

ESTIMACIÓN DE RADIOENLACE PUNTO A PUNTO DE UN MINI VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO

POINT TO POINT RADIO LINK ESTIMATION OF A MINI UNMANNED AERIAL VEHICLE

Andrés Calvillo Téllez

Instituto Politécnico Nacional
calvillo@citedi.mx

José Cruz Núñez Pérez

Instituto Politécnico Nacional
nunez@citedi.mx

Antonio Gómez Roa

Universidad Autónoma de Baja California
gomez_roa@uabc.edu.mx

J. R. Cárdenas Valdez

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana
jose.cardenas@tectijuana.edu.mx

Resumen

En este trabajo se presenta un método de predicción del margen de desvanecimiento de la propagación de ondas de radio y el máximo rango, entre un vehículo aéreo no tripulado (UAV) y una estación de control terrena. El rango de comunicación está sujeto, a la normatividad de las regulaciones gubernamentales, que determinan el uso de la banda de frecuencia de 900 MHz, industrial, científico y médica, y restringen la cantidad de energía de la potencia isotrópica radiada efectiva a 36 dBm en esas frecuencias. El procedimiento de predicción se realizó en tres pasos. En primer lugar, se obtienen los datos de telemetría del UAV como altitud, latitud y longitud. Como segundo paso se calcularon: la distancia, los ángulos azimutales, y el libramiento del 60% de claridad de la zona de Fresnel, sobre la línea de vista del radioenlace. Finalmente se determinaron: las pérdidas por propagación en el espacio libre, nivel de recepción de la señal y el margen de desvanecimiento de la señal por condición climática, terreno y curvatura de la tierra. Los resultados

muestran que, a partir de la obtención del máximo rango, los parámetros de diseño, el presupuesto del enlace, el análisis de rendimiento, y el margen desvanecimiento, son aceptables para la viabilidad del radioenlace y mejor desempeño del dron.

Palabras Claves: PIRE, radioenlace, vehículo aéreo no tripulado, zona de fresnel.

Abstract

This paper presents a method of predicting the fade margin of radio wave propagation and the maximum range, between an unmanned aerial vehicle (UAV) and an earth control station. The communication range is subject to the regulations of the governmental laws, which determine the use of the frequency band of 900 MHz, industrial, scientific and medical, and restrict the amount of energy of the effective radiated isotropic power to 36 dBm frequencies. The prediction procedure was carried out in three steps. First, you can get the UAV telemetry data as altitude, latitude, and longitude. As a second step to calculate: the distance, the azimuthal angles, and the clearance of 60% clarity of the Fresnel zone, on the line of sight of the radio link. Finally, it was determined: the percentage of propagation in the free space, the level of reception of the signal and the margin of fading of the signaling by climatic condition, the terrain and the curvature of the earth. The results showed that from obtaining the maximum rank, the design parameters, the budget of the link, the analysis of performance, and the margin of improvement, are acceptable for the viability of the radio link and the best performance of the drone.

Keywords: EIRP, fresnel zone, radio link, unmanned aerial vehicle.

1. Introducción

Los drones son aeronaves no tripuladas (UAV) las cuales se controlan por un mando remoto mediante conectividad inalámbrica en la banda de 900MHz son bandas reservadas internacionalmente para uso no comercial de radiofrecuencia electromagnética en áreas industrial, científica y médica [Belal, 2016]. Los UAV son un instrumento emergente de investigación, importante en aplicaciones relacionadas a ciencias de la tierra, mar, agricultura, clima, vigilancia, búsqueda y rescate entre otras [Andersen, 1995]. Para realizar estas tareas y maximizar el

rango del enlace de comunicación entre el UAV y la estación terrena se debe de garantizar una comunicación libre de interferencia que sobrepase la sensibilidad del receptor comúnmente establecida por un margen mínimo en dBm. Sin embargo, los radioenlaces experimentan pérdida de señal cuando el UAV vuela a más de 15 km y una altitud de 500m [CCIR, 1990]. La importancia del estudio de propagación reside en el progreso de los servicios de comunicación que mediante la descripción de modelos precisos puedan predecir la pérdida de señal [Dalbakk, 2014], [Bertoni, 1994]. En la estimación del radioenlace, al restar la sensibilidad especificada del receptor del nivel de señal recibida, se determina hasta qué punto se pueden tolerar las pérdidas de trayectoria, así como el desvanecimiento de la señal, antes de que afecte el rendimiento del sistema. Donde la sensibilidad del receptor especifica la potencia mínima de entrada de radiofrecuencia requerida para recuperar la señal de salida utilizable [Campbell, 2016]. La Norma Oficial Mexicana NOM-121-SCT1-2009 establece las condiciones técnicas de operación para un sistema de radiocomunicación que utiliza el espectro radioeléctrico en la banda de frecuencias en el rango de 902-928 MHz. Dicha banda establece la potencia máxima de transmisión entregada a las antenas de los sistemas la cual no debe exceder de 1 W. En este tipo de enlace se utiliza antenas de transmisión con ganancia direccional máxima de 6 dBi, con el fin de obtener una potencia isotrópica radiada equivalente (PIRE) máxima de 4 W o 36 dBm. Con antenas de ganancia direccional mayor a 6 dBi, la potencia total de entrada y su densidad de potencia, deberán ser reducidas en la misma cantidad que la ganancia direccional establecido por los 6 dBi.

2. Métodos

En esta sección, se revisan algunos modelos teóricos, empíricos y de pérdida de trayectoria específicos del terreno. Los modelos de muestra revisados incluyen, el modelo de pérdida de ruta de espacio libre. Estos modelos revelan que la pérdida de ruta aumenta a medida que aumenta la distancia de separación entre el transmisor y el receptor.

El trabajo se divide en tres secciones la primera se enfoca en incluir los datos de las antenas propuestas, después se estima el libramiento de la primera zona de Fresnel

al 60% de claridad y el desempeño del radioenlace basado en la potencia del transmisor, las ganancias de las antenas y las pérdidas asociadas, así como la atenuación por propagación en el espacio libre. En este trabajo se dibuja un perfil de radioenlace entre dos puntos terrestres y se muestra el libramiento del 60% de la primera zona Fresnel, además de obtener la gráfica de desempeño considerando el factor climático y rugosidad del terreno mostrando el análisis de pérdidas, ganancias potencia, sensibilidad del receptor, el nivel de PIRE, atenuación debido a la propagación en la trayectoria, el nivel de recepción de la señal y margen de desvanecimiento. En este trabajo se reporta la caracterización del radioenlace para un análisis en la región de Tijuana, México [Freeman, 1997], [Doble, 1996]. El rango máximo se calcula a partir de las coordenadas geográficas de cada punto del radioenlace y se expresan en base a las ecuaciones 1 a 4 [Hall, 1996], [ARRL, 1990]:

$$d_{[km]} = 1.609\sqrt{h^2 + v^2} \quad (1)$$

$$h = (X_1 - X_2)[68.962 + 0.04525Y_m - 0.01274Y_m^2 + 0.00004117Y_m^3] \quad (2)$$

$$v = (Y_1 - Y_2)[68.712 - 0.001184Y_m + 0.0002928Y_m^2 - 0.000002162Y_m^3] \quad (3)$$

$$Y_m = \frac{Y_1 + Y_2}{2} \quad (4)$$

Donde:

d = distancia de separación.

h = distancia horizontal.

v = distancia vertical.

X_1 = Longitud del primer sitio en grados decimales.

X_2 = Longitud del segundo sitio en grados decimales.

Y_1 = Latitud del primer sitio en grados decimales.

Y_2 = Latitud del segundo sitio en grados decimales.

Es este caso se propone el enlace en las coordenadas geográficas de los puntos A (Centro de Convenciones de Tijuana) y B (Isla Coronado) las cuales son:

- Punto A: 32° 23' 17" Latitud Norte, 117° 03' 35" Longitud Oeste.

- Punto B: 32° 23' 37" Latitud Norte, 117° 14' 20" Longitud Oeste.

Si se sustituyen los valores en la ecuación 4 se obtiene una distancia 16.86 km. El ángulo azimut que existe entre dos puntos se toma como referencia el polo Norte (0°) en el sentido de las manecillas del reloj como lo ilustra la figura 1.

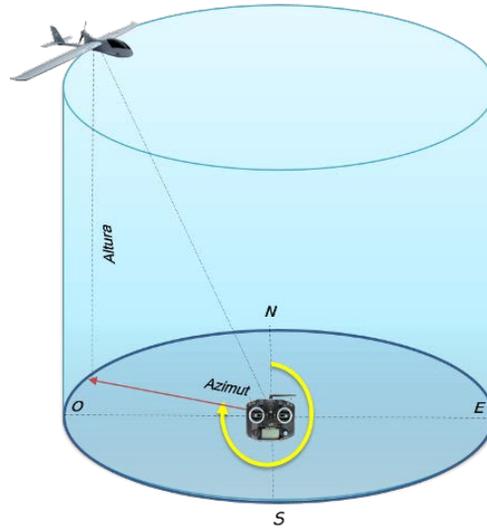


Figura 1 Medición del ángulo del azimut.

El ángulo azimutal de una línea es el ángulo horizontal medido en el sentido de las manecillas del reloj a partir de un meridiano de referencia, que se expresa por la ecuación 5 [ARRL, 1990].

$$\cos(C) = \frac{\text{sen}Y_2 - \text{sen}Y_1 \cos(d / 111.11)}{\cos Y_1 \text{sen}(d / 111.11)} \quad (5)$$

Donde:

$C = \text{ArcCos}(C)$, para la orientación respecto al norte.

Orientación efectiva respecto al norte, se deduce considerando el criterio si $X_1 > X_2$ entonces $Az = C$ y si $X_1 < X_2$, entonces $Az = 180^\circ + C$. Para el caso en cuestión, al evaluar el punto A y B se obtiene $C = 92.14^\circ$ y dado que $X_1 > X_2$, se tiene que $Az(A) = 92.14^\circ$.

En base a los mismos cálculos en dirección de B a A se obtiene $C = 92.14^\circ$ y dado que $X_1 < X_2$, entonces $Az(B) = 180^\circ + 92.14^\circ = 272.14^\circ$

La claridad de línea de vista, se considera la altura resultante debido a la curvatura de la tierra, que se expresa en la ecuación 6, la altura del obstáculo y una altura mínima correspondiente a un 60% de la primera zona de Fresnel, se determina en la ecuación 7. Lo anterior se representa en la figura 2, donde h_o es altura del obstáculo, h_{Tx} la altura de la antena transmisora y h_{Rx} la altura de la antena receptora, expresada en metros.

$$hct = \frac{0.078d1 \cdot d2}{K} \quad (6)$$

$$F1 = 17.32 \sqrt{\frac{d1 \cdot d2}{f \cdot d}} \quad (7)$$

Donde:

hct = Altura debido a la curvatura de la tierra [m].

$d1$ = Distancia del transmisor al obstáculo [km].

$d2$ = Distancia del obstáculo al receptor [km].

$K = 4/3$, factor de curvatura de la tierra.

$F1$ = Radio de la primera zona de Fresnel [m].

f = Frecuencia de operación [GHz].

$d = d1 + d2$, separación entre sitios [km].

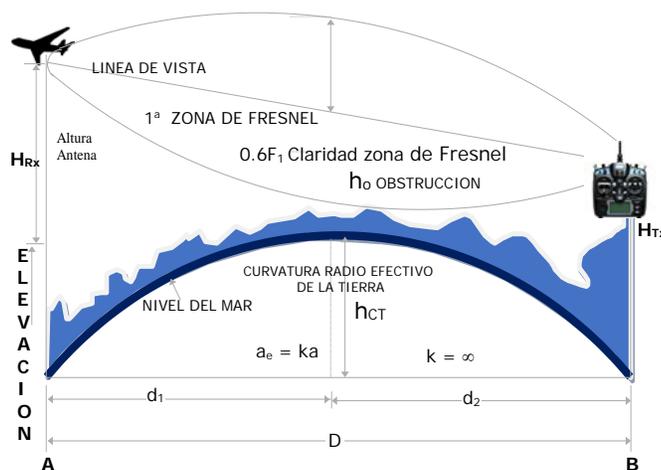


Figura 2 Trayectoria con un libramiento del 60% de claridad de la primera zona de

Fresnel con base en el primer obstáculo.

La altura mínima por la que debe pasar la línea de vista en el punto donde se encuentra ubicado el obstáculo que resulta de la suma de las alturas mencionadas y que se expresan en la ecuación 8.

$$Avl = ho + hct + 0.6F1 \quad (8)$$

Para el caso en estudio, el obstáculo se encuentra ubicado a 8 km del transmisor y con una altura de 0m SNM, por lo que los datos en la implementación son: $d1 = 8 \text{ km}$, $d2 = 8.8 \text{ km}$, $d = 16.84 \text{ km}$, $hct = 15 \text{ m}$, $ho = 280 \text{ m}$, $F1 = 37.4154762988081 \text{ m}$ y de la ecuación 8 se deduce $Avl = 240 \text{ m} + 2.47 \text{ m} + 22.4492857792848 \text{ m} = 286.33 \text{ m}$. La línea de vista debe pasar 6.33 m por encima del obstáculo a fin de lograr una recepción de señal apropiada.

Para la altura de antenas existe una relación entre la distancia de separación entre antenas y sus alturas correspondientes y se observa en la ecuación 9.

$$d = \sqrt{17h_{Tx}} + \sqrt{17h_{Rx}} \quad (9)$$

Donde:

h_{Tx} = altura de antena transmisora [m],

h_{Rx} = altura de antena receptora [m].

Por lo que se propone una altura para h_{Tx} , y se deduce h_{Rx} para conocer la altura requerida, como se observa en la ecuación 10.

$$h_{Rx} = \frac{(d - \sqrt{17h_{Tx}})^2}{17} \quad (10)$$

En este caso dado que $d = 16.8 \text{ km}$ y la altura $h_{Tx} = 500 \text{ m}$ de modo que $h_{Tx} = 15 \text{ m}$ y $h_{Rx} = 500 \text{ m}$. Para calcular el ángulo de elevación se requiere conocer la altura SNM de cada punto del radioenlace y las alturas de antenas, como se observa en la figura 3.

El ángulo de elevación en el punto B se observa en la ecuación 11.

$$\theta_B = \text{ArcTg} \left(\frac{h_{Tx} - h_{Rx}}{d} \right) \quad (11)$$

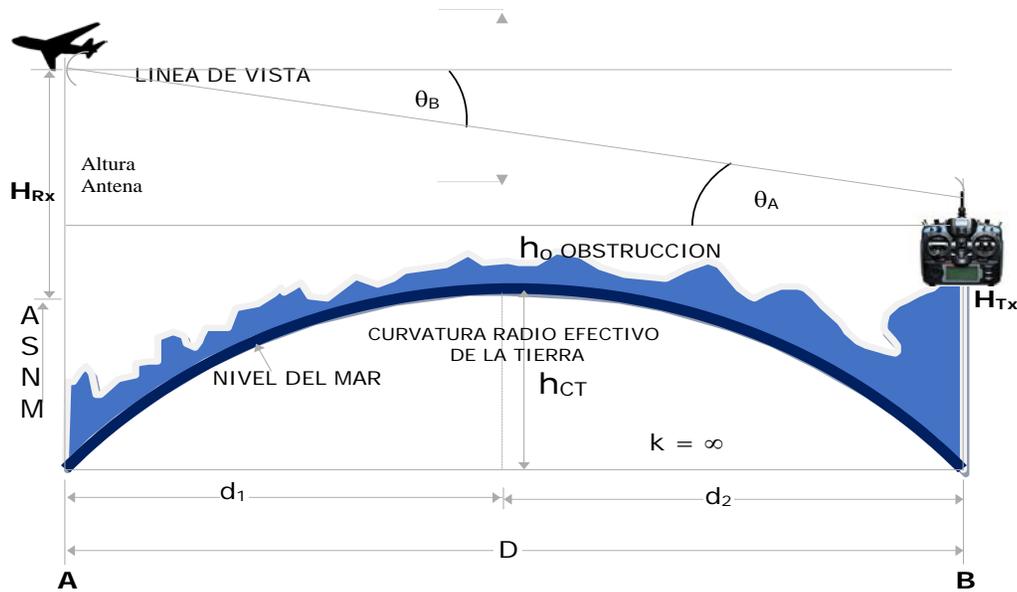


Figura 3 Ángulos de elevación del radioenlace.

De aquí se deduce el valor de los ángulos de: $\theta_A = -1.42^\circ$, $\theta_B = 1.42^\circ$.

La propagación de las ondas de radio inicia su trayecto desde la estación base, y están sujetas a la degradación causada por los fenómenos físicos tales como: refracción, reflexión y absorción causadas por su interacción con el medio y otros objetos de dispersión presentes en la trayectoria de radio entre el transmisor y el receptor. La figura 4 muestra a todos los parámetros involucrados y que se estarán obteniendo con las siguientes ecuaciones.

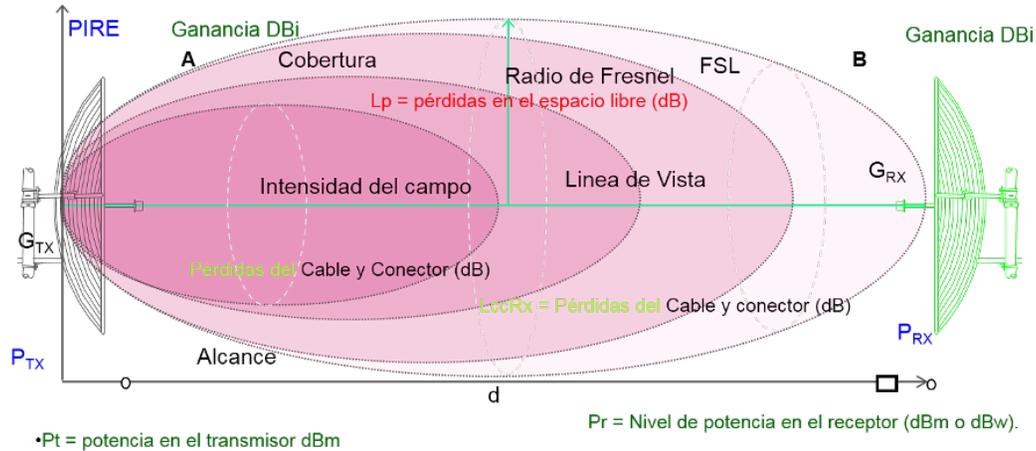


Figura 4 Parámetros del radioenlace.

Para obtener el valor del PIRE, se representa en la ecuación 12.

$$PIRE = P_T - LLT - LC + G_{Tx} \quad (12)$$

Donde:

- P_T = Potencia del transmisor,
- LLT = Pérdidas por línea de transmisión,
- LC = Pérdidas por conectores,
- G_{Tx} = Ganancia de antena transmisora.

Para alimentar la antena se requiere una potencia de transmisor de $P_T=30$ dBm, la ganancia de la antena es de 3 dBi. La línea de transmisión cuya atenuación es de $LLT(A)$ y $LLT(B) = 0.1$ dB. Cada conector presenta una pérdida de 0.5 dB y dado que se utilizan dos conectores en cada estación, se tiene que hay una pérdida de 1dB por conectores en cada estación $L_{C_{tx}} = L_{C_{rx}} = 1$ dB. El PIRE en la estación A se determina como $PIRE(A) = 30 \text{ dBm} + 3 \text{ dB} - 0.1 \text{ dB} - 0.5 \text{ dBi} = 32.6 \text{ dBm}$. Las pérdidas en espacio libre se atenúan en mayor o menor grado dependiendo de la distancia recorrida y la frecuencia utilizada, la atenuación se observa en la ecuación 13 [Mammadov, 2013], [Peng, 2016] y [Elchin, 2013].

$$FSL = 92.44 \text{ dB} + 20 \log(d) + 20 \log(f) \quad (13)$$

Del punto A al punto B se utiliza una frecuencia $f = 900$ MHz, de modo que, $FSL(AB) = 142.14$ dB. El margen de desvanecimiento, es el parámetro que indica

un nivel adicional de atenuación en la señal debido a los factores climáticos y geográficos del medio, su magnitud se determina por la ecuación 14 [Venkatasubramanian, 2013], [Kakar, 2015], [Cavalcanti, 2017].

$$FM = 30 \log(d) + 10 \log(6abf) - 10 \log(1 - R) - 70 \quad (14)$$

Donde:

FM = Margen de desvanecimiento [dB],

a = Factor topográfico (1=terreno plano, $\frac{1}{2}$ = promedio, $\frac{1}{4}$ =montañoso),

b = Factor climático ($\frac{1}{2}$ = húmedo, $\frac{1}{4}$ = normal, $\frac{1}{8}$ = seco),

R = Confiabilidad del sistema [0,1].

En base a los valores $a = 1$, $b = 1/4$ y una confiabilidad $R = 0.9999$, se calcula el margen de desvanecimiento, de A a B la frecuencia a utilizar es $f = 900 \text{ MHz}$ y $FM(AB) = 11.15 \text{ dB}$.

El nivel de recepción de la señal (RSL), es la cantidad de señal a la entrada del receptor el cual se deduce de la ecuación 15 [Lee, 1993], [Miller, 2015] y [Choudhary, 2015].

$$RSL = EIRP - FSL + G_{Rx} - L_{LTr} - L_{Cr} - FM \quad (15)$$

Donde:

$EIRP$ = Potencia Radiada Efectiva.

FSL = Pérdidas en espacio libre.

G_{Rx} = Ganancia de antena receptora.

L_{Tx} = Pérdidas en la línea de transmisión en el receptor,

L_{Cr} = Pérdidas por conectores en el receptor,

FM = Margen de desvanecimiento.

FM en la dirección de A hacia B, el nivel de señal recibida es: $RSL(AB) = 32.6 - 42.14 + 2.1 - 0.5 - 0.1 - 11.15 = -119.19 \text{ dBm}$. Los datos de la sensibilidad y ganancias de las antenas se obtienen de las hojas técnicas del radiomodem RFD900 de 900 MHz, con ultra largo alcance.

3. Resultados

En esta sección se muestran los resultados, en la tabla 1 se presentan los parámetros de la estimación con las especificaciones del sistema y del circuito, así como las pérdidas totales y en la figura 5 el rango de la cobertura del radioenlace.

4. Discusión

Si bien hay suficiente potencia en la antena receptora del dron, es posible que se presenten condiciones climáticas severas que pudieran afectar la sustentación del dron. La suficiencia de potencia de recepción, junto con los márgenes de confianza del orden de 10 dB estimados, no hacen un enlace seguro, debido a la probabilidad de obstrucción de línea de vista y con esto, provocar un desvanecimiento súbito de la señal del radioenlace, por lo que para garantizar la radiocomunicación en este rango debe asegurarse que el radiocontrol siempre apunte hacia el dron y que no se presenten obstrucciones [Yajnanarayana, 2018].

Tabla 1 Caracterización del Radioenlace.

Parámetro	Magnitud	Unidad
Permisionario	CITEDI-IPN	
Horario	De 12: a 15:00	Horas
Circuito	Centro de Convenciones Rosarito - Isla Coronado	B. C.
Longitud del enlace	16.84	Km
Potencia Nominal	30	dBm
Antena	Omnidireccional	360o
Polarización	Lineal	Normal
Ganancia	3	dBi
Altura SNM	30	m
Altura S.T:	1	m
Latitud A	32° 23' 17"	Norte
Longitud A	117° 03' 35"	Oeste
Latitud B	32° 23' 37"	Norte
Longitud B	117° 14' 20"	Oeste
MODULACION	Espectro disperso de salto de frecuencia	FHSS
Velocidad de transferencia de datos de aire	8, 16, 19, 24, 32, 48, 64, 96, 128, 192 y 250, 500 (seleccionable, predeterminado 64k)	kbit / sec
Tasa de error	10-6	Bit
Pot. de transmisión:	32.4	dBm
Perd. en espacio libre:	142.14	dB
Perd. en conectores:	0.50	dB
Perd. en l. Transmisión:	0.10	dB
Pérdidas totales:	170.22	dB
Nivel señal recibida	-119.19	dBm

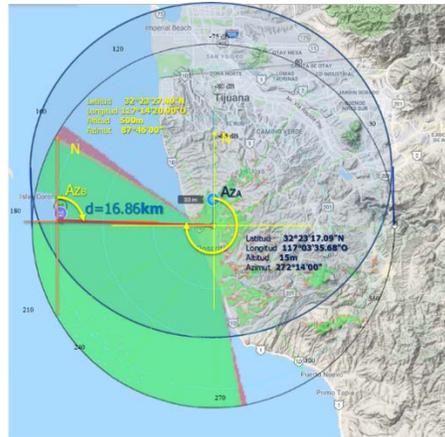


Figura 5 Cobertura del radioenlace a 16.86 km.

5. Conclusiones

El análisis del radioenlace entre el control remoto y la UAV se estimó una comunicación punto a punto, se observó que el nivel de la señal recibida fue superior en más de 10 dBm para el máximo rango de comunicación fijado.

El valor de la atenuación de la señal se mantuvo por debajo del nivel de la potencia recibida. El libramiento de 60% de la primera zona de Fresnel, permaneció libre de obstrucciones. El margen de desvanecimiento de la señal no fue afectado por la condición climática, la UAV permaneció en el horizonte y en línea de vista frente a la curvatura de la tierra.

No es suficiente con que la señal que llega al receptor sea mayor al nivel que fija el piso de la sensibilidad del receptor, sino que además se requiere de un margen que garantice el funcionamiento adecuado, cuando se presenten condiciones climáticas severas.

Lo único que podría afectar al radio enlace es que se presenten fallas de energía en la batería, esto debido a que alimenta tanto al sistema del radiocomunicador, como al sistema de control de vuelo del UAV.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Andersen, J.B., Rappaport, T.S. and Yoshida, S. (1995) Propagation Measurements and Models for Wireless Communications Channels, IEEE Communications Magazine, January 1995, pp. 42-49.

- [2] ARRL UHF/Microwave Experimenter's Manual (American Radio Relay League, 1990).
- [3] Belal, R. (2016). Analysis, estimation and prediction of fading for a time-variant UAV-ground control station wireless channel for cognitive communications.
- [4] Bertoni, H. L., Honcharenko, W., Maciel, L.R. and Xia, H. H., UHF Propagation Prediction for Wireless Personal Communications, Proceedings of the IEEE, Vol. 82, No. 9, September 1994, pp. 1333-1359.
- [5] Campbell Scientific, Inc. (2016). The Link Budget and Fade Margin. App. Note Code: 3RF-F
- [6] Cavalcanti, B. J., Cavalcante, G. A., Mendonça, L. M. D., Cantanhede, G. M., de Oliveira, M. M., & D'Assunção, A. G. (2017). A Hybrid Path Loss Prediction Model based on Artificial Neural Networks using Empirical Models for LTE and LTE-A at 800 MHz and 2600 MHz. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 16(3), 708-722.
- [7] CCIR (now ITU-R) Report 567-4, Propagation data and prediction methods for the terrestrial land mobile service using the frequency range 30 MHz to 3 GHz (International Telecommunication Union, Geneva, 1990).
- [8] CCIR Report 1145, Propagation over irregular terrain with and without vegetation (International Telecommunication Union, Geneva, 1990).
- [9] Choudhary, S., & Dhaka, D. K. (2015). Path loss prediction models for wireless communication channels and its comparative analysis. *Int. J. Eng. Management & Sciences*, 2(3), 38-43.
- [10] Dalbakk, L. E. (2014). Antenna System for Tracking of Unmanned Aerial Vehicle (Master's thesis, Institutt for elektronikk og telekommunikasjon).
- [11] Doble, J. (1996). Introduction to Radio Propagation for Fixed and Mobile Communications. Artech House.
- [12] Elchin, M. (2013). Long-range Communication Framework for Autonomous UAVs (Doctoral dissertation, Université d'Ottawa/University of Ottawa).
- [13] Freeman, R.L. (1987). Radio System Design for Telecommunications. Wiley & Sons.

- [14] Hall, M.P.M., Barclay, L.W. and Hewitt, M.T. (1996). Propagation of Radiowaves. Institution of Electrical Engineers.
- [15] He, R., Zhong, Z., Ai, B., Ding, J., & Guan, K. (2012). Analysis of the relation between Fresnel zone and path loss exponent based on two-ray model. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 11, 208-211.
- [16] Kakar, J. A. (2015). UAV communications: Spectral requirements, MAV and SUAV channel modeling, OFDM waveform parameters, performance and spectrum management (Doctoral dissertation, Virginia Tech).
- [17] Lee, W.C.Y., *Mobile Communications Design Fundamentals*, Second Edition (Wiley & Sons, 1993).
- [18] Mammadov, E. (2013). Long-range Communication Framework for Autonomous UAVs. Doctoral dissertation, Université d'Ottawa/University of Ottawa.
- [19] Miller, P. G. (2015). Design of a Remote Person View System for a Long Range UAV. Thesis to obtain the Master of Science Degree in Aerospace Engineering, Instituto Superior Técnico de Lisboa.
- [20] Peng, J. (2016). Performance of TCP congestion control in UAV networks of various radio propagation models. *International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC)* Vol.8, No.2, March 2016.
- [21] Venkatasubramanian, S. N. (2013). Propagation channel model between unmanned aerial vehicles for emergency communications.
- [22] Yajnanarayana, V., Wang, Y. P. E., Gao, S., Muruganathan, S., & Lin, X. (2018). Interference mitigation methods for unmanned aerial vehicles served by cellular networks. arXiv preprint arXiv:1802.00223.