

Optimización de sistemas Cassegrain utilizando algoritmos genéticos

Carlos Santos Rodríguez

Correo electrónico: carlos.santos@insmet.cu
Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba

Artículo Original

Ana Teresa Aday Martínez

Correo electrónico: ana@gedich.une.cu
Unión Eléctrica, La Habana, Cuba

Resumen

Este trabajo constituye una propuesta de optimización de un sistema de radiación parabólica, en su variante Cassegrain, utilizando algoritmos genéticos (AG). Esta novedosa herramienta matemática se abre paso en la actualidad en el campo del electromagnetismo, llegando a emplearse como una vía de solución exitosa a diversos problemas propios de las antenas. En los últimos años han aparecido diferentes softwares que implementan los AG, tal es el caso del MATLAB 7.8.0, que será utilizado en este material para la optimización de un fenómeno que limita el buen desempeño de los sistemas Cassegrain, el bloqueo central. El artículo es un intento por introducir el empleo de los AG y su capacidad multiobjetivo para la optimización de estos sistemas, tema del que no se tienen referencias en el país. Asimismo se emplea la herramienta de análisis de reflectores ICARA, que permite realizar la simulación de las características de radiación de diferentes configuraciones de antenas parabólicas, para su posterior análisis.

Palabras clave: optimización, AG multiobjetivo, sistema Cassegrain, bloqueo central, pérdidas por bloqueo.

Recibido: 20 de noviembre del 2011

Aprobado: 18 de diciembre del 2011

INTRODUCCIÓN

El empleo de los AG para la solución de problemas vinculados a la ingeniería no es nuevo. Los primeros estudios sobre estos, hechos por John Holland, [1] demostraron ser una importante contribución a las aplicaciones científicas y de ingeniería. Desde entonces, los resultados de los procesos investigativos en este campo han crecido exponencialmente y se han extendido por la comunidad académica internacional. Estos algoritmos son procesos estocásticos, discretos y no lineales, con un marcado carácter evolutivo. La solución óptima que se obtiene es un producto final que contiene los mejores elementos de las generaciones previas, donde los atributos de los individuos más fuertes tienden a ser copiados en las siguientes generaciones. La regla que sigue este proceso es la "supervivencia del más fuerte".

Por su parte las antenas parabólicas de doble reflector se utilizan extensamente en comunicaciones espaciales y radioastronomía, además de comunicaciones terrestres. Este tipo de antena ofrece algunas ventajas sobre las antenas de

un solo reflector y, aunque pueden tener diseños diferentes, comparten un conjunto de aspectos básicos comunes. Dentro de las diversas configuraciones de estas, la más empleada es la Cassegrain y su limitación principal es el bloqueo central. Este problema no ha sido importante en los telescopios ópticos en los que las características del patrón de difracción no son severas y por la corta longitud de onda de la luz. En el caso de microondas estas condiciones no se dan y la presencia del subreflector opaco a la energía electromagnética produce un hueco en la iluminación que da como resultado reducción de la ganancia y aumento de los niveles de los lóbulos laterales [2]. Por estas razones es que la optimización de las pérdidas asociadas al fenómeno del bloqueo central, contando para ello con los AG, resulta tan importante.

ALGORITMOS GENÉTICOS

Los AG están inspirados en el mecanismo de selección natural, un proceso biológico donde el individuo más fuerte

será el ganador de los recursos en un ambiente competitivo. Aquí, los AG utilizan una analogía directa de la evolución natural. En estos, la solución potencial a un problema es un individuo que se puede representar con un conjunto de parámetros, conocidos como genes. El conjunto de todos los parámetros (genes en la terminología de los AG) se codifica en una cadena de valores denominada cromosoma. Un valor positivo, generalmente conocido como valor de aptitud, es utilizado para reflejar en qué grado el cromosoma representa la solución a un problema específico.

El funcionamiento del algoritmo comienza con la generación de una población de individuos de forma aleatoria, el tamaño de esta población depende del problema en cuestión. En cada ciclo de operación genética, denominado proceso evolutivo, se crea una generación subsecuente a partir de cromosomas de la población actual. La población se evalúa mediante una función de aptitud. Este proceso solo será exitoso si un grupo de cromosomas, generalmente llamado "padres", son seleccionados de tal forma que los genes de los padres sean mezclados y recombinados para producir la descendencia. Esta mezcla del material genético permite que las especies evolucionen con mayor velocidad de lo que lo harían si tuvieran solo la copia de los genes de uno de sus progenitores. Se espera que de este proceso de evolución el mejor cromosoma creara un mayor número de descendientes, y así tendrán una mayor probabilidad de supervivencia en la generación subsecuente, emulando el mecanismo natural de "supervivencia del más fuerte". Para entender con mayor claridad el funcionamiento de un AG simple se puede observar la figura 1, donde se muestra el código de un AG estándar [3].

Optimización multiobjetivo

En muchas ocasiones las funciones de aptitud de los AG tienen más de un objetivo que optimizar, los cuales pueden estar en contradicción. Esto se conoce como el concepto de *optimización multiobjetivo*. La mejor forma de entender cómo funciona un proceso de optimización de este tipo es mediante un ejemplo que se puede asociar a la vida diaria. [4]

Se supone que existe una pareja que está buscando un lugar en donde vivir. Uno de ellos es de Montana y otro es de Florida, en consecuencia, con su lugar de origen cada uno tiene ideas diferentes de lo que es un lugar ideal para vivir. Las dos funciones de aptitud son descritas aproximadamente por:

$$\begin{aligned} f_1 &= x_1 + x_2^2 + x_3 + \sqrt{x_4} \\ f_2 &= 1/x_1 + 1/x_2^2 + \sqrt{x_3} + 1/x_4 \end{aligned} \quad (1)$$

donde:

f_1 : Función de aptitud del esposo #1.

f_2 : Función de aptitud del esposo #2.

x_1 : Temperatura promedio.

x_2 : Distancia desde donde vive la familia del esposo #1.

x_3 : Costo de la vida.

x_4 : Tamaño de la ciudad.

Claramente la pareja no está de acuerdo con todos los puntos, el interés que cada uno tiene por cada variable se expresa en el tamaño y el signo del exponente de dicha variable.

```

AG estándar ()
{
    //inicio con tiempo inicial 0
    t := 0;
    //inicializar una población aleatoria de individuos
    initpopulation P(t);
    //evaluar la aptitud de todo individuo de la población inicial
    evaluate P(t);
    //encuestar el criterio de parada (tiempo, aptitud, etc.)
    while not done do
        t := t+1;
        //selección de una sección de la población para generar descendencia
        PI(t) := selectparents P(t);
        //recombinación de los genes de los padres seleccionados
        recombined PI(t);
        //mutar la población de emparejada
        mutate PI(t);
        //evaluar la nueva aptitud
        evaluate PI(t);
        //seleccionar los supervivientes a partir de la nueva aptitud
        P := survive P,PI(t);
    end
}

```

Fig. 1. Código de un AG estándar.

No existe una sola solución para (1), graficando f_1 contra f_2 para varios valores de x se obtiene la figura 2. El punto que representa el mínimo de cada función independiente ($\min\{f_1\}$, $\min\{f_2\}$) está fuera de la región factible (conjunto de todos los posibles puntos que satisfagan todas las restricciones) en el gráfico. El conjunto de puntos que limitan el borde inferior de la región factible se denomina frente del Pareto.

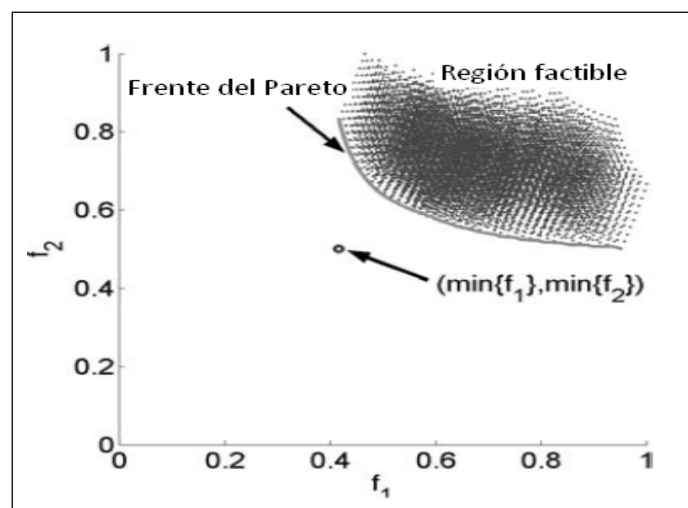


Fig. 2. Gráfico de f_1 contra f_2 .

Un AG Pareto retorna una población con muchos miembros sobre el frente del Pareto, esta población es ordenada con base en su "dominancia". Una solución A domina a otra solución B si A tiene aptitud mayor que la de B, para al menos uno de los objetivos de la función de aptitud y no es peor que el resto de los objetivos. En otras palabras, x_1 domina a x_2 si se cumple alguna de las ecuaciones:

$$f_1(x_1) < f_1(x_2) \cup f_1(x_2) \leq f_2(x_2) \quad (2)$$

$$f_1(x_1) \leq f_1(x_2) \cup f_1(x_2) < f_2(x_2) \quad (3)$$

La herramienta algoritmos genéticos y búsqueda directa del software MATLAB 7.8.0 presenta un solucionador de AG multiobjetivo, el cual utiliza un AG Pareto regido por los principios anteriormente explicados. El proceso de optimización que se analizará en este material utiliza una función de aptitud con tres objetivos definidos en aras de reducir las pérdidas por bloqueo en un sistema Cassegrain.

REFLECTORES DOBLES

Este tipo de sistema está constituido por dos reflectores, uno principal parabólico y otro secundario. El subreflector puede ser hiperbólico en cuyo caso la antenna que se obtiene es Cassegrain (figura 3), o bien elíptico y la antenna que se obtiene es Gregorian (figura 4). Cada una de estas aumenta la distancia focal efectiva para obtener un reflector parabólico equivalente. [5]

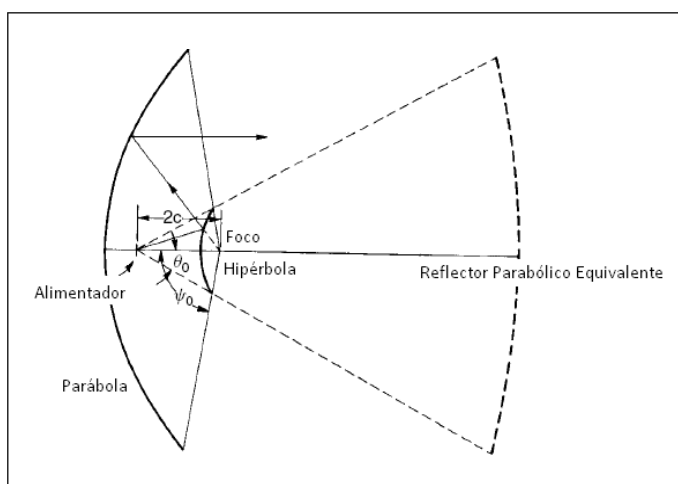


Fig. 3. Antena reflectora Cassegrain.

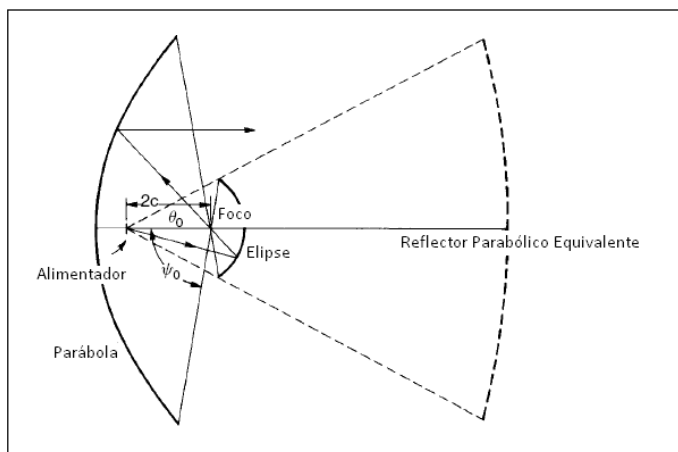


Fig. 4. Antena reflectora Gregorian.

En las figuras 3 y 4, el ángulo subtendido del reflector primario es $2\Psi_0$, pero el ángulo subtendido efectivo en el alimentador es $2\theta_0$ y $2c$ es la distancia interfocal. Se posiciona el primero de los focos del subreflector en el foco del reflector principal y se coloca el segundo en el centro de fase de la antenna alimentadora. Con los sistemas de doble reflector se logra aunar las ventajas de las antenas de foco corto y largo.

El número de diseños con la forma Cassegrain excede al número de diseños que utilizan la variante Gregorian. Esta última requiere una estructura de soporte para el subreflector de mayores longitudes, debido a que el mismo se extiende más allá del foco del reflector principal. La curvatura del borde del subreflector incrementa la difracción y reduce el control del campo incidente sobre el reflector principal, pero proporcionándole una forma determinada al subreflector Cassegrain, se puede acrecentar la eficiencia total. La inversión de los campos en el reflector Gregorian complica este proceder.

Para analizar el sistema de reflectores dobles se puede utilizar una parábola equivalente a partir del ángulo subtendido del subreflector $2\theta_0$. Se define entonces, el factor de magnificación como la razón de la longitud focal efectiva y la longitud focal real del reflector principal:

$$M = \frac{f_e}{f} \quad (4)$$

La excentricidad del subreflector puede calcularse a partir de M :

| | |
|---------------------------|---------------------------|
| Cassegrain | Gregorian |
| $e = \frac{(M+1)}{(M-1)}$ | $e = \frac{(M-1)}{(M+1)}$ |

(5)

La distancia interfocal se obtiene de la ecuación (6):

| | |
|--------------------------|--------------------------|
| Cassegrain | Gregorian |
| $2c = 2Pe^2 / (e^2 - 1)$ | $2c = 2Pe^2 / (1 - e^2)$ |

(6)

En ella aparece el parámetro de diseño P con el cual se logra cierta libertad en el posicionamiento del alimentador. El diámetro del subreflector varía con P según (7):

$$D_s = \frac{2eP \sin(\pi - \psi_o)}{[1 - \cos(\pi - \psi_o)]} \quad (7)$$

Bloqueo central

El incremento de la distancia focal efectiva requiere alimentadores con haces estrechos, y dejar de considerar al alimentador como una fuente puntual. Este proyecta una sombra en el centro del reflector (figura 5) y causa bloqueo central, al igual que el subreflector. En la medida en que se reduce el diámetro del subreflector para reducir el bloqueo, la antena alimentadora debe colocarse más cercana al mismo y su sombra proyectada aumenta. El punto óptimo ocurre cuando el diámetro de bloqueo del alimentador proyectado se iguala al diámetro del subreflector. Este problema produce una reducción de la ganancia y un aumento de los niveles de lóbulos laterales.

Las dimensiones del alimentador dependen de la frecuencia a la cual se opera y de la razón efectiva f/D , mientras que el diámetro del subreflector depende únicamente de la geometría. Luego, no se puede determinar el punto óptimo con independencia de la frecuencia.

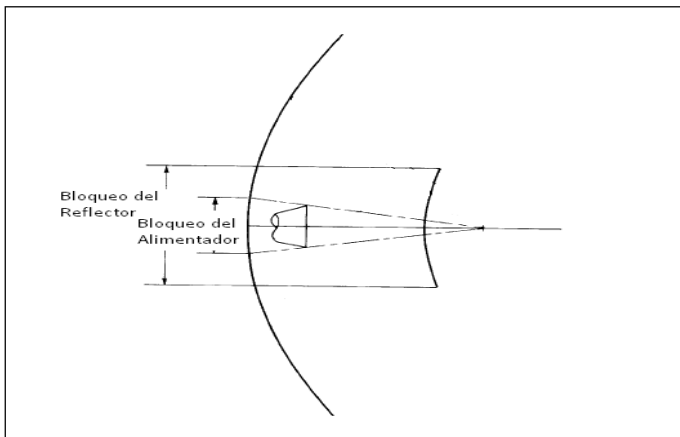


Fig. 5. Bloqueo central en reflectores Cassegrain.

OPTIMIZACIÓN DEL BLOQUEO CENTRAL EN UN SISTEMA CASSEGRAIN

El sistema a optimizar es una antena Cassegrain con un diámetro del reflector principal de 10 m y con una relación foco/diámetro efectiva de 1,5 para operar a 3,9 GHz. Esta frecuencia lo ubica en la banda C y el sistema puede ser utilizado para enlaces satelitales con estaciones terrenas. Además, el alimentador tendrá una disminución de la amplitud de la señal de alimentación en el borde del reflector de -12 dB.

Resulta obvio que la disminución de las dimensiones del subreflector provoca una reducción de las pérdidas a consecuencia del bloqueo. Sin embargo, cuando se disminuye el diámetro del subreflector, buscando menos bloqueo del mismo, el alimentador deberá colocarse más próximo a este, por lo que su sombra proyectada aumenta. El punto óptimo como se mencionó anteriormente ocurre cuando el diámetro del bloqueo del alimentador proyectado se iguala al diámetro del subreflector.

La función del AG será encontrar este punto óptimo, en un tiempo breve y con una alta precisión. La función de aptitud está diseñada para un reflector doble Cassegrain cuyas características ya fueron descritas. Las variables independientes que servirán de entrada a la función de aptitud son la relación foco/diámetro del reflector principal (f/D) y la distancia entre los focos del subreflector ($2c$). Los objetivos que perseguirá la función son la disminución del diámetro del bloqueo del alimentador proyectado (D_{FB}), del diámetro del subreflector (D_s) y de la diferencia entre estos dos valores, ya que cuando este último valor es cero ocurre el punto óptimo. Con esto se consigue optimizar las pérdidas ocasionadas por el bloqueo.

Una vez implementada la función de aptitud con las características antes mencionadas, se procedió correr en múltiples ocasiones la herramienta del AG multiobjetivo. Se fueron variando parámetros como: tamaño de la población, función de creación, selección, reproducción, mutación, cruce y migración, y luego se archivaron los resultados de las corridas realizadas. En la tabla 1 se pueden observar cinco de los mejores resultados obtenidos. El criterio que se utilizó para escoger dichas corridas, se basó en el menor tamaño del subreflector (DS), cuando la diferencia con el diámetro del bloque del alimentador proyectado sea cero.

Se obtuvo la mejor corrida (40) con un tamaño de la población de 88 individuos, una función de selección por torneo y tamaño del torneo de 6 competidores, fracción de cruce de 0,65, función de cruce por 2 puntos y mutación uniforme. Bajo estas condiciones el AG determina una relación foco/diámetro de 0,256, una distancia interfocal de 1,07 m y un diámetro del subreflector de 0,728 m, para minimizar las pérdidas por bloqueo central. Estos valores se utilizarán para simular la antena con ayuda del software de análisis de reflectores ICARA.

Resulta interesante corroborar a partir de los valores que obtuvo el AG la minimización de las pérdidas por bloqueo. Para ello los autores se apoyan en la tabla 2 que muestra las pérdidas por bloqueo para distribuciones de abertura circular, esta se obtuvo de bibliografía consultada referente al estudio de las antenas. [5]

Tabla 1
Corridas con mejores valores de aptitud

| Corrida | Relación f/D | Distancia interfocal (m) | Número de iteraciones | D_{FB} (m) | D_s (m) | Diferencia entre los diámetros |
|---------|--------------|--------------------------|-----------------------|--------------|-----------|--------------------------------|
| 7 | 0,28 | 1,136 | 116 | 0,75 | 0,75 | 0 |
| 22 | 0,275 | 1,124 | 112 | 0,746 | 0,746 | 0 |
| 35 | 0,266 | 1,097 | 102 | 0,737 | 0,737 | 0 |
| 6 | 0,259 | 1,079 | 107 | 0,731 | 0,731 | 0 |
| 40 | 0,256 | 1,07 | 116 | 0,728 | 0,728 | 0 |

Tabla 2
Pérdidas por bloqueo para distribuciones de abertura circular (dB)

| Bloqueo central (%) | Uniforme | Gaussiana (12 dB en el borde) |
|---------------------|----------|-------------------------------|
| 5 | 0,02 | 0,04 |
| 6 | 0,03 | 0,06 |
| 7 | 0,04 | 0,08 |
| 8 | 0,06 | 0,10 |
| 9 | 0,07 | 0,13 |
| 10 | 0,09 | 0,16 |
| 11 | 0,11 | 0,19 |
| 12 | 0,13 | 0,23 |
| 13 | 0,15 | 0,27 |
| 14 | 0,17 | 0,32 |
| 15 | 0,20 | 0,36 |

Si se le presta atención a esta relación de pérdidas, se puede observar como el sistema que resulta con el diámetro del subreflector de 0,728 m, diámetro del reflector principal de 10 m y una distribución Gaussiana con -12 dB con respecto al nivel máximo de la señal de alimentación, el porcentaje de bloqueo es de un 7,28 % y las pérdidas por bloqueo son de aproximadamente 0,08 dB. Estas pérdidas son inferiores a las obtenidas en un proceso de optimización de un sistema de características muy similares realizado por Milligan. [5] En esta última optimización las pérdidas

por bloqueo alcanzan un valor de 0,14 dB, superiores a las que se logran con el empleo del AG, por lo que el sistema resultante del empleo del AG es mejor en este sentido.

SIMULACIÓN DEL REFLECTOR

El reflector parabólico será simulado utilizando la herramienta de análisis de antenas de reflectoras ICARA, cuyo nombre proviene de las iniciales en inglés de Análisis de Corrientes Inducidas en Antenas, de Reflectores; desarrollado por el Grupo de Antenas del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad de Vigo en España. Además, está disponible de forma gratuita en Internet.[6] Este *software* permite diferentes configuraciones en el diseño y análisis de antenas reflectoras simples o dobles. [7]

De esta manera se introducen los valores que definen la geometría del reflector y la señal de alimentación, algunos de ellos resultados de la optimización realizada, en la figura 6 se observan los parámetros geométricos de la antena y se resaltan aquellos que se obtuvieron con la optimización. La figura 7 muestra la geometría generada por estos parámetros y la figura 8 la amplitud de la señal de alimentación de -12 dB en el borde del subreflector con respecto al máximo nivel.

Se obtiene entonces el patrón de radiación de la antena (figuras 9 y 10).

Entre las características de radiación de la antena se tiene una alta directividad (49,529 2 dBi), un bajo nivel de polarización cruzada (3,096 7 dBi) y de lóbulos laterales (menos de 20 dBi) todos estos valores referidos al radiador isotrópico (dBi). El buen desempeño de esta antena era de esperar en consecuencia con haber optimizado uno de los fenómenos que más influyen de forma negativa en las características de radiación de los sistemas Cassegrain, el bloqueo central.

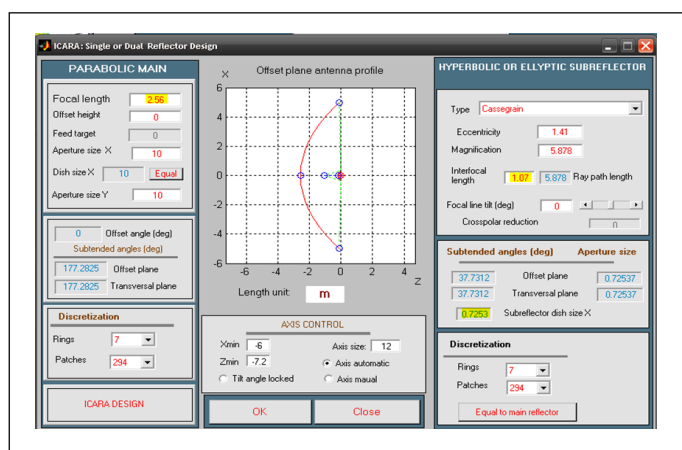


Fig. 6. Parámetros geométricos del reflector Cassegrain.

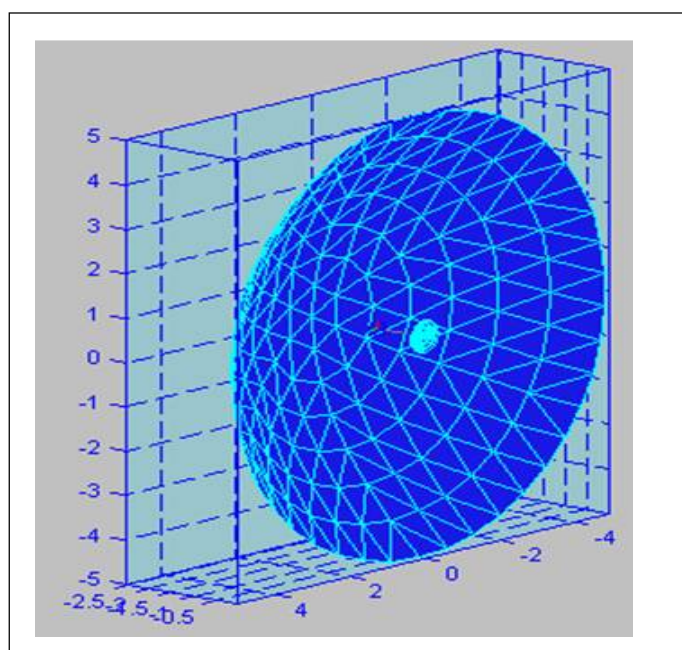


Fig. 7. Geometría del reflector Cassegrain (m).

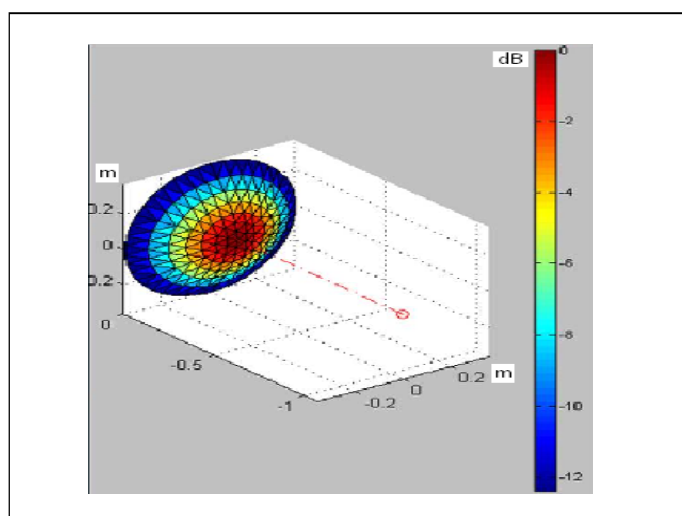


Fig. 8. Distribución de la señal de alimentación sobre el subreflector.

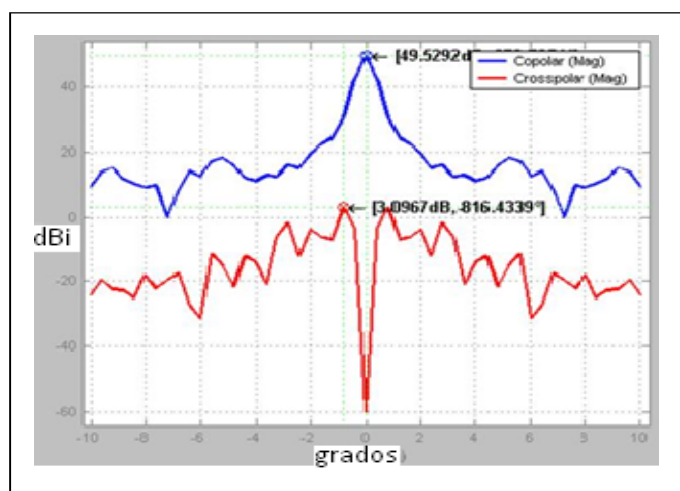


Fig. 9. Patrón de radiación del reflector Cassegrain.

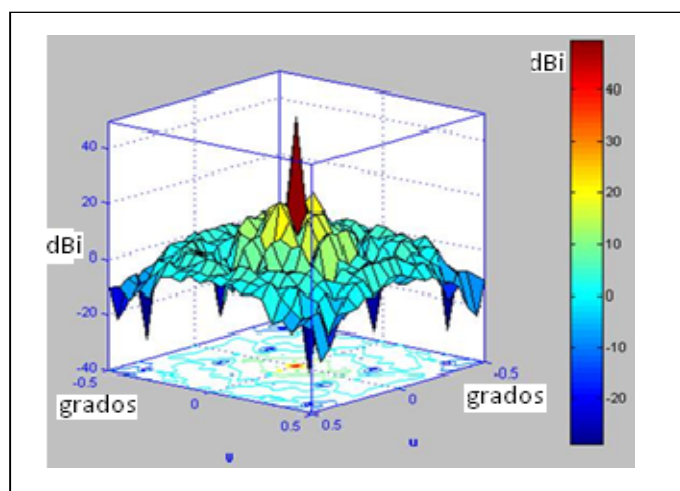


Fig. 10. Patrón de radiación del reflector Cassegrain 3D.

Si se atiende a las especificaciones técnicas de una antena comercial para estaciones terrenas de la compañía Antesky [8], con un diámetro de 11 m y de altas prestaciones comprobadas con su homologación por parte de la Unión Internacional de Telecomunicaciones al cumplir con todos los requisitos impuestos por esta, se observa que su ganancia es de 51,64 dBi. Esta ganancia no difiere en gran medida de la directividad que se obtuvo en el trabajo (49,529 2 dBi), a pesar de que el reflector principal utilizado en la antena de 11 m de Antesky es 1 m mayor que el utilizado para la simulación. Cabe destacar que la antena no tiene exactamente las mismas características geométricas y de alimentación de la resultante del proceso de optimización mediante AG, sin embargo, esta atenuante no impide tener un punto de comparación con una antena trabajando en la misma banda de frecuencia y de similares características.

CONCLUSIONES

Este trabajo demuestra que con el empleo de la herramienta algoritmos genéticos y búsqueda directa del software MATLAB 7.8.0 se logra la optimización multiobjetivo del bloqueo central en los sistemas de doble reflector,

específicamente en un sistema Cassegrain. La optimización del bloqueo central en el reflector doble analizado permitió una comparación con los resultados obtenidos con un diseño propuesto por Milligan [5] y con una antena comercial de la compañía Antesky, [8] donde se pudo observar una reducción de las pérdidas por bloqueo que presentaba un reflector doble Cassegrain con frecuencia de trabajo de 3,9 GHz en el primer caso y en el segundo como se alcanza una directividad similar a la ganancia de una antena con un diámetro 1 m mayor. De igual manera, la investigación realizada arrojó que en los centros, organismos e instituciones del país, donde se ha realizado de forma continua el estudio y desarrollo de los sistemas de radiación parabólica, no ha sido utilizado este tipo de algoritmo. A pesar de que en algunos procesos de optimización como el presentado no se necesiten altos requerimientos de hardware para su realización. Prueba de ello fue la ejecución del algoritmo sobre una PC Genuine Intel (R) Centrino Duo CPU T2250 a 1,73 GHz. Los AG no garantizan la solución óptima del problema, sin embargo, este documento evidencia que es posible hallar soluciones satisfactorias, con prestaciones superiores a otros algoritmos de optimización tradicionales como los de búsqueda local, entre ellos el método de Newton; o bien los algoritmos de construcción de soluciones, como el método divide y conquista.

RECONOCIMIENTOS

Los autores desean agradecer al máster Leslye Villar Ledo y al doctor Gerardo M. Lizo González, principales soportes de este material.

REFERENCIAS

1. **HOLLAND, John.** *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Michigan: MIT Press, 1975.

2. **VEGA, C. P.** "Antenas con reflector parabólico". Departamento de Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Cantabria, Santander, 2008.
3. **MAN, K. F.; TANG, K. S.; and KWONG, S.** "Genetic Algorithms: Concepts and Applications". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1996, vol. 43, núm. 5.
4. **HAUPT, L. Randy and HAUPT, E. Sue.** *Practical Genetic Algorithms*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004. 272 pp. ISBN 0-471-45565-2.
5. **MILLIGAN, A. Thomas.** *Modern Antenna Design*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005, 633 pp. ISBN 13 978-0-471-45776-3.
6. **MARTÍNEZ, J. A.** "ICARA - User Manual". Universidad de Vigo: Grupo de Antenas Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, 2007.
7. *Software de análisis de corrientes inducidas en antenas de reflectores (ICARA)* [ref. de 6 de diciembre 2011]. Disponible en Web: http://www.com.uvigo.es/ant/documentos/ICARA-V1_2_Setup.msi.
8. *Antesky Science Technology Inc. Product Specifications, 11 Meter Earth Station Antennas* [ref. de 10 de diciembre 2011]. Disponible en Web: <http://www.antesky.com/products/11m-earth-station-antenna.html>.

AUTORES

Carlos Santos Rodríguez

Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica, Servicio de Vigilancia Meteorológica, Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba

Ana Teresa Aday Martínez

Ingeniera en Telecomunicaciones y Electrónica, Empresa de Generación Distribuida, Unión Eléctrica (UNE), La Habana, Cuba

Optimization of Cassegrain Systems Using Genetic Algorithms

Abstract

This paper is a proposal for optimization of a parabolic radiation system, in its variant Cassegrain, using Genetic Algorithms (GA). This new mathematical tool breaks through today in the field of electromagnetism, coming to be used as a successful way of solving problems of various antennas. In recent years there have appeared different softwares implementing the GA, this is the case of MATLAB 7.8.0. This software is used in this material to optimize a phenomenon that limits the good performance of the Cassegrain system, central blockage. The article is an attempt to introduce the use of the AG and its ability to multi-objective optimization of these systems, without any references of this topic in our country. It also uses reflectors analysis tool ICARA, which allows the simulation of radiation characteristics of different configurations of parabolic antennas for further analysis.

Key words: optimization, multi-objective GA, Cassegrain system, central blockage, blockage loss