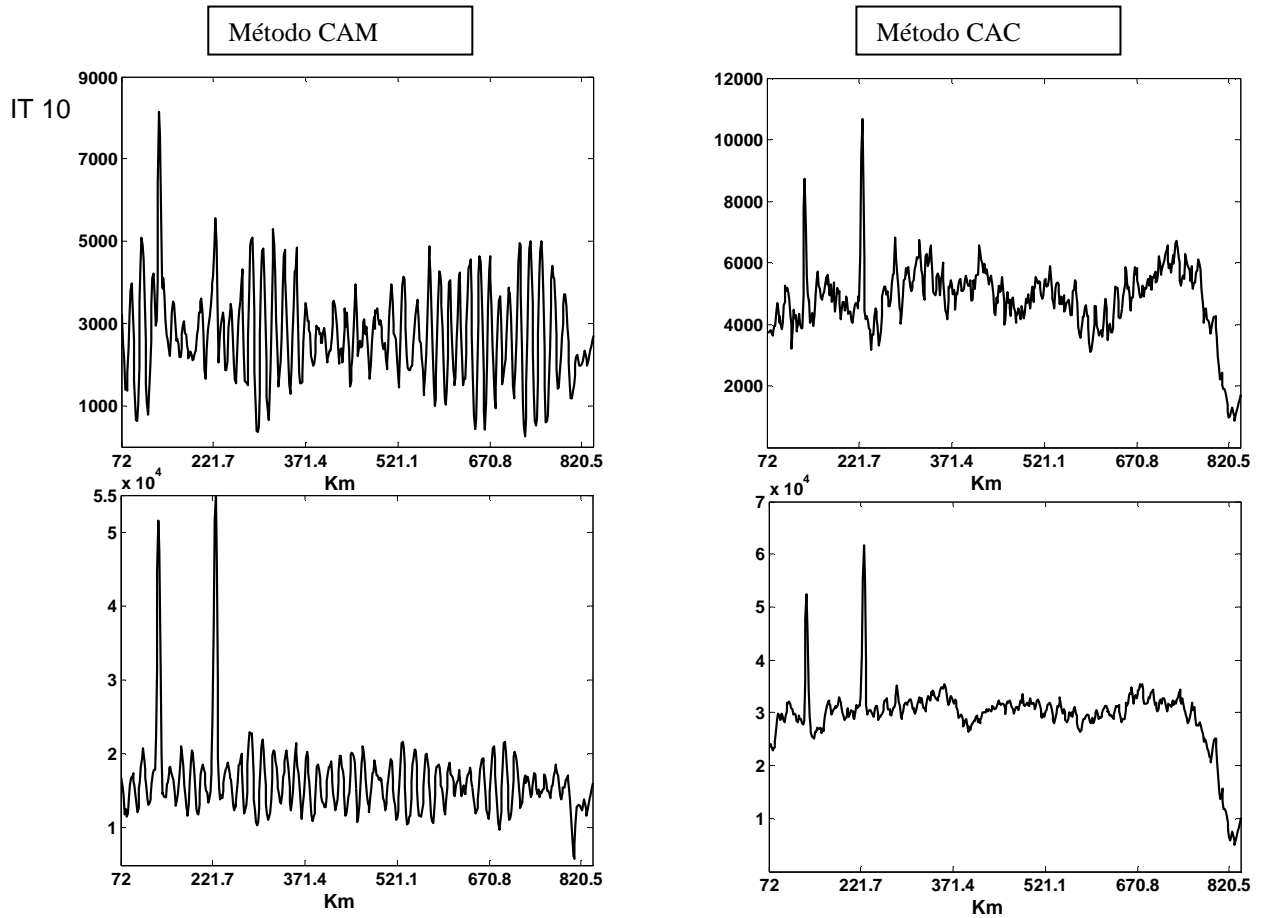
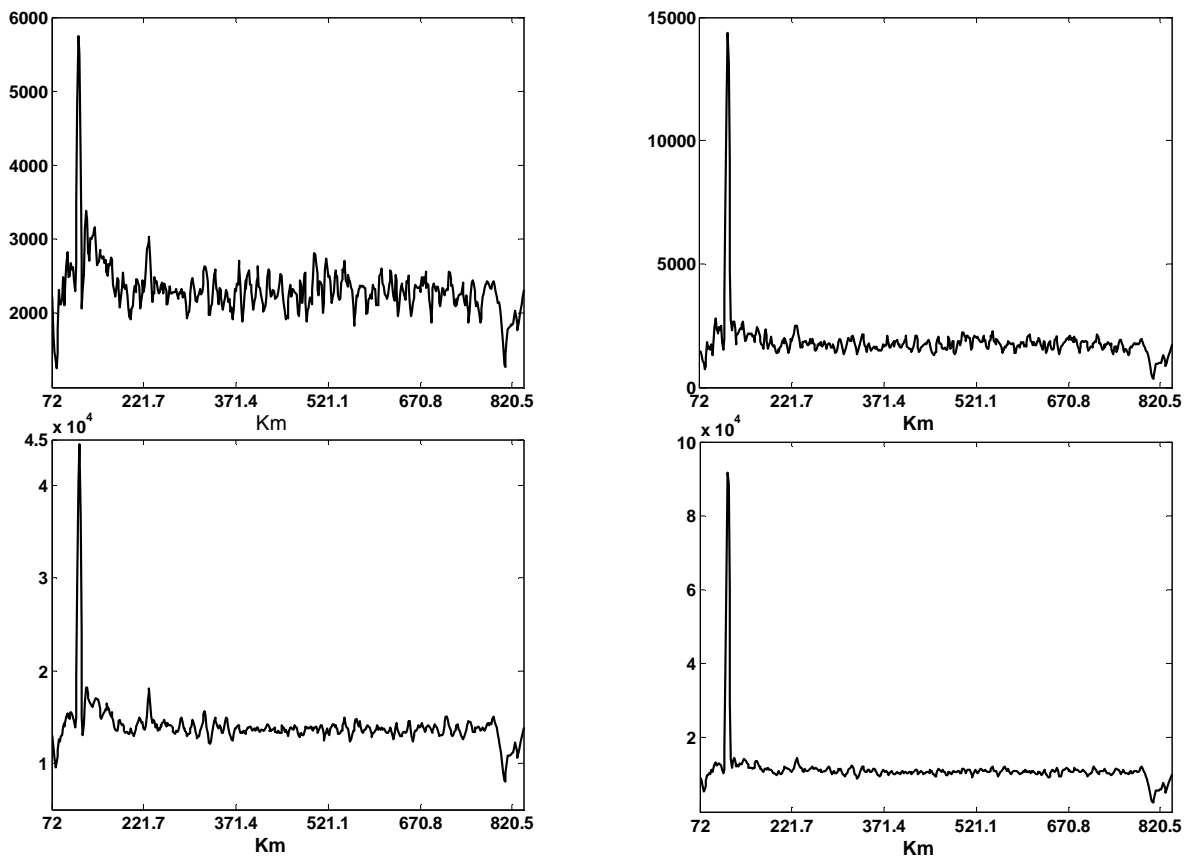


Fig. 3a Resultados CAM en dominio de tiempo discreto para la señal AIS generada en lazo cerrado.



Figs. 4a y 4b Señales AIS, reflexiones desde dos estratificaciones



Figs. 5a y 5b Señales AIS, reflexiones desde una estratificación.

Las figuras 4a, 4b, 5a y 5b muestran los resultados obtenidos del procesamiento para señales de ecos del AIS, para 10 y 60 integraciones.

Las mediciones se efectuaron a una frecuencia fija de 3,5 MHz durante unos 5 segundos en la base de la capa F, de manera de tener condiciones estables en la medición. Las señales muestreadas I y Q se almacenan en una memoria para su procesamiento posterior. Para lograr mejorar la calidad de la señal recuperada, o sea lograr obtener más energía, se recurre a la integración de los ecos, así es posible obtener una ganancia extra que se puede expresar como  $20 \cdot \log \sqrt{K}$ , siendo  $K$  el número de integraciones (Skolnik, 1990). Dos casos se presentan: la primera se refiere a una situación de reflexión sobre dos estratificaciones ionosféricas, la segunda presenta una sola reflexión.

### Conclusiones

Se modelaron algunas etapas del procesamiento de señales como: generación de código, modulación bifásica, muestreo en cuadratura, correlación e integración de pulsos. El modelado se realizó utilizando métodos de simulación, lo que permitió analizar las señales que participan a lo largo del proceso con el fin de establecer criterios cualitativos y cuantitativos que permitan realizar un aporte a los estudios teóricos-prácticos para radares de

aplicaciones geofísicas. Se analizaron dos situaciones; reflexiones sobre dos estratificaciones ionosféricas y otra de reflexión simple, usando frecuencia fija de 3.5 MHz durante 5 s. Se incluyó la técnica de integración de ecos, necesaria para lograr energías suficientes para hacer visibles los ecos de la señal recepcionada inmersa en ruido.

Se implementan dos algoritmos, en el dominio de tiempo discreto, Correlación de Amplitud de Componentes (CAC) y Correlación de Amplitud de Módulo (CAM); para detectar ecos de radar y obtener así información de la amplitud del eco y el desplazamiento temporal, para señales sintetizadas, a lazo cerrado y ecos reales obtenidos del Advanced Ionospheric Sounder (AIS-INGV).

Para los métodos de detección considerados, se encontraron diferencias operativas relevantes: en el método CAC obtenemos una señal aparentemente más clara que en el método CAM, pero son necesarios más cálculos de correlación. En el método CAC un menor número de integraciones parecen ser suficientes para un buen resultado.

Los resultados preliminares obtenidos, para las señales de eco reales muestran que es posible extraer la información de amplitud y tiempo de retardo de las señales de eco del radar utilizando estas técnicas de procesamiento de señales en el dominio del tiempo discreto.

### Referencias

- Arokiasamy, J. B., Bianchi, C., Sciacca, U., Tutone, G. and Zuccheretti, E.** (2002) "The new AIS-INGV Digital Ionosonde design report", Technical Report, N°12, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Rome, Italy.
- Barker, R. H.** (1953) "Group Synchronizing of Binary Digital Sequences", En: *Communication Theory*, London: Butterworth, pp. 273-287.
- Barton, D. K. and Leonov, S. A.** (1997) *Radar Technology Encyclopedia*, Artech House.
- Bianchi C., Sciacca, U., Zirizzotti, A., Zuccheretti, E. and Arokiasamy, J. B.** (2003) "Signal processing techniques for phase-coded HF-VHF radars", *Annals of Geophysics*, Vol. 46, N° 4.
- Bianchi, C. and Altadill, D.** (2005) "Ionospheric Doppler measurements by means of HF-radar techniques", *Annals of Geophysics*, Vol. 48, N° 6, pp. 989-993.
- Cabrera, M. A., Ezquer, R. G., López, J., Bianchi, C., Radicella, S. M., Molina, G., Garay, E., Iván, C., Valdez, M., Ferreyra, M. and Zalduendo, L. A.** (2007) "Proyecto de desarrollo de un sondador digital para investigación ionosférica", *Revista Ciencia Tecnología y Medio Ambiente*, FRT, UTN, N° 6, pp. 30-33.
- Curry, G. R.** (2005) *Radar System Performance Modeling*, 2<sup>nd</sup> Edition, Artech House, Norwood, MA.
- Etter, D. M.** (1997) *Solución a problemas de ingeniería con Matlab*, Prentice Hall, Mexico.



- Ghebrebrhan, O., Hubert, L., Yamamoto, M. and Fukao, S.** (2004) "Interference suppression factor characteristics of complementary codes for ST/SMT radar applications", *Radio Science*, Vol. 39, RS3013, doi: 10.1029/2003RS002910.
- Golay, M. J. E.** (1961) "Complementary series", *IRE Trans, Inf.Theory*, 7, pp. 82-87.
- Jursa, A. S.** (1985) *Handbook of Geophysics and the Space Environment*, AFGL, Air Force, USA.
- Ioannidis, G. and Farley, D. T.** (1972) "Incoherent scatter observations at Arecibo using compressed pulses", *Radio Science*, Vol. 7, pp.763-766.
- Mahafza, B. R.** (2000) *Radar Systems Analysis and Desing Using MATLAB*, Chapman & Hall/CRC, USA.
- Mohamed, N. J.** (1991) "Resolution Function of Non sinusoidal Radar Signals: II – Range –Velocity Resolution with Pulse Compression Techniques", *IEEE Transactions Electromagnetic Compatibility*, Vol. 33, N°1.
- Patro, Y. K. G., Suresh, N. K. R. and Balamuralidhar, P.** (1990) "Effect of signal path distortions on the decoding performance in a pulse compression radar system", *Radio Science*, Vol. 25, N° 5, pp 1095-1100.
- Rastogi, P. K. and Sobolewski, G.** (1990) "New quasi-complementary code sets for atmospheric radar applications", *Radio Science*, Vol. 25, N°5, pp. 1087-1094.
- Reinisch, B. W.** (2000) "Radio Sounding of Geospace Plasmas", *Física de la Tierra*, pp. 105-126, ISSN: 0214-4557.
- Roberts, M. J.** (2004) *Señales y Sistemas*, Mc. Graw Hill, Mexico.
- Skolnik, M. I.** (1980) *Introduction to radar systems*, Mc. Graw-Hill, USA.
- Skolnik, M. I.** (1990) *Radar Handbook*, Mc. Graw Hill, USA.
- Sultzter, M. P. and Woodman, R. F.** (1984) "Quasi-complementary codes: A new technique for radar sounding", *Radio Science*, Vol. 19, pp. 337-344.
- Terman, F. E.** (1977) *Ingeniería Electrónica y de Radio*, Arbó, Bs. As., Arg.
- Tomasi, W.** (1996) *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*, Prentice Hall, Mexico.
- Zuccheretti, E., Tutone, G., Sciacca, U., Bianchi, C. and Arokiasamy, B. J.** (2003) "The new AIS-INGV digital ionosonde", *Annals of Geophysics*, Vol. 46, N° 4, pp. 647-659.
- 

## Apéndice I

La secuencia de código complementaria usada en este trabajo:

Primera secuencia: 1101111010001011

Segunda secuencia: 1101111001110100

## Apéndice II

Si la velocidad de propagación es la de la luz en el vacío, entonces  $c = 3 \times 10^5$  km/s, es posible calcular la longitud " $\Delta t$ " del pulso que modula la portadora relativa a la resolución espacial que se requiere, en nuestro caso 4,5 km, como sigue:

$$\Delta t = \frac{2\Delta h}{c} = \frac{2 \cdot 4.5 \text{ km}}{3 \times 10^5 \text{ km/s}} = 30 \mu\text{s}$$

Donde los  $30 \mu\text{s}$  se conocen como la "longitud sintética" del pulso transmitido.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido subsidiado en parte por los proyectos 26/E408-CIUNT, Universidad Nacional de Tucumán; 25/P028-FRT, Universidad Tecnológica Nacional.

Al Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia por los datos del Observatorio Roma.

---

Este trabajo se escribió entre Diciembre 2009 y Agosto de 2010 en Laboratorio de Ionósfera del Dpto. de Física, FACET-UNT y Laboratorio de Telecomunicaciones, DEEC- FACET-UNT. Este trabajo muestra resultados parciales de la actividad científica en colaboración de Proyectos de Investigación de la Universidad Nacional de Tucumán, Universidad Tecnológica Nacional, CONICET e Instituto di Geofísica e Vulcanología (Italia).

---

**Miguel A. Cabrera**

Ing. Electricista, orientación Electrónica, egresado en 1986 de la FACET-UNT y Dr. en Física de la Atmósfera (UNT, 2003). Profesor Adjunto de Electromagnetismo I y II, y de Electrónica Industrial, ambas materias de la FACET-UNT. El Dr. Cabrera realiza investigaciones en el Lab. de Telecomunicaciones del DEEC, en el Laboratorio de Ionósfera del Dpto. de Física, FACET-UNT y el CIASUR (FRT-UTN). Actualmente dirige un Proyecto de investigación en la UNT, en el área de la alta atmósfera terrestre con énfasis en modelado de STEC, Telecomunicaciones y Sensado Remoto por Ondas de Radio. Ha publicado trabajos de investigación en revistas internacionales de la especialidad y ha dictado conferencias nacionales e internacionales. Ha sido invitado como Investigador visitante en importantes centros de investigación nacionales y del exterior, como: ICTP (Trieste), INGV (Roma), CASLEO (San Juan), Arecibo National Observatory (Puerto Rico), Dpto. de Ciencias Físicas de la Universidad Complutense de Madrid (España) y el Instituto de Geofísica y Astronomía de Cuba. En el año 2009, fue designado por el Ministerio de Relaciones Exteriores y Culto de la República Argentina, para asesorar al IGA - Cuba sobre desarrollo de radares para alta atmósfera terrestre.

E-mail: [mcabrera@herrera.unt.edu.ar](mailto:mcabrera@herrera.unt.edu.ar)

**María Graciela Molina**

Licenciada en Informática egresada de la Universidad Nacional de Tucumán. Desempeña sus tareas docentes en las cátedras de Métodos Numéricos y Bases de Datos del Departamento de Ciencias de la Computación de la FACET-UNT. Realiza sus trabajos de investigación en el Laboratorio de Ionósfera de la FACET-UNT como integrante de proyectos de investigación ante el CIUNT desde el año 2005. Realiza trabajos de investigación en el área de métodos numéricos, procesamiento de señales, modelado y simulación.

**Joaquín M. López**

Ingeniero Electrónico egresado de la Universidad Tecnológica Nacional y se desempeña como investigador en el Centro de Investigación sobre Atmósfera Superior y Radiopropagación-FRT-UTN y en el Laboratorio de Ionósfera del Dpto. de Física de la FACET-UNT. Ha publicado trabajos científicos en revistas nacionales e internacionales de la especialidad y ha presentado trabajos a congresos científicos nacionales e internacionales.

**Rodolfo G. Ezquer**

Egresó de la UNT con el título de Licenciatura en Física. En el año 1991 obtuvo el título de Dr. en Física de la UNT. En la actualidad, es Investigador Principal del CONICET, Director del Laboratorio de Ionósfera del Dpto. de Física de la FACET, Director del Centro de Investigación sobre Atmósfera Superior y Radiopropagación-FRT-UTN y Profesor Titular en la FRT de la Universidad Tecnológica Nacional.

El Dr. Ezquer trabaja en el área de modelado de magnitudes ionosféricas, su variabilidad, con énfasis en modelado de TEC y en el análisis morfológico y modelado de irregularidades ionosféricas. En varias oportunidades ha sido invitado por el International Center for Theoretical Physics y por otros centros como el Complejo Astronómico el Leoncito (San Juan, Argentina), Arecibo National Observatory (Puerto Rico, EEUU), Dpto. de Ciencias Físicas de la Universidad Complutense de Madrid (España), Universidad de Cornell (EEUU), etc.

Es Director de Proyectos de investigación en el CONICET y en la FRT-UTN. Además dirige dos tesis doctorales sobre la especialidad y becarios estudiantiles.

En el área instrumental es el Director Científico de dos sistemas de recepción de señales de GPS para detección de irregularidades ionosféricas en el Lab. de Ionósfera-UNT y de un Sondador Ionosférico instalado en la FRT-UTN.

El Dr. Ezquer ha publicado más de cien trabajos científicos en revistas nacionales e internacionales de la especialidad y ha efectuado numerosas presentaciones a reuniones científicas nacionales e internacionales.

Su trayectoria científica lo ha hecho merecedor de dos premios, el premio "Bernardo Houssay, 1987" y el "Juan Sábato, 2008".

**Luis A. Scidá**

Ingeniero Químico. Es docente de la FACET desde 1972 fecha en que se iniciara como Auxiliar Docente de 2da Categoría en la cátedra de Química General e Inorgánica. Actualmente se desempeña como Profesor Adjunto del Departamento de Física de la FACET en la cátedra Laboratorio de Física I, II y III. Es además investigador del Laboratorio de Ionósfera de esa Unidad Académica donde desarrolla actualmente su Tesis Doctoral. Es autor de numerosas publicaciones y presentaciones en reuniones científicas en las áreas de conocimiento de Microbiología, Físico Química, Enseñanza de las Ciencias y más recientemente en Física de la Alta Atmósfera. Es miembro activo de varios Programas y Proyectos de Investigación del en el área de conocimiento de Ciencias de la Tierra (alta atmósfera) y ha integrado numerosos tribunales de Evaluación Académica y en Concursos de Oposición y Antecedentes.

**Enrico Zuccheretti**

De nacionalidad Italiana, recibió en 1988 el título de Master en Ciencias Físicas de la “La Sapienza” Universidad de Roma, Italia. El Dr. Zuccheretti se desempeña actualmente como Senior Technologist en el Environmental Geophysics Laboratory del Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Roma, Italia. Sus áreas de interés son: mediciones de magnitudes ionosféricas, propagación de ondas en la ionósfera, radares de HF y VHF para estudios geofísicos e interfases entre instrumentos y computadoras. Su actividad principal esta centrada en el diseño de radares para aplicaciones geofísicas. Ha publicado numeroso artículos en revistas internacionales de la especialidad.

**Martín Guido Ferreyra**

Ingeniero Electrónico egresado de la Universidad Nacional de Tucumán. Desempeña sus tareas como Auxiliar docente graduado en el Laboratorio de Física Experimental de la FACET-UNT. Realizó cursos de perfeccionamiento en el Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, en Trieste Italia. Formó parte de diversos proyectos de investigación en el Dpto. de Luminotecnia Luz y Visión y actualmente es integrante del proyecto “Estudio y Modelado de Magnitudes Ionosféricas para Sistemas de Comunicaciones y Navegación Satelital” en el Laboratorio de Ionósfera de la FACET-U.N.T.

**Silvina Alejandra Grupalli**

Ingeniera en Computación egresada de la Universidad Nacional de Tucumán. Desempeña sus tareas Profesional en el Laboratorio de Instrumentación de la FACET-UNT. Responsable de las áreas: Calidad e Informática del Laboratorio de Instrumentación Industrial. Integrante de proyecto de investigación ante el CIUNT desde el año 2005. Realiza trabajos de investigación en el área de la metrología industrial, y de instrumentación de variables de proceso.

**Carlos A. Iván**

Egresó de la UNT con el título de Ing. Electricista orientación Electrónica en el año 1992, se desempeña en la actualidad como Jefe de Trabajos Prácticos en materias del Dpto. de Electricidad Electrónica y Computación de la FACET. Participa como investigador en un Proyecto de investigación de la UNT y ha publicado trabajos científicos de la especialidad, y en el año 2009 ha sido aceptado para realizar estudios de Posgrado en la FACET-UNT.