

Nueva Estación Terrena para seguimiento de Satélites LEO

Miguel A. Salas Natera, Ramón Martínez, Ignacio Montesinos y Leandro de Haro-Ariet

{msalasn, ramon, nacho, leandro}@gr.ssr.upm.es

⁽¹⁾ Dpto. de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones. Universidad Politécnica de Madrid
ETSI de Telecomunicación. Ciudad Universitaria s/n. 28040 Madrid. ESPAÑA

Abstract- Since earth stations for downloading data from LEO (Low Earth Orbit) satellites use large reflector antennas has a number of impairments in terms of cost and mechanical complexity; furthermore, reflector antennas can track only one satellite at a time, so the efficiency of the earth segment is reduced. In order to improve the performance of traditional earth stations the feasibility of other antenna technologies must be evaluated, such conformal adaptive antennas based on multiple planar arrays like geodesic antenna array (GEODA). This antenna has a number of advantages over large dishes and the efficiency to track several satellites simultaneously depends on the number of antenna elements, beamforming algorithm and the correct calibration of the antenna arrays. In this paper a brief introduction of the development of the new generation of earth station is presented.

I. INTRODUCCIÓN

Las estaciones de seguimiento de satélites que forman el segmento terreno y de control de una misión espacial presentan como factor común la presencia de una antena reflectora de un gran diámetro. Dependiendo de las características de la misión, la apertura de la antena varía en función de la tasa binaria de los datos que debe descargar del satélite.

El uso de grandes reflectores implica una serie de problemas cuando su diámetro supera unos determinados límites [1]. El coste de un reflector crece con su diámetro, debido en gran parte a la necesidad de instalar un complejo sistema mecánico que permita orientar la antena para seguir al satélite en su trayectoria. Además, el coste de operación y mantenimiento es muy elevado. Por otro lado, los errores en la superficie del reflector durante el proceso de fabricación aumentan al hacerlo el diámetro, lo que limita la operación de la antena en frecuencias elevadas. Finalmente, decir que la una antena reflectora sólo puede seguir un satélite de forma simultánea, reduciendo la eficiencia de utilización de la red terrena.

En consecuencia, el uso de otras tecnologías de antena será una necesidad en los próximos años. Una posibilidad se plantea en este artículo, y es el uso de agrupaciones de antenas de pequeña apertura con capacidad de conformación de haz en las estaciones terrenas.

Esta contribución se centra en el proceso del desarrollo del Test-Bed, que tiene como finalidad estudiar la fiabilidad de los algoritmos a implementar en las nuevas estaciones terrenas; el diseño de la arquitectura del receptor, etapa de conformación de haz y algoritmos de calibración.

II. ALCANCE DEL PROYECTO

El principal objetivo de este trabajo, es explicar algunas de las contribuciones para el desarrollo de la estación terrena de seguimiento de satélites, conocida como GEODA [2], y ésta representa una alternativa tecnológica a los grandes reflectores utilizados actualmente en el sector terreno de las comunicaciones satelitales.

Para el desarrollo de nuevas estaciones terrenas con antenas inteligentes, conformadas sobre una geometría geodésica como la GEODA, se ha realizado como una primera aproximación un Test-Bed [3] para seguimiento de Satélites en órbita LEO, con el objetivo de analizar el comportamiento de los algoritmos que serán implementados y extrapolados luego en la GEODA.

En un primer momento se pensó en utilizar las señales HRPT en la banda VHF y LRPT en la banda L del satélite meteorológico MetOp-A, con las que la utilización de algoritmos de conformación basados en referencia temporal es apropiada debido a la transmisión de la palabra única (UW) entre tramas. Los transmisores HRPT y LRPT del MetOp-A han tenido problemas y fue necesario apagarles para que no causasen interferencias y problemas en el resto de equipos de medición a bordo. Por lo anterior, se ha continuado el proyecto con la señal APT (Automatic Picture Transmission) a 137 MHz proveniente de los satélite NOAA, y se han implementado algoritmos de conformación basados en referencia espacial y ciegos.

III. TEST-BED PARA SEGUIMIENTO DE SATÉLITES LEO

El Test-Bed está formado por cuatro módulos principales. El primero es el array de antenas compuesta por 4 antenas de dipolos cruzados [4]. El segundo parte está constituida por el circuito de radiofrecuencia a frecuencia intermedia (RF-FI), mostrado en la Fig. 1. El circuito RF - IF se encarga de la mezcla de las señales de entrada con el oscilador local, de la amplificación y el control automático de ganancia.



Fig. 1. Circuito RF-FI.

El tercer módulo consiste en la plataforma SDR, que incluye un programa en C++ y los firmwares programados en VHDL con la arquitectura de receptor implementada para la FPGA (Field Programmable Gate Array) utilizada. El programa en C++ se encarga de configurar la FPGA, seleccionando el modelo de receptor a introducir con el firmware. Esta aplicación en C++ es capaz de cambiar la configuración de la FPGA, por tanto de actualizar y reconfigurar los firmwares. Un caso de ejemplo, es el que se describirá más adelante y se refiere a la calibración del array, donde es necesario generar cambios de amplitud y fase en las señales de entrada. El último módulo que conforma al Test-Bed es un receptor comercial APT.

A. Arquitectura de Receptor Software Defined Radio.

La arquitectura del receptor para el caso en concreto del Test-Bed, depende del tipo de algoritmo de conformación seleccionado, distinguiendo entre aquellos los que realizan la conformación tras la demodulación y los que la realizan previamente, arquitecturas SC (Symbol Combining) y FSC (Full Spectrum Combining) respectivamente. Las arquitecturas SC requieren un mayor uso de recursos dado que implican la demodulación de la señal proveniente de cada antena Fig. 2. Por otro lado, los algoritmos de conformación ciegos y los basados en referencia espacial implementados en este trabajo, no requieren de la demodulación de la señal, y son implementados con arquitecturas FSC como se muestra en la Fig. 3.

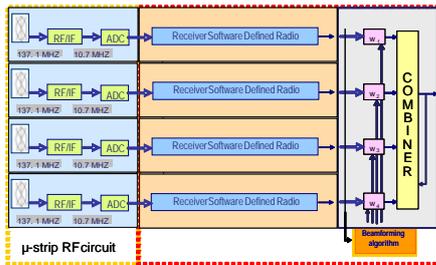


Fig. 2. Arquitectura SC con algoritmo de conformación basado en referencia temporal

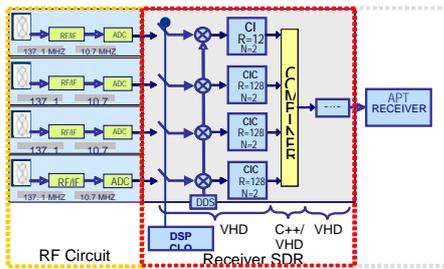


Fig. 3. Arquitectura FSC con algoritmo de conformación basado en referencia espacial o ciego.

B. Algoritmos de Conformación.

Con el objetivo de procesar las señales recibidas por los elementos que componen el array de antena, un algoritmo de conformación debe ser implementado para computar los pesos adecuados que permitan combinar las señales coherentemente. La selección de los algoritmos de conformación depende de los siguientes factores:

- Recursos computacionales y de hardware.
- Para algoritmos de conformación adaptativos es importante analizar la velocidad de convergencia y los errores residuales.
- Requerimientos de calibración y de auto compensación.
- Características del sistema para seleccionar el algoritmo apropiado; *referencia temporal*, *referencia espacial o ciegos*

Es necesario hacer una breve introducción de los algoritmos de conformación analizados en este trabajo con algunos conceptos básicos. Para todos los casos, se puede expresar el resultado del algoritmo de conformación con la siguiente ecuación:

$$y = \underline{w}^H \underline{x} \quad (1)$$

Donde x es el vector que contiene las señales recibidas del array, w son los pesos calculados por el algoritmo de conformación, y $[\]^H$ denota la matriz traspuesta. Los algoritmos de conformación ciegos, no requieren de una secuencia de entrenamiento y aprovechan las propiedades inherentes de las señales con módulo constante. Éste es el caso para el algoritmo CMA (Constant Modulus Algorithm) [3]

Por otro lado, los algoritmos de conformación basados en referencia temporal requieren una secuencia de entrenamiento en la trama de la señal recibida, para poder seguir los cambios que presenta la dirección de llegada de la señal [5].

Así mismo, los algoritmos de conformación basados en correlación, al igual que los algoritmos ciegos no requieren la demodulación de las señales recibidas, y se basan en la matriz de correlación de las señales recibidas por el array de antenas. Estas técnicas son las más populares para obtener una estimación espacial con los algoritmos de conformación [6].

Los algoritmos de conformación basados en referencia espacial son muy apropiados para su aplicación en seguimiento de satélites, debido a que, la ubicación de los satélites puede ser obtenida con un propagador orbital como el SGP4 a partir de los datos orbitales. El correcto funcionamiento de estos algoritmos y el cálculo de la dirección de llegada de la señal dependen de los resultados de la calibración.

C. Algoritmos de Sincronismo.

En la implementación del receptor digital para la señal LRPT del satélite MetOp-A y conseguir los requerimientos del sistema, fue necesario seguir una metodología que resumida a continuación. El primer paso consistió en el análisis de los algoritmos de sincronización en función de la SNR y la Frecuencia Doppler, en esta etapa, se evaluaron algoritmos feedback y feedforward propuestos en la literatura [7][8]. Esta primera etapa fue realizada con las herramientas de análisis Simulink® y Matlab®.

Para el siguiente paso, se trasladó el diseño a System Generator® e ISE™ de Xilinx. El esquema resultante con una arquitectura SC está presentado en Fig. 4. Este esquema se ha denotado como TR FFT ML, porque esta compuesto por el Recuperador de tiempo de Gardner TR, El recuperador de portadora feedforward por FFT (Fast Fourier Transform), que realiza una corrección gruesa de la frecuencia Doppler; y finalmente está el recuperador de portadora feedforward de máxima similitud ML (Maximum Likelihood), que se encarga de corregir los errores de frecuencia Doppler residuales de la etapa anterior.

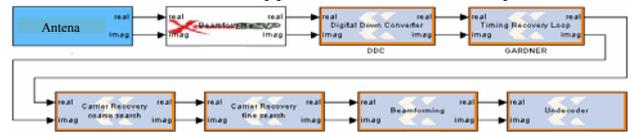


Fig. 4. Receptor Digital TR FFT ML en System Generator.

De este proceso se obtuvieron resultados del comportamiento del receptor en simulaciones, muy parecidos al que tienen los firmwares en la FPGA (Fiel Programmable Gate Array).

D. Implementación.

El diagrama de bloque que representa la plataforma software implementada en el Test-Bed se muestra en la Fig. 5. Dependiendo del firmware seleccionado se tienen tres opciones en el Test-Bed, que determinan el firmware a instalar en la FPGA.

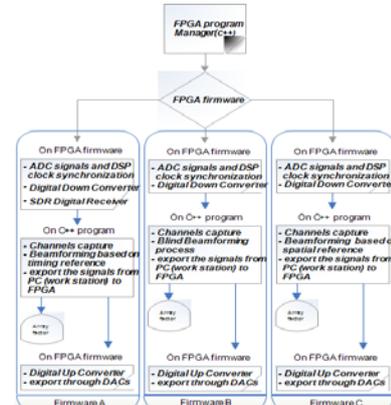


Fig. 5. Diagrama de bloques del Test-Bed.

La opción A está programada para trabajar con los algoritmos de conformación basados en referencia temporal (arquitectura SC). Las opciones B y C están diseñadas con una arquitectura de receptor FSC; y tienen implementado algoritmos de conformación ciegos y basados en referencia espacial, respectivamente. En la implementación se han utilizado dos plataformas hardware. La primera de ellas es una tarjeta Virtex4 BenADC, que tiene acoplada una FPGA Virtex4 – SX55. Esta tarjeta tiene 4 entradas analógicas de 12 bits y ADCs (Analog-to-digital Converter) con reloj DSP de 250 Msps. La segunda es una BenADDA con la FPGA Virtex4 – SX35 acoplada. Esta tarjeta tiene 2 entradas y 2 salidas analógicas de 14 bits y reloj de 105 Msps.

IV. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ESTACIÓN TERRENA GEODA

Con el objeto de mejorar las prestaciones de las estaciones terrenas tradicionales, se ha trabajado en el desarrollo de una antena conformada inteligente basada en arrays planos dispuestos sobre una geometría geodésica dodecaédrica (GEODA). Este es el objetivo principal del proyecto para el desarrollo de una nueva generación de estaciones terrenas para comunicaciones satelitales.

La antena tiene definidas dos estructuras geométricas. La primera está formada por 30 paneles triangulares que conforman un cilindro. La segunda, está formada por otros 30 paneles dispuestos sobre un domo dodecaédrico, como se puede apreciar en la Fig. 6.

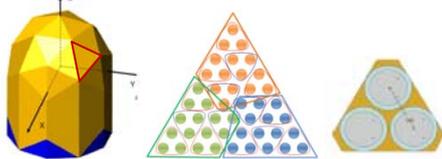


Fig. 6. Estructura de la antena GEODA, Array plano triangular y sub-array.

El array plano triangular con el que está compuesto la GEODA se muestra en la Fig. 6, y ésta compuesto por 45 parches circulares dobles como elemento radiante con su respectivo circuito de RF. A su vez, este panel triangular está sub-dividido por 15 sub-arrays de 3 elementos. La estación terrena GEODA ha sido diseñada para trabajar en la banda de 1.7 GHz para seguimiento de satélites LEO. Una descripción del sistema electrónico, de los circuitos de RF y la celda básica esta presentada en [2].

V. SITUACIÓN PARA LA CALIBRACIÓN DE LA ANTENA INTELIGENTE DE LA ESTACIÓN TERRENA GEODA

Como base fundamental en el procesamiento de las señales en la GEODA, y de la implementación de los algoritmos de conformación basados en referencia espacial, está la implementación de los algoritmos de calibración Off-line y On-line. El correcto funcionamiento de los algoritmos de conformación basados en referencia espacial y el cálculo de la dirección de llegada de la señal, dependen de los resultados de la calibración de la antena.

El diagrama que representa la metodología para el desarrollo del algoritmo de calibración a implementar, está presentado en la Fig. 8. La metodología está dividida en tres etapas secuenciales: Primera, las simulaciones de los algoritmos de calibración Off-line y On-line; segundo, la implementación del algoritmo de calibración Off-line basado en las medidas de la antena en cámara anecoica; y por último, la implementación del algoritmo de calibración On-line y las pruebas de campo.

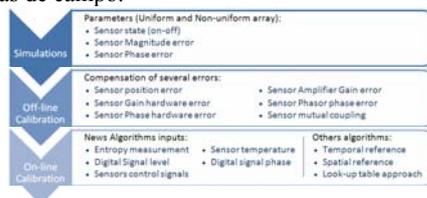


Fig. 7. Diagrama de metodología de Calibración.

Los algoritmos de calibración Off-line se pueden separar en dos grupos (Fig. 9). El primer grupo de técnicas [9][10] se basa en la inyección de un tono de igual fase a todos los trayectos de la antena, y con esto se considera en la calibración las diferencias de los trayectos. El segundo grupo [11][12] se basa en el procesamiento de señales proveniente de una dirección conocida. Estas técnicas compensan los errores de posición, fase y ganancia; y los efectos de acoplamiento mutuo de los sensores.

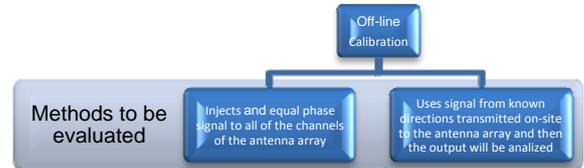


Fig. 8. Métodos de calibración Off-line.

Para la calibración On-line existen diversos métodos para obtener la matriz de compensación y aplicarla para la calibración del array en condiciones de funcionamiento. Algunos de estos métodos pueden ser clasificados como se muestra en la Fig. 10.

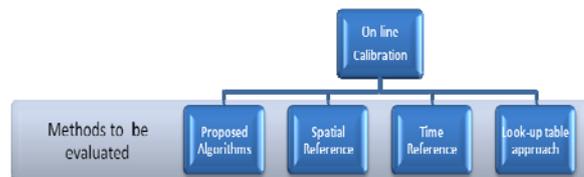


Fig. 9. Métodos de calibración On-line.

VI. GEODANALYSIS: PLATAFORMA DE SIMULACIÓN

Para la etapa de simulaciones de la calibración de la GEODA, se ha desarrollado una herramienta en Matlab®, con la que es posible realizar diferentes simulaciones que permiten analizar el comportamiento de la antena, Fig. 11.

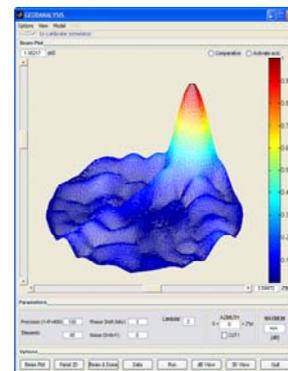


Fig. 10. Interfaz de la herramienta de simulación GEODANALYSIS.

Su función principal calcula el campo eléctrico lejano en función de los ángulos de la dirección de apuntamiento del haz, el número de bit de los desfases, la geometría de la antena, un ruido opcional a agregar en la fase para reducir los cambios bruscos en la dirección de apuntamiento y los errores de posición, magnitud, fase y pérdida de los sensores. Las simulaciones siguen el modelo de Monte Carlo.

VII. RESULTADOS

Algunos resultados del desarrollo del Test-Bed para seguimiento de Satélites LEO son presentados en este apartado, seguidos de los resultados parciales de las simulaciones para la calibración de la antena inteligente GEODA.

La Fig. 12.(a) muestra los resultados obtenidos de las simulaciones en System Generator® de la tasa de bit erróneos en función de la relación señal ruido, con las condiciones de propagación del canal radio. La Fig. 12.(b) muestra la constelación

resultante de las medidas realizadas en el banco de pruebas y un generador de señal al Test-Bed con los circuitos de RF integrados.

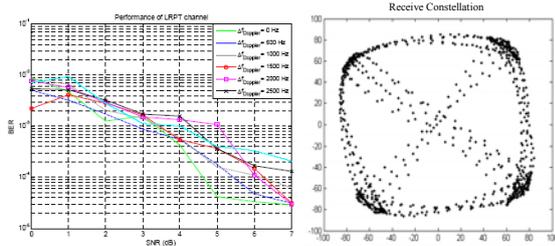


Fig. 11. (a) Curva BER vs SNR. (b) Captura de la constelación con el circuito RF integrado a la SDR.

El desempeño óptimo del recuperador de sincronismo de tiempo del receptor digital, se comprueba con los resultados presentados en la Fig. 13, donde se aprecia el seguimiento de los errores de tiempo del detector de error de Gardner, y la recuperación del tiempo de bit en el espectro de la señal del reloj generado por el recuperador de sincronismo de tiempo.

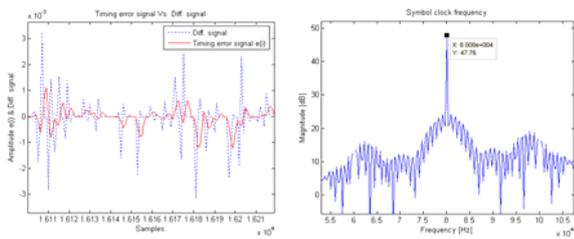


Fig. 12. Comportamiento del recuperador de sincronismo de tiempo de Gardner. SNR = 5 dB y $\Delta f \cdot T = 0.3$.

La Fig. 4 (a) compara la convergencia de los algoritmos de conformación. La Fig. 4 (b) muestra el tiempo de cómputo de los distintos algoritmos. En estas simulaciones el factor de olvido es igual a 1, y el factor de regulación a 100. La señal utilizada emula la APT con una frecuencia de RF de 20 KHz y tamaño de las imágenes de 72x101 píxeles. Los escenarios son sin interferencias ó con interferencias muy débiles, y una SNR de -5 dB.

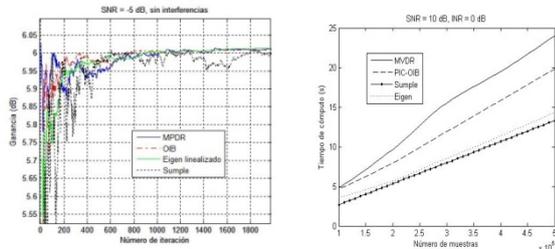


Fig. 13. Comparación de algoritmos de conformación. (a) Convergencia. (b) Complejidad computacional.

Se observa que el algoritmo SUPPLE tiene peor comportamiento en cuanto a velocidad de convergencia y varianza, pero aún así los algoritmos son muy similares. Además, el SUPPLE presenta un mejor comportamiento que el resto en caso de averías o desconexiones en antenas. Los algoritmos basados en referencia espacial se comportan mejor a bajas SNR y los ciegos a altas SNR.

Como resultados parciales de la calibración de la antena inteligente GEODA, se presentan las curvas de desviación de la dirección de llegada respecto a la varianza de los errores introducidos, las pérdidas del array en una simulación con errores de posición, magnitud y fase; y las curvas de la fase del steering vector de un array triangular de la GEODA, compensando y sin compensar los errores introducidos (Fig. 14).

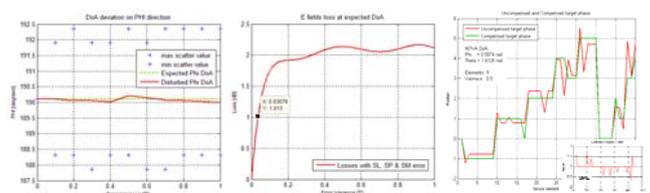


Fig. 14. (a) Desviación de la DoA en PHI en función del error introducido. (b) Pérdidas en la ganancia del array por las pérdidas introducidas en la simulación. (c) Fase del Steering Vector compensado y sin compensar.

VIII. CONCLUSIONES

En la presente contribución se han presentado las fases más importantes del diseño de un Test-Bed para seguimiento de Satélites LEO, con un array de 4 antenas de dipolos cruzados. Además se ha mostrado la versatilidad modular que ofrecen las arquitecturas sobre plataformas SDR, como también resultados parciales, donde se muestra el óptimo desempeño de los algoritmos que conforman el Test-Bed. Por otro lado, se ha presentado el objetivo principal del proyecto, haciendo una descripción de la estación terrena con la antena inteligente conformada GEODA, como la situación y metodología para su calibración; y resultados parciales de la misma.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer al Ministerio de Educación y Ciencia (MEC) y a INSA (Ingeniería y Servicios Aeroespaciales S.A.) por la financiación parcial de este proyecto de investigación.

REFERENCES

- [1] A. Torre, J. Gonzalo, R. M. Pulido, R. Martínez, "New Generation Ground Segment Architecture for LEO Satellites," in *Proc. 57th IAC (International Astronautical Congress)*, Valencia, Spain, 2nd-6th Octubre, 2006.
- [2] I. Montesinos-Ortego, J.L. Masa, M. Sierra-Pérez, J.L. Fernández-Jambrina, "Pyramidal Adaptive Antenna of planar arrays for Satellite Communications," *EuCAP*, Noviembre 2007.
- [3] M. A. Salas Natera, R. Martínez Rodríguez-Osorio and I. García-Rojo López, "Design of an Adaptive Antenna Array Test-Bed based on Software Radio for Tracking Leo Satellites", *EuCAP*, Edinburgh, Noviembre 2007.
- [4] MX-137: Active VHF-ANTENNA for on-board reception of polar orbiter weather satellites, WRAASE GMBH, http://www.wraase.de/mx137_e.htm.
- [5] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, 4th ed., Prentice-Hall, 2002.
- [6] D. H. Rogstad, "The SUPPLE Algorithm for Aligning Arrays of Receiving Radio Antennas: Coherence Achieved with Less Hardware and Lower Combining Loss," *Jet Propulsion Laboratory*, TDA Progress Report 42-130, Agosto 1997.
- [7] S. Hinedi, B. Shah, "Acquisition Performance of Various QPSK Carrier Tracking Loops," *IEEE Transaction on Communications*, Vol. 40, pp. 1426 – 1429, Sept. 1992.
- [8] Miguel A. Salas Natera, Ramón Martínez Rodríguez-Osorio, Leandro de Haro Ariet, "Analysis of antenna array receivers configurations for satellite earth station modems", *IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems ISWCS*, Trondheim (Norway), Octubre 2007.
- [9] R. Ertel, Z. Hu, and J. Reed, "Antenna Array Hardware Amplitude and Phase Compensation Using Baseband Antenna Array Outputs," *1999 IEEE Vehicular Technology Conference Proceedings*, vol. 3, pp. 1759-1763, 1999.
- [10] G. Tsoulos and M. Beach, "Calibration and Linearity issues for an Adaptive Antenna System," *1997 IEEE Vehicular Technology Conference Proceedings*, vol. 3, pp. 1597-1600, 1997.
- [11] Y. Chen, A. Chang, and H. Lee, "Array Calibration Methods for Sensor Position and Pointing Errors," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 26, pp. 132-137, 2000.
- [12] C. See, "Sensor array calibration in the presence of mutual coupling and unknown sensor gains and phases," *Electronics Letters*, vol. 30, pp. 373-374, March 1994.