

PREDICCIÓN Y SIMULACIÓN DE LAS ZONAS DE VISIBILIDAD DE RADAR EN 3D, EN EL TERRITORIO DE CUBA

Ing. David Álvarez Cañizares¹, DrCs Nelson Chávez Ferry²

¹Cujae, La Habana, Cuba. david.alvares@electronica.cujae.edu.cu

²Cujae, La Habana, Cuba. nelson@electronica.cujae.edu.cu

RESUMEN

La predicción y simulación de las zonas de visibilidad correspondientes a radares ubicados en la superficie terrestre es un problema actual e importante que requiere de soluciones que permitan un empleo más eficaz de las estaciones de radar de las que se dispone. En este trabajo se muestra y se fundamenta un método para la predicción y simulación de estas zonas, el cual se basa en la ecuación de radar y tiene en cuenta la refracción atmosférica, el relieve del terreno, los tipos de blancos a ser detectados y los radares a ser empleados. Utilizando este método y teniendo en cuenta los trabajos ya realizados en Cuba con relación a la determinación de las zonas de visibilidad de radar, se desarrolló un software que permite hacer estos cálculos automáticamente de manera rápida y más eficiente, dándose especial atención a la representación en tres dimensiones de los resultados.

Palabras claves: radar, zona de visibilidad, ecuación de radar, representación en tres dimensiones, software

ABSTRACT

Prediction and simulation of detection zones (radar coverage) of land based radars is an actual and important problem, requiring solutions which lead to a more efficient use of the available radar stations. In this paper is presented and supported a method for the prediction and simulation of these zones, based on the radar equation, which takes into account the atmospheric refraction, terrain relief, types of radar targets to be detected and the radar stations to be used. Based on this method and taking into account the research works previously made in Cuba in this area, was developed a software that allows these calculations in an efficient and faster way and that centers especial attention on three dimensional representations of the results.

Key words: radar coverage zone, radar equation, three dimensional representations, software

INTRODUCCIÓN

Hoy en día los sistemas de radar tienen un amplio impacto en diferentes esferas de la sociedad, como son; la defensa, el control del tráfico aéreo, la meteorología, la geofísica espacial y otras aplicaciones.

Para el empleo más eficaz de estos sistemas, resulta crucial conocer “a priori” la probable cobertura de radar desde un emplazamiento dado, mediante la simulación computacional, pues en la práctica realizar mediciones en el terreno, emplazando un radar en la posición deseada, no es la solución más económica, para evaluar si se cumplen o no con las expectativas.

Existen programas (software) para el cálculo de radio enlaces, que tienen en cuenta el relieve del terreno y otros fenómenos influyentes, que pueden ser empleados para estimar la zona de visibilidad directa (ZVD) de radar desde una posición determinada, pero resultan poco prácticos y no facilitan este tipo de estimación.

Por estas razones, durante el año 1993, el Laboratorio de Investigaciones Científicas del Instituto Técnico Militar “José Martí”, desarrolló en base a algoritmos propios, un programa para estimar las Zonas de Visibilidad de Radar (ZVR) y de visibilidad directa, en el territorio cubano. Este software, aunque revolucionario en su época, no se ajusta a las necesidades impuestas por el desarrollo tecnológico actual, pues la resolución del mapa digital altimétrico empleado es muy baja, los modelos de cómputo anticuados, la interfaz con el usuario muy rígida y no permite mostrar los resultados en tres dimensiones. Para dar respuesta a este problema, se desarrolla el proyecto denominado “Sistema para la Predicción, Simulación y Análisis Automatizado de las Zonas de Visibilidad del Radar en el Territorio de Cuba”, que se lleva a cabo en el Grupo de Radar del Departamento de Telecomunicaciones y Telemática de la Facultad de Ingeniería Eléctrica del Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría” (CUJAE).

LA ECUACIÓN DE RADAR

El método de cálculo empleado para la predicción de la zona de visibilidad de radar (ZVR) está basado en la ecuación de radar. Este método arroja resultados aproximados que van perdiendo precisión a medida que la distancia al blanco aumenta. No obstante, sobre la base del conocimiento y la experiencia acumulados a partir de la solución obtenida en 1993 (software ZVR), la aproximación lograda es aceptable para los fines prácticos.

De la bibliografía básica sobre radar [1, 2, 3], se conoce que la ecuación de radar viene dada por la ecuación

$$R_{max} = \left(\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma_0}{(4\pi)^3 k_B T_e B_n F L (SNR)_{0min}} \right)^{1/4} \quad (1)$$

siendo: P_t la potencia del transmisor, G la ganancia de la antena transmisora - receptora, λ la longitud de la onda transmitida, σ_0 la superficie efectiva de reflexión del blanco a ser detectado, k_B la constante de Boltzman, T_e la temperatura efectiva de ruidos del sistema receptor, B_n el ancho de banda del receptor, F la cifra de ruido del receptor, L el coeficiente de pérdidas del sistema y $(SNR)_{0min}$ la relación señal a ruido mínima, a la salida del receptor.

INFLUENCIA DE LA REFRACCIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Sobre la propagación de las ondas ejercen una influencia particular las condiciones de la troposfera. Estas vienen dadas por la permitividad dieléctrica del aire y por su índice de refracción, cuyo valor en la superficie de la Tierra es algo mayor que uno y depende de la presión, la temperatura y la humedad en la atmósfera. El índice de refracción varía con la altura. Debido a esto las ondas de radio, no se propagan linealmente sino por una trayectoria curva. Este fenómeno se conoce como refracción.

La trayectoria curva por la cual se propagan las ondas de radio se caracteriza por su radio ρ , el cual está relacionado con la rapidez de las variaciones del índice de refracción del aire debido a la altura h , de la forma siguiente, según [4].

$$\rho = \frac{1}{6\left(-\frac{\partial \eta \epsilon}{\partial h}\right)} \quad (2)$$

El signo menos muestra que la trayectoria será cóncava (hacia abajo) cuando el coeficiente de refracción del aire disminuye con la altura, y convexa cuando el índice de refracción aumenta con la altura.

Generalmente, para simplificar estos cálculos se utiliza el concepto de radio efectivo de la Tierra, cuyo sentido es que la trayectoria curva de las ondas de radio se convierte en recta [4]; en este caso, el radio real a de la Tierra, se sustituye por un radio efectivo a' que se diferencia del real en una magnitud denominada coeficiente de refracción k , y que se expresa como

$$k = \frac{a'}{a} = \frac{1}{1+\frac{a}{\rho}} = \frac{1}{1+a\frac{\partial \eta \epsilon}{\partial h}} \quad (3)$$

Según los valores de k , la troposfera se clasifica en:

1. Conductiva, $k < 0$
2. Sub-refractiva, $0 < k < 1$
3. Normal, $1 < k < 4/3$
4. Súper-refractiva, $k > 4/3$

EL EFECTO DE LOS OBSTÁCULOS

Las montañas o edificios cerca del radar afectan la propagación de las ondas de radio, de forma tal que se ve afectada también la zona de visibilidad. Es posible en este concepto utilizar el método de los segmentos [5]. De acuerdo a la distancia entre el radar y el obstáculo, la altura del radar y la del obstáculo, es posible calcular el “ángulo de cierre” provocado por el obstáculo. La región comprendida detrás del obstáculo y dentro del ángulo de cierre es una zona ciega donde no podrán ser localizados los blancos de radar.

EL EFECTO DE LA CURVATURA DE LA TIERRA EN EL PERFIL DEL TERRENO

La superficie de la tierra es curva y mientras mayor es la distancia entre dos puntos en la superficie, más se afecta la visibilidad directa entre ellos. Por esta razón se realiza una corrección a la altura de cada punto del relieve. Supongamos que r es la distancia desde el radar hasta un punto del relieve en el plano tierra y es la altura de la circunferencia que representa la curvatura de la tierra en el punto en cuestión, ΔH es la corrección de la altura y R_0 es el radio de la tierra. Entonces se puede calcular y a través de la ecuación: [6]

$$\Delta H = -\frac{r^2}{2R_e} = -\frac{r^2}{2kR_0} \quad (4)$$

Donde R_e es el radio efectivo de la tierra

DETECCIÓN DE OBJETIVOS EN PRESENCIA DE FLUCTUACIÓN DE LA SUPERFICIE EFECTIVA DE REFLEXIÓN (SER) DEL BLANCO

Durante el proceso de detección y de seguimiento se manifiesta un movimiento relativo entre el blanco y el radar, variando el ángulo de incidencia de la señal de sondeo, trayendo como consecuencia que el valor de la SER fluctúe. A esta SER se conoce como SER dinámica. La SER dinámica puede fluctuar en amplitud y/o fase. Las fluctuaciones de fase causan que la onda reflejada no sea plana, lo que para la mayoría de las aplicaciones, introduce errores en la medición de la posición angular del blanco y no son de mucha importancia. Sin embargo, en caso de que se requiera una gran precisión, la fluctuación de fase es un factor que se debe tener en cuenta.

Las fluctuaciones en amplitud, pueden variar lenta o rápidamente, en dependencia del tamaño, la forma, y la velocidad de cambio de la posición relativa del blanco con relación al radar. Debido a la aleatoriedad en el comportamiento de la SER, existe la necesidad de modelarla estadísticamente como un proceso aleatorio. Muchos de estos modelos han sido desarrollados y verificados a través de mediciones experimentales.[5]

En presencia de fluctuación de la SER, la probabilidad de detección disminuye, o equivalentemente, se reduce la SNR. En este caso, según [1], el cálculo de la probabilidad de detección se realiza mediante la siguiente función densidad de probabilidad condicional de la estadística de decisión z , para un blanco fluctuante

$$f(z / \sigma_0) = \left(\frac{2z}{M\sigma_0^2/\sigma^2} \right)^{(M-1)/2} \exp \left(-z - \frac{M}{2} \cdot \frac{\sigma_0^2}{\sigma^2} \right) I_{M-1} \left(\sqrt{2Mz \frac{\sigma_0^2}{\sigma^2}} \right) \quad (5)$$

Finalmente para obtener la función de densidad de probabilidad de la señal reflejada por el blanco para objetivos fluctuantes se calcula

$$f(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f(z/\sigma_0) p(\sigma_0) d\sigma_0 \quad (6)$$

Donde $p(\sigma_0)$ es la función de densidad de probabilidad de la SER.

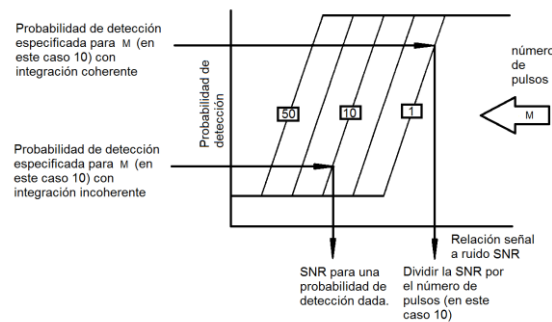


Figura 1. Convenciones usadas en los diagramas de probabilidad de detección.

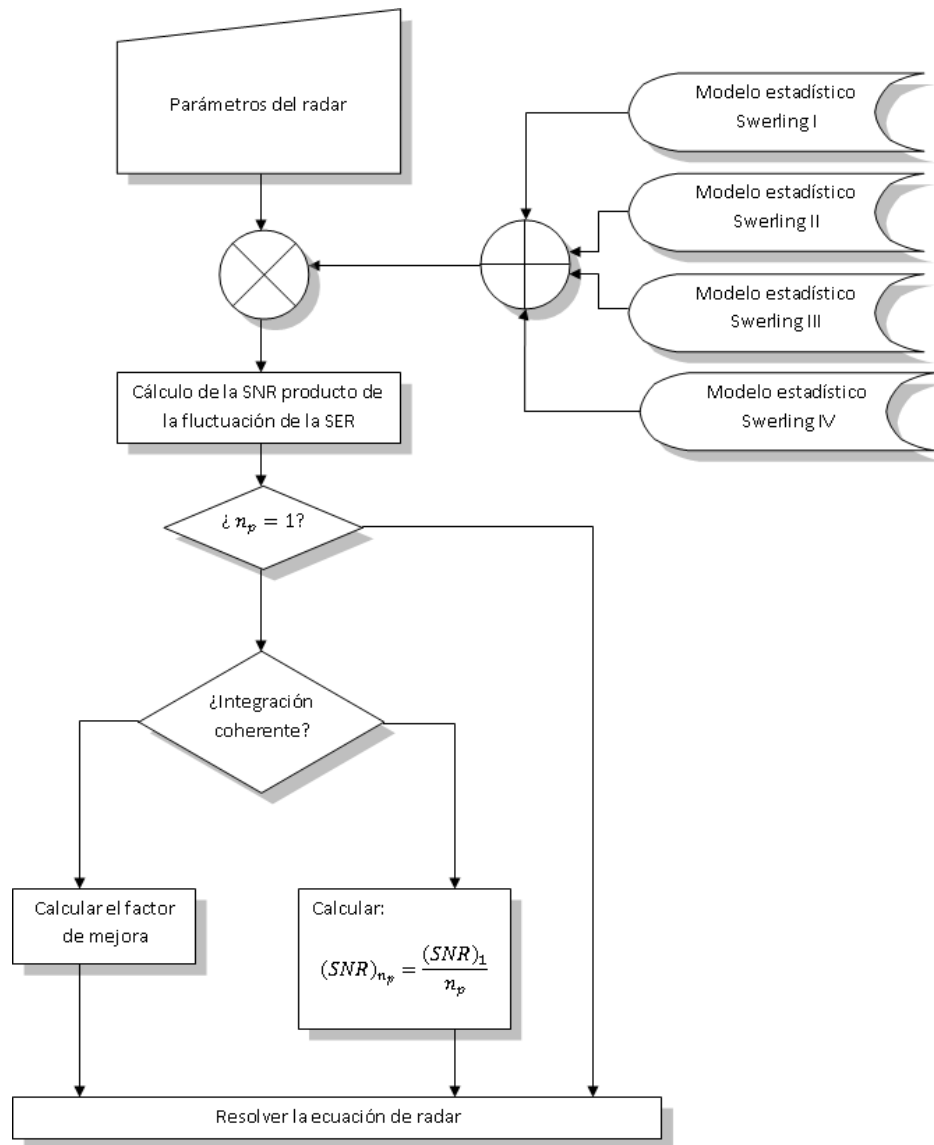


Figura 2. Diagrama en bloques para el cálculo de la ecuación de radar

La literatura refiere, para los cuatro modelos de fluctuación de la señal del blanco (Modelos de Swerling), un grupo de gráficas que muestra la probabilidad de detección en función de la SNR y del número de pulsos que se reciben. Todas tienen la forma aproximada de la Figura 1 y se separan para probabilidades de falsa alarma de 10^{-4} , 10^{-6} y 10^{-8} . Otros valores pueden ser estimados realizando una interpolación.

En la práctica este método resulta complicado de implementar debido a la gran cantidad de tablas que se tendrían que almacenar. No obstante en [1] se brinda un método simplificado que permite calcular el alcance máximo del radar asumiendo que son conocidos parámetros como la potencia, la ganancia de la antena, la longitud de onda, las pérdidas, el ancho de banda, la temperatura efectiva, el ancho del lóbulo principal del patrón de radiación, las probabilidades de detección y de falsa alarma, el tipo de

blanco y la cifra de ruido del receptor de radar. El algoritmo de la Figura 2 es una variante del mostrado en [1].

DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Se decidió clasificar los resultados obtenidos en el programa en dos grupos: los de carácter topográfico y los que poseen sentido desde el punto de vista del cálculo de la ZVR. A continuación se muestra una descripción de los mismos.

RESULTADOS DE CARÁCTER TOPOGRÁFICO

Se clasifican en este grupo porque sólo requieren como parámetros de entrada los valores altimétricos de la región, obteniéndose gráficos que poseen sentido únicamente topográfico y se muestran como sigue:

- Representación del perfil del terreno en un plano.
- Representación del perfil del terreno en tres dimensiones.

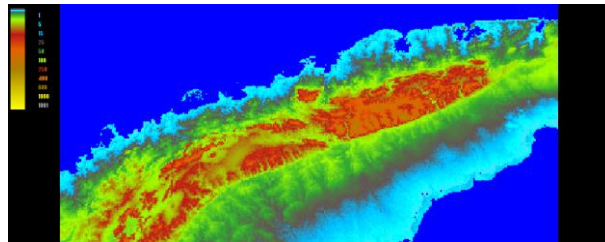


Figura 3. Representación del perfil de la zona de Pinar del Rio en un plano, obtenida con el software desarrollado.

Tanto la representación del terreno en un plano, como se muestra en la Figura 3, como el terreno en 3D, de la Figura 4, brindan información valiosa respecto al conocimiento de la región que se está estudiando. Nótese que en ambas imágenes se incluye una gradación de colores que representa la escala de alturas.

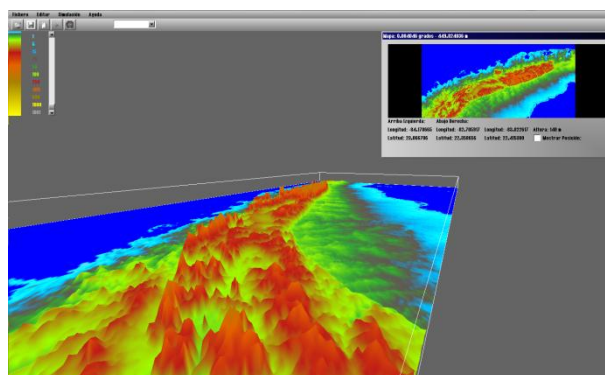


Figura 4. Representación del perfil de la zona de Pinar del Rio en tres dimensiones con una falsa escala de (1, 1, 10) obtenida con el software realizado.

Para el caso de la representación en 3D se han seleccionado diferentes escalas para las abscisas y las ordenadas. Para este caso se escogió una falsa escala de un metro para las abscisas y diez metros para las ordenadas. El uso de la falsa escala nos permite una mejor apreciación óptica de la simulación y es fundamental debido a la diferencia considerable existente entre las alturas de las elevaciones y la distancia horizontal, que es del orden de los kilómetros.

RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LA ZVR

Estos resultados, sin quitarle importancia a los resultados de carácter topográfico, son de especial interés para disímiles propósitos. En este caso y manera similar a los de carácter topográfico, se dividen en:

Representación de la ZVR en un plano.

Representación de la ZVR en tres dimensiones.

Los resultados de este tipo se mostrarán con un ejemplo. Para ello se escogerán un grupo de parámetros, los cuales se muestran en la tabla 1.

Tabla 1: Parámetros del radar para el cálculo de su ZVR

Ganancia Máxima	34 dB
Potencia del pulso	250 kW
Longitud de onda	10 cm
SER	1 m ²
Coeficiente de pérdida del sistema	10 dB
Inclinación de la antena	1.10 ⁰
Altura de la antena	30 m
Duración de pulso	1 us
Integración	Incoherente
Ancho de banda por duración de pulso	1
Frecuencia de repetición del pulso	1.8 kHz
Capacidad resolutive por azimut	10
Cifra de ruido del receptor	10 dB
Latitud	23.053690
Longitud	-82.4188770
Probabilidad de detección	0.5
Probabilidad de falsa alarma	0.000001
Modelo estadístico de fluctuación de la SER	Swerling I

Con estos parámetros se obtuvo los datos de salida que se muestran en la tabla 2.

Tabla 2: Datos de salida del software realizado para los parámetros mostrados en la tabla 1

Altura total sobre el nivel del mar	89 m
Relación señal a ruido mínima necesaria para detectar el objetivo	1,45 veces
Alcance máximo	60,85 km

La representación de la ZVR en un plano como se muestra en la Figura 5 es de gran importancia cuando se quiere conocer el desempeño del radar para una altura de objetivo dada. Es importante destacar que cuando se habla de la ZVR en un plano no se debe pensar que se trata de un plano que corta la ZVR, sino de la superficie curva que se forma al mantener una altura constante con respecto al nivel del mar cuando se tiene en cuenta la curvatura de la tierra.

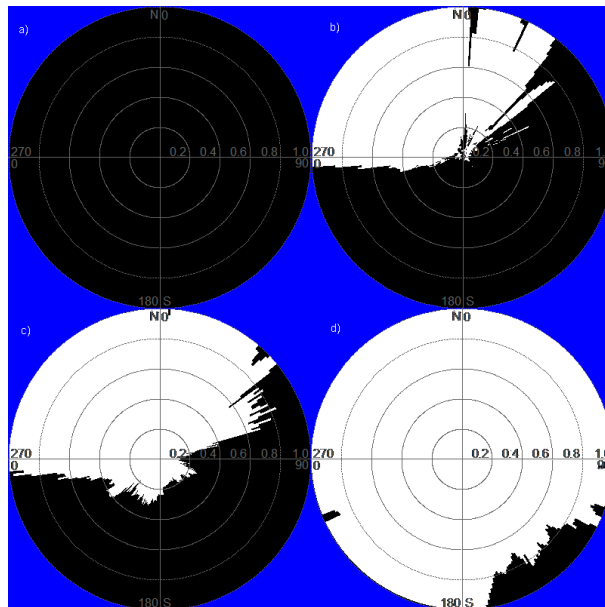
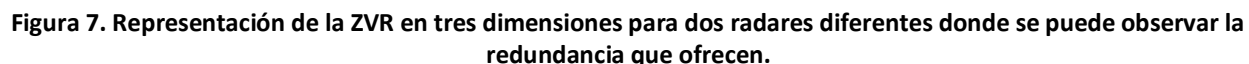
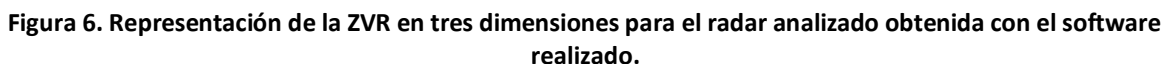


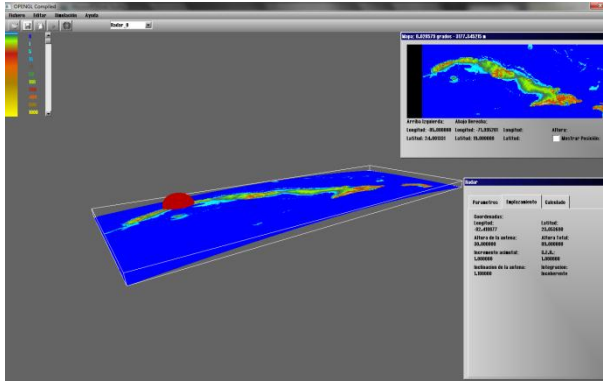
Figura 5. Representación de la ZVR en un plano a diferentes alturas para el radar analizado obtenida con el software realizado: a) 0m. b) 50m. c) 100m. d) 500m

La importancia fundamental de la representación en tres dimensiones, como se muestra Figura 6, radica en que brinda la posibilidad de conocer la estimación del alcance de radar desde un punto de vista espacial. Esta representación, puede entenderse como la integración de las superficies de visibilidad para todas las alturas posibles del blanco y esto permite observar la información de manera sencilla y rápida.

Aunque el solo hecho de representar la ZVR en dos y tres dimensiones es un resultado de impacto. En muchos casos es necesario estimar la cobertura de un radar en unión con la de los radares vecinos. Gracias a la forma en que se concibió el software, es posible representar la intercepción entre las zonas

Otra característica importante del nuevo software, es que tiene en cuenta la curvatura de la tierra. Puesto que aunque en la mayoría de los casos la curvatura de la tierra no es apreciable cuando se representa el terreno en 3D con una escala natural, es un factor importante a la hora de calcular la ZVR. Por ejemplo, cuando el Alcance máximo del radar es mayor de unos 60,85 km como el caso estudiado, con un factor de corrección del radio de la tierra $k = 4/3$ y tomando el radio de la tierra como 6370 km; se puede calcular ΔH a través de la expresión (4). Para este caso $\Delta H = 218$ m, lo cual representa una altura considerable. En la Figura 9 se puede observar esta característica.





REFERENCIAS.

- [1] R. Mahafza, B., Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB, C. Hall/CRC, Editor.2000.
- [2] M.I. Skolnik, Radar Handbook, Chapter 2, McGraw-Hill, 2nd edition, 1990.
- [3] M.I. Skolnik, Radar Handbook, Chapter 1, McGraw-Hill , 3rd edition, 2008.
- [4] López Diéguez, Y. and A. Meana Freyre, Sistema para cálculo de Radio Enlaces Punto a Punto en Ondas de Espacio, in Telecomunicaciones y Telemática. 2003, Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”: Ciudad de la Habana.
- [5] Wang, L.-W. and X.-S. Jiang. An Improved Radar Detection Range Plotting Method Based on Radar Equation. in The 2011 International Conference on Machine Learning and Cybernetics. 2011. Guilin.
- [6] Comas del Pino, C.A. and O. Cubas Fariñas, Análisis y simulación de enlaces de comunicación de punto a punto por microondas, in Telecomunicaciones y Wang, Telemática. 2011, Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”: La Habana.