

Análisis y diseño de una antena tipo Isoflux para satélites de órbita baja (LEO)

L. A. Vives, *Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires* y N. O. Dalmas Di Giovanni *Jefe de la División Antenas y Proyección del Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas de las Fuerzas Armadas, Argentina.*

Resumen— En este informe se describe el análisis de una antena tipo “Isoflux”, utilizada en satélites de órbita baja, para bajada de datos de alta velocidad. Se propone un método de diseño, se comparan los resultados con un simulador profesional de antenas y finalmente se procede a la construcción y posterior medición de un modelo funcional.

Abstract— The paper describes the analysis and design of an “Isoflux” coverage type antenna, used in low earth orbit satellites for the downlink of high speed data. A method of design is proposed and the results are contrasted with a professional antenna modeler. Finally, measurements are performed over a functional model.

I. INTRODUCCIÓN

Los satélites de órbita baja (LEO), utilizados durante mucho tiempo en observaciones terrestres, han cobrado especial importancia en los últimos años debido al gran auge de las comunicaciones móviles y al inicio del desarrollo de los sistemas de comunicaciones globales personales GMPCS (Global Mobile Personal Communications by Satellite).

Estos satélites, cuya mayoría están ubicados entre los 600 y 1600 Km de altura, giran a mayor velocidad que la tierra, lo que hace que sólo pueda mantenerse el enlace, mientras transitan un punto “visible” a la estación terrena. Además la corta distancia mejora la calidad de la señal y reduce el retardo de transmisión. Pero para ello, es necesario que el satélite LEO pueda comunicarse con todos los receptores ubicados dentro de su campo “visible”.

Por lo tanto, a fin de poder transmitir la misma densidad de potencia a cualquier punto donde pisa¹ el satélite, debe contar con una antena que irradie con un diagrama de radiación del tipo “Isoflux”, que significa ‘igual flujo’.

Para esto, el diagrama de radiación debe poseer un máximo en elevación a cierto ángulo con respecto al nadir², para que cuando el satélite se encuentre en el punto más lejano de la trayectoria, la antena posea la mayor ganancia, y a medida que se acerca, la ganancia disminuya hasta llegar a un mínimo en el cenit terrestre. Esta cualidad, debe además cumplirse para toda la trayectoria, por lo tanto el diagrama debe ser también, azimutalmente simétrico.

Actualmente hay cuatro modelos de antenas desarrolla-

*Revista Argentina de Trabajos Estudiantiles. Patrocinada Por la IEEE.

¹Se denomina pisada a la superficie terrestre que está dentro del área de cobertura del satélite.

²En la práctica se busca que el máximo se ubique a un ángulo entre 50° y 60° del nadir.

das que proveen dicho diagrama de radiación: La hélice cuadrifilar y un conjunto de antenas tipo parche, que poseen baja ganancia, un modelo de antena bicónica con bocina, y finalmente un modelo de antena con reflector conformado, cuyo análisis y diseño abordaremos en este informe.

II. DESARROLLO

A. Requerimientos de la antena.

A continuación se detallan las características de la antena a diseñar:

Ancho de banda:

200Mhz en banda X. El desarrollo se centrará en la frecuencia de 8 GHz.

Polarización:

Circular derecha. Se acepta una relación axial máxima de 3dB.

Diagrama de radiación:

Haz cónico, con un máximo a $60^\circ \pm 5^\circ$ del nadir y simetría de revolución.

Ganancia:

Mayor a 5 dBi en el máximo. La diferencia entre el máximo y el nadir no debe ser mayor a 15 dB.

El análisis y diseño de la antena se dividió en dos partes; la primera se aboca a la elección y diseño del iluminador, mientras que la segunda aborda el estudio de la forma del reflector.

B. Elección y diseño del Iluminador

Para la elección y diseño del iluminador se tuvieron en cuenta las siguientes características:

Polarización:

Circular izquierda, ya que luego cambia el sentido de polarización en la reflexión.

Diagrama de radiación:

Con una apertura de haz necesaria para iluminar toda la superficie del reflector (Consideramos ángulo de corte, al ángulo para el cual la ganancia cae 10dB del máximo) y simetría de revolución.

Dimensiones:

El diámetro no debe exceder el 10% del diámetro del reflector, para evitar la obstrucción de la radiación reflejada en dirección al eje de simetría.

A fin de cumplir con los requerimientos establecidos se eligió como iluminador, una antena helicoidal dentro de una cavidad, “Fig. 1”.

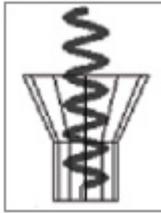


Fig. 1. Esquema del iluminador.

La hélice posee seis vueltas y un diámetro de 12 mm, lo que hace que a una frecuencia de 8 GHz irradie en modo axial y con polarización circular.

La cavidad está compuesta por una base cilíndrica que evita la radiación trasera y una parte cónica con la cual se controla la apertura del haz y que también mejora la simetría de revolución del diagrama de radiación.

El iluminador fue simulado con un software profesional de antenas (Wipl-D Professional). En la "Fig. 2", se muestra un corte axial del diagrama de radiación simulado para $\phi = 180^\circ$.

Las variaciones azimutales en el diagrama pueden considerarse despreciables dentro del ancho de haz que ilumina al reflector. Para validar el simulador se construyó un modelo en chapa zincada y alambre de cobre. Se procedió con el ajuste en impedancia del mismo, "Fig. 3" donde se obtuvo una relación de onda estacionaria (ROE) con respecto a $Z_0 = 50 \Omega$, por debajo de 2 entre 7 y 9 GHz y por debajo de 1,2 entre 7,6 y 8,1 GHz.

Luego, se le midió el diagrama de radiación, expuesto en la "Fig. 4", que muestra excelente concordancia con el simulado. En el diagrama de polarización medido, "Fig. 5", se observa que la relación axial no supera los 3dB, valor que está dentro del rango de aceptación.

Cabe aclarar que si bien por simplicidad, se eligió un modelo de hélice en cavidad para iluminar el reflector, puede utilizarse cualquier otro diseño que cumpla con los requerimientos enunciados, tal es el caso de una bocina excitada con dos dipolos cruzados [4].

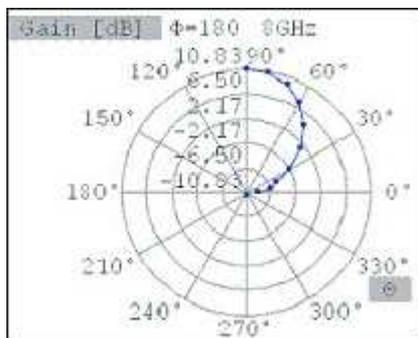


Fig. 2. Diagrama de radiación en Wipl-D.

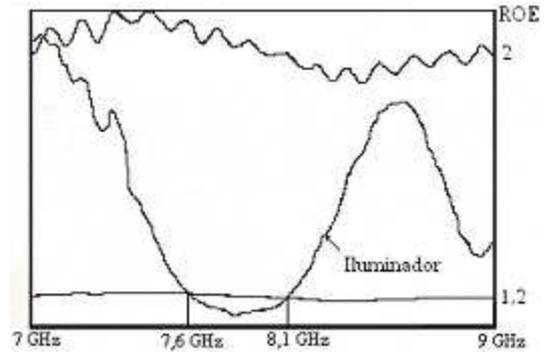


Fig. 3. Ajuste y medición de ROE del iluminador.

C. Diseño y desarrollo del reflector

El diseño del reflector plantea un problema básico ¿Qué forma debe tener su superficie a fin de obtener un diagrama de radiación determinado? Este problema fue resuelto en dos etapas:

1) En la primera se propuso un algoritmo que permite ingresar la distribución en el espacio de la radiación reflejada, y el mismo calcula la forma del reflector, correspondiente a esa distribución. Lo que hace el método es considerar al iluminador como una fuente puntual, a una cierta distancia D del reflector, que emite " m " rayos angularmente equiespaciados y limitados a un ángulo máximo $\psi_{máx}$ que define la apertura del iluminador.

La distribución de la radiación reflejada se define mediante un vector θ' compuesto por los ángulos de salida de los rayos reflejados, correspondientes a cada rayo emitido por la fuente. El ángulo θ' se mide en sentido antihorario desde un vector perpendicular al eje de simetría del reflector.

A partir de esos datos el algoritmo calcula la pendiente que debe tener la superficie del reflector en el punto de incidencia, de modo que un rayo j que parte de la fuente con un ángulo ψ_j se refleje con un ángulo θ'_j , basándose en la ley de Snell y así construye el reflector mediante rectas cuya pendiente fue calculada para cada rayo.

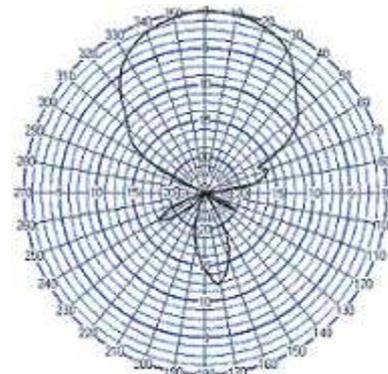


Fig. 4. Diagrama de radiación del iluminador medido en cámara anecoide.

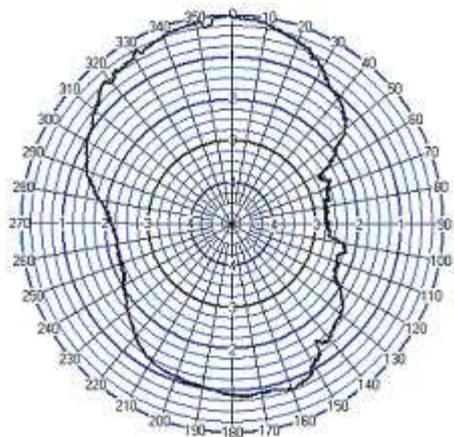


Fig. 5. Diagrama de polarización del iluminador medido en cámara anecoide.

La simetría de revolución de todo el sistema, permite reducir el problema a la simple obtención del perfil del reflector. El algoritmo fue previamente validado para un reflector plano y uno parabólico.

2) En la segunda etapa se propuso un modelo simple para poder estimar el diagrama de radiación en campo lejano.

Dicho cálculo se corresponde con el perfil del reflector calculado por el algoritmo anterior, basado en el *principio de Huygens*.

El modelo considera al reflector como un conjunto de fuentes puntuales de ondas esféricas, ubicadas en cada punto donde incide un rayo emitido por el iluminador. Se asigna como amplitud de cada fuente, la misma amplitud con que el rayo parte del iluminador y la fase se obtiene calculando la distancia que recorre desde el iluminador hasta el reflector.

Luego se calcula el campo lejano sumando las contribuciones de cada fuente para los distintos ángulos de θ , medido desde el nadir en sentido horario, y finalmente se calcula la densidad de potencia y la ganancia con respecto al radiador isotrópico.

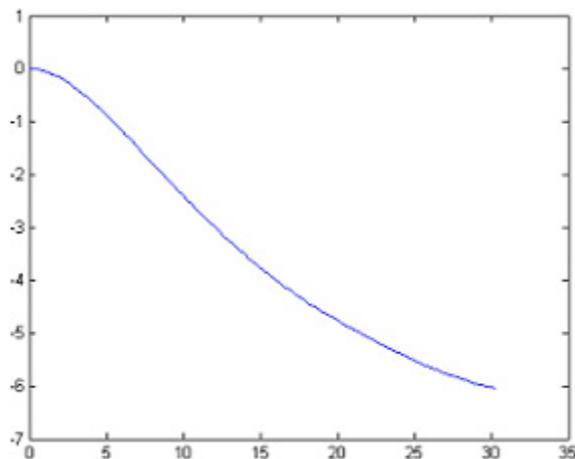


Fig. 6. Perfil del reflector simulado con el algoritmo programado en MatLab.

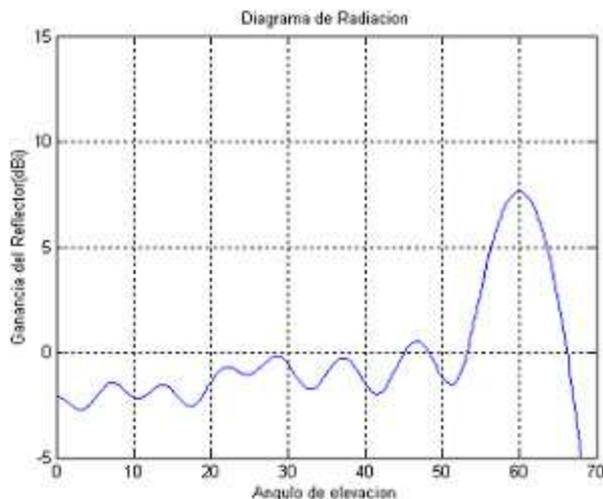


Fig. 7. Diagrama de radiación estimado con el conjunto de fuentes puntuales.

El modelo considera despreciable la difracción de borde. Debe mencionarse igualmente que la aplicación del *principio de Huygens* tiene sus limitaciones, como la de no considerar la naturaleza vectorial del campo electromagnético. Sin embargo si el radio del reflector es suficientemente grande, la teoría escalar del *principio de Huygens* arroja resultados satisfactorios.

Una vez validados ambos modelos, por medio de reflectores planos y parabólicos, en los que se observó muy buena concordancia con la realidad, se procedió al diseño del reflector de la antena "Isoflux".

Para eso se consideró una distancia reflector-iluminador de 15 cm, una apertura de haz del iluminador de 110° y se buscó que el máximo de radiación estuviera a unos 60° del nadir y su ganancia fuera cercana a 7 dBi. Luego de varias iteraciones del algoritmo programado en Matlab, se obtuvo el perfil de la "Fig. 6", con un diagrama de radiación optimizado, "Fig. 7".

Las dimensiones del perfil están en centímetros, por lo que se observa que el diámetro del reflector es de 60 cm.

Además se realizó el mismo proceso de diseño cambiando el ángulo del máximo de radiación, para dos distancias iluminador-reflecto, de 15 cm y 20 cm, ya que de lo contrario el reflector sería demasiado grande para ser montado en un satélite de órbita baja.

Máx	e	d	c	b	a	Go	R (cm)
30º	$2,01 \cdot 10^{-6}$	$-1,42 \cdot 10^{-4}$	0,0038	-0,0369	0,0466	11	21,15
40º	$7,20 \cdot 10^{-7}$	$-7,63 \cdot 10^{-5}$	0,0028	-0,0362	0,0377	9,3	23,37
50º	$6,92 \cdot 10^{-7}$	$-6,70 \cdot 10^{-5}$	0,0024	-0,0345	-0,0028	7,9	26,05
60º	$9,62 \cdot 10^{-7}$	$-9,13 \cdot 10^{-5}$	0,0033	-0,0478	-0,0060	7,6	30,29
70º	$4,10 \cdot 10^{-7}$	$-4,92 \cdot 10^{-5}$	0,0022	-0,0427	-0,0002	6	34,58
Distancia I-R: 15 cm				Apertura del iluminador: 110º			

TABLA I
PARÁMETROS DE DISEÑO DEL REFLECTOR PARA UNA DISTANCIA I-R:15 cm.

Máx	e	d	c	b	a	Go	R (cm)
30°	$2,58 \cdot 10^{-7}$	$-2,93 \cdot 10^{-5}$	0,0012	-0,0169	0,0140	11	27,97
40°	$2,25 \cdot 10^{-8}$	$-1,24 \cdot 10^{-5}$	0,0009	-0,0171	-0,0068	9,5	30,97
50°	$2,19 \cdot 10^{-7}$	$-2,82 \cdot 10^{-5}$	0,0014	-0,0259	-0,0028	8,5	34,73
60°	$2,52 \cdot 10^{-7}$	$-3,33 \cdot 10^{-5}$	0,0017	-0,0342	0,0072	7,6	39,99
70°	$1,28 \cdot 10^{-7}$	$-2,05 \cdot 10^{-5}$	0,0012	-0,0313	-0,0126	6,2	46,27
Distancia I-R: 20 cm		Apertura del iluminador: 110°					

TABLA II

PARÁMETROS DE DISEÑO DEL REFLECTOR PARA UNA DISTANCIA I-R: 20 CM.

Las curvas obtenidas se ajustaron por medio de un polinomio de orden 5, cuyos parámetros se colocaron en una tabla. El objetivo, es que con estas tablas se pueda diseñar una antena "Isoflux" con un máximo a elegir dentro de un rango variable entre 30° y 70°.

La tablas expuestas corresponden al siguiente polinomio:

$$Z = ax + bx^2 + cx^3 + dx^4 + ex^5 \quad (1)$$

En las mismas se especifica el ángulo para el máximo de radiación, el radio del reflector, la ganancia en el máximo G_0 en dBi, la apertura del haz del iluminador y la distancia iluminador- reflector (I-R).

De esta forma si se quiere diseñar una antena "Isoflux" con un máximo de radiación a 40° del nadir y una ganancia cercana a 9 dBi, se elige un iluminador adecuado, luego se define la distancia I-R que puede ser 15 cm y se utiliza el polinomio expresado en (1):

$$Z = 0,0377x - 0,0362x^2 + 0,0028x^3 - 7,63 \cdot 10^{-5}x^4 + 7,2 \cdot 10^{-7}x^5$$

Con x entre 0 y 23,37 cm. Una vez calculado el perfil, la superficie se obtiene rotándolo 360° alrededor del eje de simetría.

A partir del perfil de la "Fig. 6", se simuló en "Wipl-D professional" la antena completa "Fig. 8".

Con el simulador se obtuvo un diagrama de radiación similar al que se había llegado por el modelo propuesto, con la única diferencia que la ganancia en el nadir aumenta por efecto de haberlo simulado con un iluminador real, "Fig. 9".

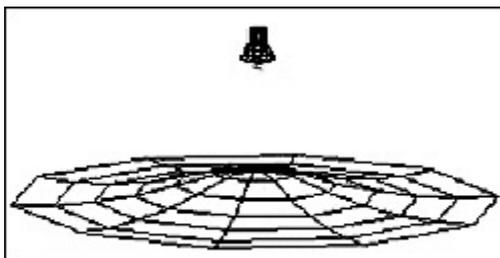


Fig. 8. Conjunto iluminador-reflecto.

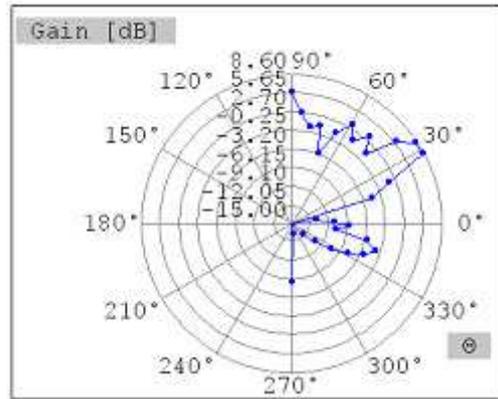


Fig. 9. Diagrama de radiación, simulación realizada en wipl-D.

En la "Fig. 10" se muestra una comparación entre el diagrama de radiación obtenido mediante el algoritmo y el simulador "Wipl-D professional".

Para corroborar el algoritmo, se construyó un modelo del reflector en fibra de vidrio, se lo recubrió con papel de aluminio para generar la superficie reflectora y se diseñó un soporte para el iluminador ³.

El modelo funcional del conjunto reflector-iluminador se muestra en la "Fig. 11". A continuación se presentan los resultados obtenidos en las mediciones realizadas.

El diagrama de radiación fue optimizado para la frecuencia de 8,25 GHz "Fig. 12". El mismo presenta algunas asimetrías producidas por asimetrías en la superficie del reflector, introducidas por la técnica de construcción utilizada. Se observa además que la posición de los máximos está separada por 120°, lo que concuerda con la tabla utilizada, donde cada máximo debía ubicarse a 60° del nadir.

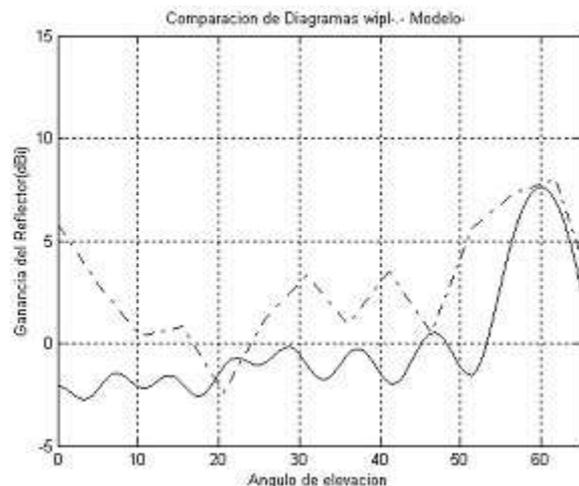


Fig. 10. Comparación de diagramas de radiación, algoritmo en MatLab - , Wipl-D - - .

³El soporte del iluminador fue diseñado por el Ing Maximiliano Zanin de la División Antenas y Propagación de CITEFA.



Fig. 11. Modelo funcional de la antena.

En cuanto a la adaptación, no presentó variaciones con respecto a las mediciones realizadas al iluminador. En el diagrama de polarización, medido en la posición del máximo "Fig.13", se observa que la relación axial máxima es 4 dB, sólo 1 dB por encima de la cota esperada.

Esta variación en la circularidad de la polarización se debe en gran parte a las asimetrías del reflector.

A la antena se le midió la ganancia en el máximo en un rango de 8,15 y 8,35 GHz, banda dentro de la cual fue optimizado el diagrama de radiación, "Fig. 14". Se observa que la ganancia esta por encima de los 5 dBi en toda la banda, y a la frecuencia de optimización la ganancia es 6,65 dBi.

III. CONCLUSIONES

El sistema de tablas propuesto permite obtener rápidamente el perfil de un reflector que define el diagrama de radiación "Isoflux", con libertad para elegir la ubicación del máximo de radiación entre 30° y 70° del nadir.

Las dispersiones en simetría y frecuencia que surgieron durante las mediciones, se deben en gran parte a imprecisiones introducidas por las técnicas de construcción. Cabe igualmente remarcar que este tipo de antena, hasta el momento nunca se había desarrollado en la Argentina.

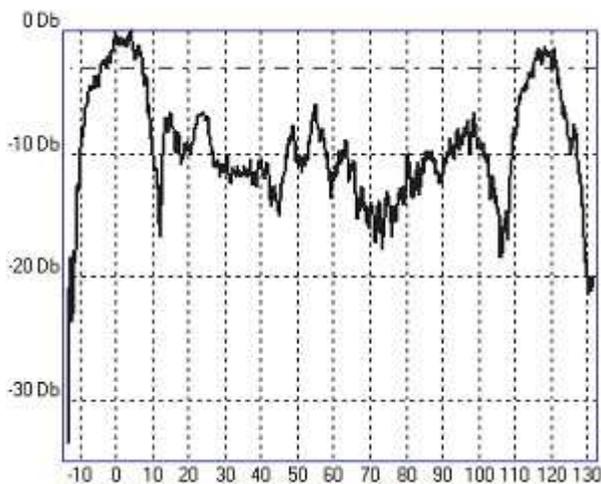


Fig. 12. Diagrama de radiación, medido y optimizado en 8,25 GHz.

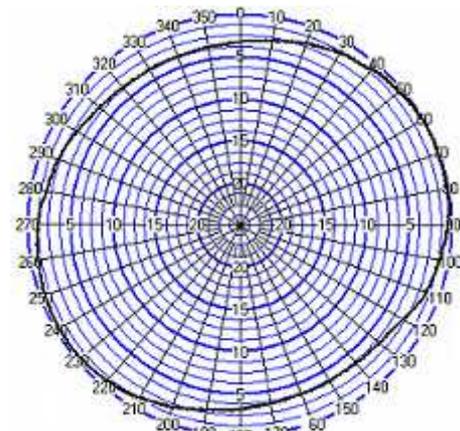


Fig. 13. Diagrama de polarización, medido en dirección al máximo, en 8,25 GHz.

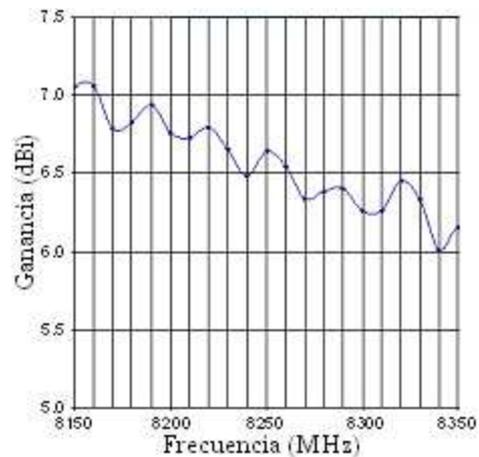


Fig. 14. Medición de ganancia en el máximo.

REFERENCES

- [1] K. Isaiah Timothy and Tan Soon Hie "Conical-beam Antenna to Compensate Free Space Loss at X-band in LEO satellite Systems" ICICS-PCM 2003 15-18 December 2003 Singapore.
- [2] Surrey Space Centre "SSTL S-Band Quadrifilar Helix Antenna", University of Surrey Guildford, Surrey GU2 7XH United Kingdom, www.sstl.co.uk.
- [3] RYMSA catalogue, Space and Defence Division "Constant coverage antenna", www.rymsa.com.
- [4] Kumar, A., "A Shaped Beam Antenna for Data Transmission", 90CH2776-3/0000-1834 IEEE (1990).
- [5] Hallen, E., "Electromagnetic Theory", John Wiley and Sons, Nueva York (1962).
- [6] Krauss, J.D., "Antennas", Mcgraw Hill 11-126 (1950).
- [7] Kumar, A., IDHT "Antenna for ERS-1 satellite", Proc. IEEE I GRAS Symposium (1985).
- [8] Kumar, A., Histrov, H.D., "Microwave Cavity Antennas" Artech House 103-213 (1989).