

LP0965 log-periodic antenna performance analysis for radar applications

Análisis de la antena log-periódica LP0965 para aplicaciones de radar

Alejandra Isabel Medina-Díaz¹, Víktor Iván Rodríguez-Abdalá¹, José Ricardo Gómez-Rodríguez¹, Salvador Ibarra-Delgado¹, Remberto Sandoval-Aréchiga¹, and Efrén González-Ramírez¹

¹ Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica,
Posgrado en Ingeniería para la Innovación Tecnológica,
Carretera Zacatecas - Guadalajara, Kilómetro 6, Ejido la Escondida, Zacatecas, México, CP 98160.
{a.medina,abdala,gonzalezefren,jrgrodri, rsandoval,sibarra}@uaz.edu.mx

Abstract

The lack of adequate technical documentation on the LP0965 antenna characteristics provides an opportunity for a specific application analysis. In this article, we analyze this antenna in order to estimate its efficiency in terms of bandwidth, gain and directivity for radar applications. This is known for its high bandwidth, which makes it suitable for applications in a wide frequency range. The analysis includes simulations and experimental measurements.

Keywords— Radar Antenna, bandwidth, log-periodic

Resumen

La falta de documentación técnica adecuada sobre las características de la antena LP0965, ofrece una oportunidad de análisis para una aplicación específica. El presente artículo analiza dicha antena con la finalidad de determinar su idoneidad en términos de ancho de banda, ganancia y directividad en aplicaciones de radar. Esta es conocida por su gran ancho de banda, lo que la hace adecuada para aplicaciones en un amplio rango de frecuencias. El análisis incluye simulaciones y mediciones experimentales de la antena.

Palabras clave— Antena de radar, ancho de banda, log-periódica

I. Introducción

Como en cualquier sistema de comunicación, las antenas juegan un papel muy importante, ya que dependiendo de la aplicación es el tipo de antena a usar [1]. Los parámetros a considerar en el diseño de una antena son: patrón de radiación, potencia radiada, directividad, ganancia, eficiencia, ancho de banda, ancho de haz, la forma de la antena, entre otros. En aplicaciones de radar, las antenas deben cumplir con determinadas características para su correcto funcionamiento, entre ellos una alta ganancia y un ancho de haz estrecho, ya que estos son fundamentales para determinar la ubicación de los blancos que se detectan [2].

Según [3], el ancho de haz permite determinar la resolución de la antena para distinguir entre dos fuentes radiantes o blancos de radar adyacentes. El criterio de resolución más común establece que la capacidad de una antena para distinguir entre dos fuentes es igual a la mitad del primer ancho de haz nulo (First Null Beam Width, FNBW/2, por sus siglas en inglés), que generalmente se utiliza para aproximar el ancho de haz a la mitad de la potencia (Half Power Beam Width, HPBW, por sus siglas en inglés) como se observa en la Fig. 1.

De acuerdo con [4], el diseño de una antena de radar necesita balancear entre un ancho de banda amplio, necesario para adaptarse a cambios rápidos en la trayectoria del objetivo, y uno estrecho, requerido para mejorar la sensibilidad.

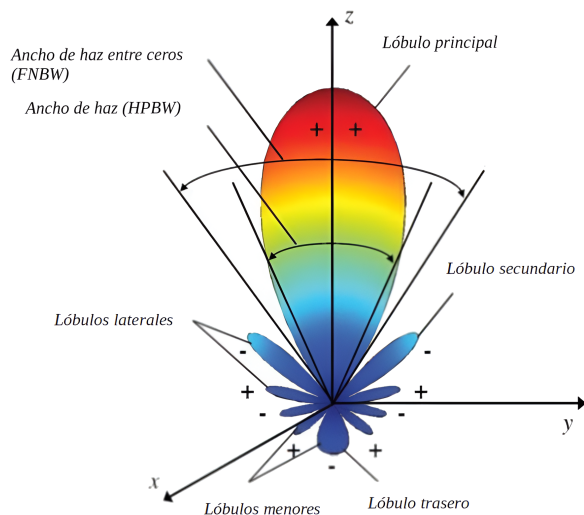


Figura 1: Patrón de radiación de una antena directiva.

En distancias largas, donde los movimientos angulares del objetivo son menores y la señal es más débil, es preferible un ancho de haz estrecho para mantener una alta sensibilidad y minimizar el retraso en el seguimiento. Por otro lado, a distancias cortas, donde los movimientos angulares son más pronunciados, se necesita un ancho de haz más amplio para seguir eficazmente al blanco.

Además, otros parámetros como: polarización, ganancia de directividad, ganancia de potencia, apertura efectiva, radiación de lóbulos laterales y la eficiencia de apertura son aspectos a cuidar según [4].

Bajo estas condiciones, una antena logarítmica periódica cumple con ciertas características para antenas de radar como una banda amplia de frecuencias y alta directividad. De acuerdo con [5], el uso de discontinuidades apropiadamente localizadas en la estructura de la antena es lo que hace posible que tenga una banda amplia de frecuencias, es decir, un arreglo de dipolos. En el mercado existen varios tipos de antenas con diferentes características, sin embargo, a menudo la documentación técnica de estas antenas es insuficiente o incluso inexistente, lo que impide realizar cálculos precisos para aplicaciones específicas debido a la falta de dicha información.

Esta carencia hace necesario recurrir a modelos teóricos de diseño de antenas para estimar los parámetros faltantes. Una vez completados estos cálculos, es posible llevar a cabo experimentos para evaluar el desempeño de la antena en aplicaciones particulares y explorar su rendimiento.

En el caso de la antena LP0965, la falta de documentación técnica relacionada a su patrón de radiación y

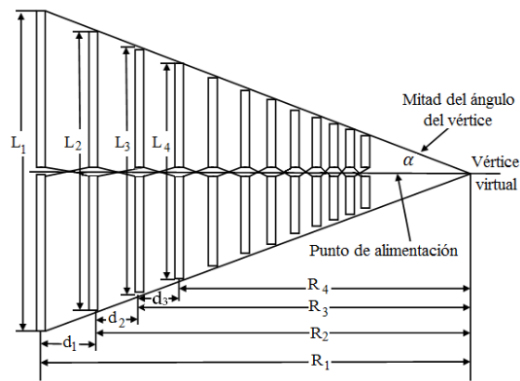


Figura 2: Antena LP.

otras características ofrece una oportunidad para un análisis detallado para aplicaciones de radar. Esta falta de documentación puede deberse a que se trata de una antena de banda amplia y se espera un comportamiento estable dentro de su rango de frecuencia. Por ello, a partir de la medición de las dimensiones de la antena, se llevó a cabo la simulación, modelado y análisis con el objetivo de obtener una caracterización.

En este contexto, el presente artículo se centró en el análisis y la comparación entre los resultados de simulación de diseño contra las mediciones en una cámara anecoica de la antena log-periódica LP0965 a una frecuencia de 3.15 GHz, adquirida de Ettus Research, que opera en un rango de frecuencia de 850 MHz a 6.5 GHz, de acuerdo a las especificaciones del fabricante.

El artículo se organiza de la siguiente manera: en la Sección II se muestra el marco teórico para el diseño de una antena LP (Logarítmica Periódica); en la Sección III se realiza la parametrización y modelado de la antena; y finalmente en las secciones IV y V se muestran los resultados y conclusiones.

I.1. Antecedentes

La antena LP0965 ha sido utilizada en el desarrollo de radares de corto alcance, [6] realizó un radar para ver a través de muros usando Wi-Fi, de forma similar en [7], se obtuvieron imágenes con radar de penetración basado en SDR; por otro lado, [8] realizó un sistema de radar armónico el cual fue capaz de detectar con fiabilidad algunos dispositivos a una distancia de aproximadamente dos metros, en [9] identificaron dispositivos electrónicos sin red, apagados o que intentaron evadir la detección, mientras que en [10] se demostró que este tipo de radar también puede detectar la presencia de baterías con una alta precisión en la mayoría de los casos. Finalmente, en [11], el sistema de radar pulsado tuvo una resolución de

distancia mayor de 150 m, sin embargo, con 6.7% de error.

Diversas aplicaciones con la antena han logrado detectar correctamente la presencia de objetos entre el 90% y 100%. Por ejemplo, en [12], un sistema de reconocimiento de objetos basado en microondas utilizando USRP con una señal pulsada de tan solo 10 ms fue capaz de diferenciar varios objetos.

1.2. Antenas Log-Periódica

Existen diferentes antenas LP planas: circular, cuadrada, cónica y piramidal. Como se observa en la Fig. 2, la geometría LP se utiliza para diseñar una antena configurando primero un conductor eléctrico dentro de cualquiera de las celdas. Esta configuración, debidamente escalada, se reproduce en las demás celdas y se repite infinitas veces para las celdas más pequeñas, ya que la estructura resultante convergerá en un punto. La repetición infinita de las celdas más grandes hace que el tamaño de la estructura aumente sin límite.

El principio de operación de este tipo de antena se basa en que cada dipolo actúa como un elemento resonante para una frecuencia en particular, y sus resonancias se escalonan de modo que se solapan entre sí. De esta manera, de acuerdo con [13], a medida que varía la frecuencia, la radiación efectiva se transfiere de un dipolo al siguiente, generando un comportamiento casi independiente de la frecuencia.

De acuerdo a [14], una geometría LP se define como una estructura cuyas propiedades eléctricas varían periódicamente con el logaritmo de la frecuencia. Esta consiste en una tira de metal cuyos bordes están definidos por la mitad del ángulo del vértice ($\alpha/2$), como se muestra en Fig. 2.

Asimismo, según [5] y [13], la geometría de la antena log-periódica se define principalmente por el factor de escala o relación geométrica δ y por el ángulo de vértice α , estableciendo así el escalamiento de las celdas. El factor de escala δ determina este escalamiento y establece la relación entre las dimensiones de los elementos sucesivos, como se expresa en las ecuaciones (1) y (2).

$$\delta = \frac{R_{n+1}}{R_n}, \quad (1)$$

$$\delta = \frac{L_{n+1}}{L_n}, L_n > L_{n+1}, \quad (2)$$

donde R_n es la distancia del vértice virtual a cualquiera de los dipolos y L_n la longitud del dipolo.

Además, como se observa en la Fig. 1, el patrón de radiación de la antena está relacionado con su diseño, ya que, debido a su estructura de dipolos dispuestos de manera logarítmica, donde el dipolo más largo actúa como reflector y los dipolos sucesivos como directores,

genera un patrón de radiación que concentra la energía en una dirección.

Con esto, el dipolo más largo L_1 se asocia con la frecuencia mínima de operación, mientras que el más corto L_{18} corresponde a la frecuencia máxima. En una antena LP, las longitudes no corresponden a media longitud de onda, por lo que en este diseño se emplea una relación aproximada dada por la Ec. (3)

$$L = \frac{\lambda}{5} = \frac{c}{5f}. \quad (3)$$

donde c es la velocidad de la luz ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$), f es la frecuencia de operación y λ es la longitud de onda. Por lo tanto, para determinar L_1 se utiliza la Ec. (4) y para L_{18} la Ec. (5).

$$L_1 = \frac{c}{5f_{\min}}, \quad (4)$$

$$L_{18} = \frac{c}{5f_{\max}}. \quad (5)$$

El dipolo más largo resuena a la frecuencia más baja, mientras que el más corto resuena a la frecuencia más alta [15]. Su ancho de banda amplio se logra mediante la variación de la longitud de los dipolos y la función logarítmica de la distancia entre ellos (denominada factor de espaciado), lo que permite que la antena cubra frecuencias desde 850 MHz hasta 6.5 GHz para el caso de la antena LP0965.

Según [16], para cada frecuencia de operación, los dipolos que más contribuyen a la radiación son aquellos cuyo tamaño es aproximadamente la mitad de la longitud de onda correspondiente. Estos dipolos activos se desplazan desde los más largos hacia los más cortos (cerca del alimentador), y debido a la configuración de la línea de alimentación, las corrientes fluyen en fase a lo largo de la estructura. Por eso, la antena emite su energía principalmente hacia adelante (hacia el alimentador), lo que se llama patrón axial (end-fire, en inglés) como se muestra en la Fig. 3.

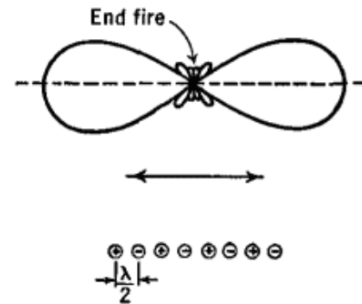


Figura 3: Patrón axial.

En [17] se describe la función de transferencia de una LPDA (acrónimo en inglés de log-periodic dipole antenna), de la cual se deduce que el patrón de radiación se

obtiene sumando el campo electromagnético emitido por cada dipolo resonante, teniendo en cuenta tres factores: su patrón individual de radiación, la amplitud de la corriente inducida y fase asociada, causada por su posición y la forma en que se alimenta la antena.

I.3. Sistemas de radar

En términos generales, los sistemas de radar son muy similares a los sistemas de comunicación. El diagrama de bloques simplificado de un radar consiste en un generador de señales, transmisor, duplexor, antena, procesador de señales y procesador de datos [18].

El generador de señales produce una señal lineal que es modulada a una señal pasabanda de alta frecuencia, la cual es transmitida por la antena directiva del radar hacia el espacio. El objetivo refleja la señal incidente y parte de ella regresa al radar.

El procesador de señales recibe la señal para estimar la ubicación del objetivo y el procesador de datos, mediante algoritmos, determina las características como: tamaño, dirección y velocidad del objetivo.

I.3.1. Formas de onda en radares

El principio básico de operación de un radar consiste en emitir ondas electromagnéticas en forma de pulsos o de onda continua, que al encontrarse con objetos se reflejan hacia la antena del radar. El retardo y los cambios en la señal reflejada permiten determinar la distancia y la velocidad de los blancos [1].

Las formas de onda utilizadas en los radares de pulso son: de duración finita, periódico y tren de pulsos de duración finita. En los radares de onda continua son: sin modular y moduladas, en las cuales está la onda senoidal, diente de sierra, triangular y cuadrada [19].

También en los radares de Modulación de Frecuencia Lineal (Linear Frequency Modulation, LFM, por sus siglas en inglés) se usan las formas de onda de: diente de sierra, triangular y segmentada.

Los radares de Onda Continua Modulada en Frecuencia (Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW, por sus siglas en inglés) son modulados por una señal periódica como en los radares LFM.

II. Modelado de la antena

Se realizó la medición de las dimensiones de la antena LP095 que se muestra en la Fig. 4, tales como: ancho, largo y altura de los brazos, separación entre los brazos, ancho y largo de la placa de circuito impreso (Printed Circuit Board, PCB, por sus siglas en inglés) para su parametrización obteniendo la Tabla 1.



Figura 4: Antena LP0965.

Tabla 1: Mediciones de la antena LP0965

Dimensión	Metros
Largo del PCB	0.1422
Ancho del PCB	0.0143 0.0133
Altura del PCB	0.0013
Ancho de línea	0.00133
Longitud de alimentación	0.0023
Largo de brazos	[0.007 0.0068 0.0086 0.0092 0.0114 0.0128 0.015 0.0168 0.0192 0.0237 0.0267 0.0308 0.033 0.0376 0.0415 0.0480 0.0556 0.064]
Ancho de brazos	[0.0002 0.0002 0.0002 0.0002 0.0004 0.0004 0.0004 0.0005 0.0006 0.0006 0.0006 0.0006 0.0007 0.0007 0.0004 0.001 0.0026 0.0034]
Espacio entre brazos	[0.0017 0.0019 0.0023 0.0027 0.003 0.0035 0.0041 0.0045 0.0047 0.0063 0.008 0.008 0.0088 0.0115 0.012 0.0127 0.013]

Usando las ecuaciones (1) y (2), la relación geométrica de la antena se muestra en las ecuaciones (6) y (7).

$$\delta = \frac{R_2}{R_1} = \frac{0.1209}{0.1422} = 0.86, \quad (6)$$

$$\delta = \frac{L_2}{L_1} = \frac{0.0556}{0.064} = 0.86. \quad (7)$$

Y de acuerdo a las ecuaciones (3)-(5), la relación de la longitud de onda y la longitud de los dipolos se muestra en las ecuaciones (8)-(11).

$$\lambda_{max} = \frac{c}{f_{min}} = \frac{3 \times 10^8}{850 \times 10^6} = 0.3529 \text{ m}, \quad (8)$$

$$\lambda_{min} = \frac{c}{f_{max}} = \frac{3 \times 10^8}{6.5 \times 10^9} = 0.0462 \text{ m.} \quad (9)$$

Dipolo más largo

$$L_1 = \frac{\lambda_{max}}{5} = 0.07058 \text{ m,} \quad (10)$$

Dipolo más corto

$$L_{18} = \frac{\lambda_{min}}{5} = 0.0924 \text{ m.} \quad (11)$$

En la Tabla 2, se muestra el error entre el largo (L_n) del brazo medido y el estimado (W_n).

Tabla 2: Mediciones vs calculado

Dipolo	Calculado (m)	Medido (W_b) (m)	$L_n - W_b$ (m)	% error
L_1	0.07058	0.06400	0.00658	9.45
L_2	0.06524	0.05560	0.00964	14.73
L_3	0.06067	0.04800	0.01267	20.96
L_4	0.05637	0.04150	0.01487	27.40
L_5	0.05232	0.03760	0.01472	28.06
L_6	0.04850	0.03300	0.01550	30.00
L_7	0.04491	0.03080	0.01411	31.45
L_8	0.04142	0.02670	0.01472	35.43
L_9	0.03804	0.02370	0.01434	38.01
L_{10}	0.03475	0.01920	0.01555	44.77
L_{11}	0.03156	0.01680	0.01476	46.88
L_{12}	0.02848	0.01500	0.01348	47.37
L_{13}	0.02551	0.01280	0.01271	49.12
L_{14}	0.02264	0.01140	0.01124	50.52
L_{15}	0.01988	0.00920	0.01068	53.66
L_{16}	0.01721	0.00860	0.00861	55.11
L_{17}	0.01463	0.00680	0.00783	57.87
L_{18}	0.00924	0.00700	0.00514	68.94

III. Resultados

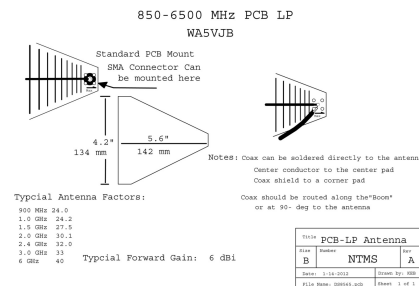


Figura 5: Hoja de especificaciones 1.

La hoja de especificaciones del fabricante presenta un rango de frecuencias de operación de 850 MHz a 6.5 GHz, como se muestra en la Fig. 5. El gráfico de la Fig. 6 muestra la variación del parámetro s_{11} de la antenna en función de la frecuencia. Comparado con la Fig. 7, se observa la frecuencia en la que se obtiene mejor adaptación de impedancia (mínimo) es a partir de 2.4 GHz aproximadamente. En la Fig. 8 se observa una ganancia constante a partir de 2.4 GHz aproximadamente como lo indica la Fig. 7 y se observa la máxima ganancia en 6.09 GHz con 5.8 dB.

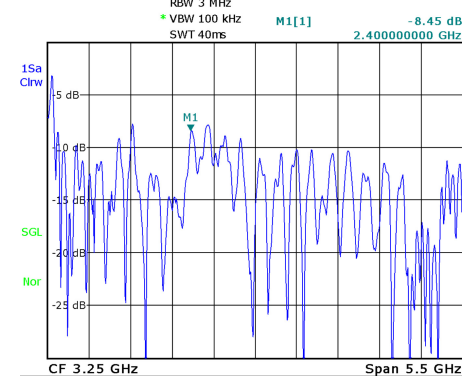


Figura 6: Hoja de especificaciones 2.

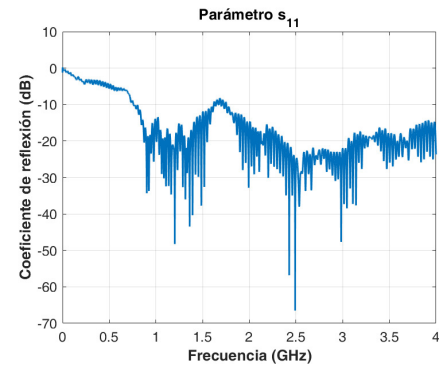


Figura 7: Coeficiente de reflexión.

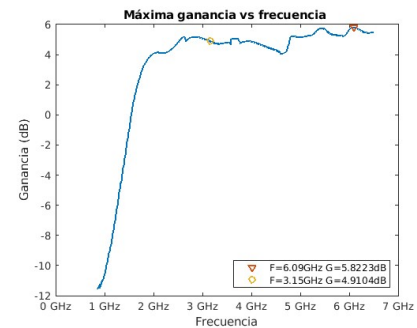


Figura 8: Ganancia calculada.

De acuerdo a la Tabla 1, se simuló el patrón de radiación en la frecuencia de operación de 3.15 GHz como se observa en las figuras 9 y 10.

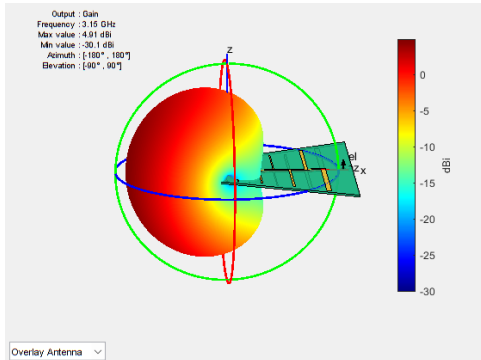


Figura 9: Plano en 3-D simulado.

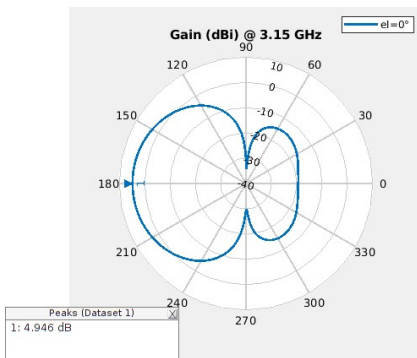


Figura 10: Plano azimuth simulado.

Por lo que en términos de ganancia, la antena es adecuada para aplicaciones de radar de corto alcance, ya que típicamente se utilizan antenas de 5 a 10 dB [20], considerando que la ganancia no es el único criterio, sino que debe evaluarse junto con otras características como el patrón de radiación.

En las figuras 11 y 12 se muestra el patrón de radiación en la frecuencia de 6.09 GHz donde se tiene la máxima ganancia de la antena.

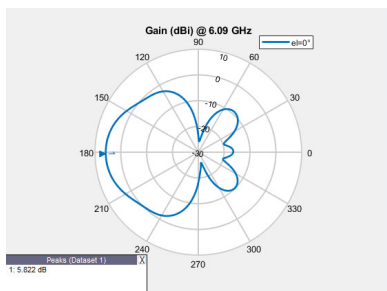


Figura 11: Plano azimuth simulado.

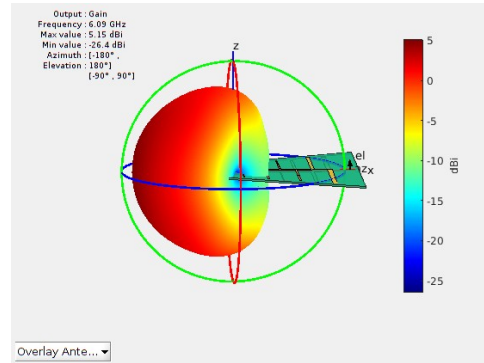


Figura 12: Plano 3-D simulado.

Las figuras 13 y 14 muestra el patrón de radiación de la antena a una frecuencia de 3.15 GHz medido en una cámara anecoica a cinco alturas diferentes representadas por un color diferente: 1 m, 1.25 m, 1.5 m, 1.75 m y 2 m. Comparando los resultados de simulación de las figuras 9 y 10, son similares, mostrando un comportamiento directivo, aunque con un ancho de haz amplio.

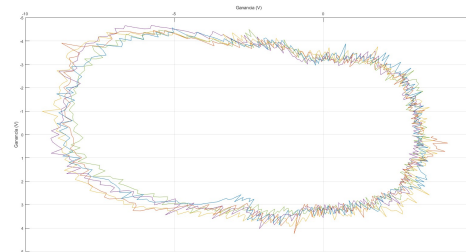


Figura 13: Patrón de radiación a diferentes alturas.

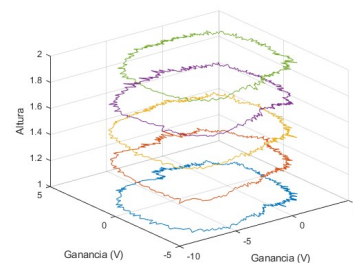


Figura 14: Patrón de radiación a diferentes alturas.

IV. Conclusiones

La antena mostró un comportamiento directivo bajo ya que presenta un ancho de haz amplio. Estos factores afectan la precisión con la que un radar puede determinar la dirección hacia un objetivo, ya que la capacidad

de distinguirlo depende del ancho del haz y los lóbulos secundarios de la antena.

Además, la antena tiene una ganancia de aproximadamente 5 dB lo que limita el alcance de la señal transmitida. Por estas razones la antena log-periódica LP0965 es especialmente adecuada para aplicaciones de radar de corto alcance, por lo que se sugiere para onda continua en vez de pulsos.

Referencias

- [1] Bassem R Mahafza. *Radar systems analysis and design using MATLAB*. Chapman y Hall/CRC, 2005.
- [2] David Hysell. *Antennas and radar for environmental scientists and engineers*. Cambridge University Press, 2018.
- [3] Constantine A Balanis. *Antenna theory: analysis and design 3rd ed*. John Wiley & sons, 2016.
- [4] Merrill Ivan Skolnik et al. *Introduction to radar systems*. Vol. 3. McGraw-hill New York, 1980.
- [5] Eduardo Rojas Falla, Carlos Sánchez Retis, Nestor Gómez Valencia et al. «Teoría de modelos y diseño de una antena Log-Periódica». En: *Corporación Universitaria Autónoma de Occidente* (1976).
- [6] Isaac Cushman et al. «Experimental Approach for Seeing Through Walls Using Wi-Fi Enabled Software Defined Radio Technology». En: *Digital Communications and Networks* 2 (sep. de 2016). doi: 10.1016/j.dcan.2016.09.001.
- [7] Rehan Hafiz y Mahboob Ur Rahman. «A Deep Approach for Reliable Subsurface Imaging in Software-Defined Ground Penetrating Radar». En: *Second Workshop on Machine Learning and the Physical Sciences (NeurIPS 2019), Vancouver, Canada* (2019).
- [8] Beatrice Perez et al. «Evaluating the practical range of harmonic radar to detect smart electronics». En: (oct. de 2023), págs. 528-535. doi: 10.1109/MILCOM58377.2023.10356371.
- [9] Beatrice Perez et al. «Identification and classification of electronic devices using harmonic radar». En: *2023 19th International Conference on Distributed Computing in Smart Systems and the Internet of Things (DCOSS-IoT)*. IEEE. 2023, págs. 248-255.
- [10] Cesar Arguello et al. «Detecting Battery Cells with Harmonic Radar». En: *Proceedings of the 17th ACM Conference on Security and Privacy in Wireless and Mobile Networks*. 2024, págs. 231-236.
- [11] Alifia Utami, Iswandi Iswandi e I Mustika. «Random Time Delay Mitigation in Pulse Radar Systems Implementation using Universal Software Radio Peripheral (USRP) and GNU Radio Companion (GRC)». En: *IJITEE (International Journal of Information Technology and Electrical Engineering)* 2 (feb. de 2019), pág. 85. doi: 10.22146/ijitee.42873.
- [12] Viktor Erdélyi et al. «Learn to see: A microwave-based object recognition system using learning techniques». En: *Adjunct Proceedings of the 2021 International Conference on Distributed Computing and Networking*. 2021, págs. 145-150.
- [13] D Isbell. «Log periodic dipole arrays». En: *IRE transactions on antennas and propagation* 8.3 (2003), págs. 260-267.
- [14] John Leonidas Volakis. *Antenna engineering handbook*. Vol. 1755. McGraw-Hill New York, 2007.
- [15] Paul E Mayes. «Frequency-independent antennas». En: *Antenna Handbook: Theory, Applications, and Design*. Springer, 1988, págs. 517-637.
- [16] RE Tapia-Rodríguez et al. «Design of Log-Periodic Dipole Array Antenna with Implemented Extra Dipole». En: *2018 15th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*. IEEE. 2018, págs. 1-5.
- [17] Francesco Merli et al. «Analysis, design and realization of a novel directive ultrawideband antenna». En: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 57.11 (2009), págs. 3458-3466.
- [18] William L Melvin y James A Scheer. *Principles of Modern Radar: Vol. 3: Radar Applications*. SciTech Publishing Incorporated, 2013.
- [19] Mohinder Jankiraman. *FMCW radar design*. Artech House, 2018.
- [20] David K. Barton y Ernest S. Levine. *Radar System Analysis and Modeling*. Artech House, 1991.