

Experiencia 5: Propagación Electromagnética en Interiores: Medición y Estadísticas

Laboratorio de Comunicaciones - ELO241

Departamento de Electrónica, Universidad Técnica Federico Santa María

I. INTRODUCCIÓN

En esta experiencia se realizará un análisis de propagación de señales electromagnéticas en ambientes interiores. A partir de una antena transmisora, se analizará la potencia de dicha señal recibida en un conjunto de puntos cercanos entre sí. El conjunto de potencias medidas en diferentes posiciones permitirá a cada grupo de trabajo caracterizar de manera estadística la ganancia o pérdida de un enlace de RF en ambientes interiores. Como se verá, en dichos escenarios, la ganancia está sujeta a los llamados desvanecimientos de pequeña escala, que provocan grandes fluctuaciones de la potencia recibida al mover la antena receptora tan solo unos centímetros.

Los objetivos de esta experiencia son:

- Familiarizarse con los conceptos que subyacen a los modelos estocásticos de propagación de señales de RF en ambientes interiores.
- Verificar cómo dichos modelos se ajustan a las mediciones obtenidas en un entorno físico cerrado.
- Aplicar conceptos básicos de procesamiento estadístico de datos.

II. FUNDAMENTOS DE ENLACES

La definición formal de una antena es un dispositivo que sirve para transmitir y recibir ondas de radio. Convierte la onda guiada por la línea de transmisión (el cable o guía de onda) en ondas electromagnéticas no guiadas que se pueden transmitir por el espacio libre. Entonces, una antena es un trozo de material conductor al cual se le aplica una señal para ser radiada al espacio libre. Las antenas pueden ser: isotrópicas (radian la potencia del transmisor en todas las direcciones por igual), omnidireccionales (radian la potencia del transmisor en todas direcciones por igual en un plano) y antenas directivas, que acentúan la radiación hacia una dirección determinada disminuyendo la radiación hacia orientaciones no deseadas.

En el laboratorio se utilizan una antena omnidireccional y 2 antenas directivas, tipo patch panel, que se diferencian entre sí por su directividad.

Las antenas de panel plano (en inglés flat panel o patch panel), como su nombre lo dice, son un panel con forma cuadrada o rectangular constituido por dos placas de cobre separadas por un dieléctrico. Una de las placas de cobre opera como plano de tierra y abarca toda la superficie. La otra placa de cobre se diseña cuidadosamente para lograr orientar la potencia radiada en cierta dirección deseada. La

figura 1 ilustra una antena patch panel. Las que se utilizan en el laboratorio vienen protegidas por una carcasa de material plástico o de teflón electromagnéticamente inerte,

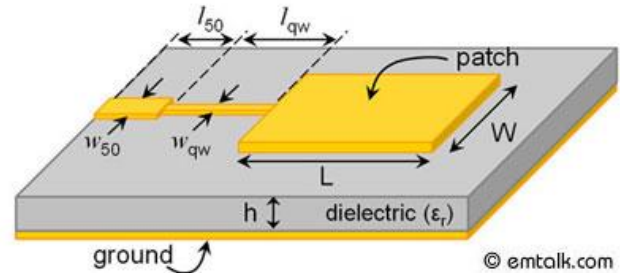


Figura 1: Una antena patch panel

Una antena va a formar parte de un sistema de telecomunicaciones, por lo que es preciso definir parámetros que la describan y nos permita evaluar el efecto que va a producir. A continuación, se definen los parámetros relevantes de una antena.

Impedancia: Una antena se tendrá que conectar a un transmisor y deberá radiar el máximo de potencia posible con un mínimo de pérdidas. Se deberá adaptar la antena al transmisor para una máxima transferencia de potencia, que se suele hacer a través de una línea de transmisión. Esta línea también influirá en la adaptación, debiéndose considerar su impedancia característica, atenuación y longitud. Como el transmisor producirá corrientes y campos, a la entrada de la antena se puede definir la impedancia de entrada mediante la relación tensión-corriente en ese punto. Esta impedancia poseerá una parte real $R(\omega)$ y una parte imaginaria $X(\omega)$, dependientes de la frecuencia. Si a una frecuencia una antena no presenta parte imaginaria en su impedancia $X(\omega_0)=0$, entonces diremos que esa antena está resonando a esa frecuencia $f_0 = \omega_0 / (2\pi)$. Normalmente usaremos una antena a su frecuencia de resonancia, luego a partir de ahora hablaremos de la resistencia de entrada a la antena $R(\omega_0)$. Esta resistencia de entrada se puede descomponer en dos resistencias, la resistencia de radiación (R_r) y la resistencia de pérdidas (R_L). Se define la resistencia de radiación como una resistencia que disiparía en forma de calor la misma potencia que radiaría la antena. La antena por estar compuesta por conductores tendrá unas pérdidas en ellos. Estas pérdidas son las que definen la resistencia de pérdidas en la antena.

Eficiencia: Relacionado con la impedancia de la antena tenemos la eficiencia de radiación y la eficiencia de reflexión. Estas dos eficiencias nos indicarán una, cuán buena es una antena emitiendo señal, y otra, cuán bien está adaptada una antena a una línea de transmisión. La *Eficiencia de Radiación* se define como la relación entre la potencia radiada por la antena y la potencia que se entrega a la misma antena. Como la potencia está relacionada con la resistencia de la antena, podemos volver a definir la *Eficiencia de Radiación* como la relación entre la Resistencia de radiación (R_r) y la Resistencia de entrada de la antena ($R(\omega_0) = R_r + R_L$).

La *Eficiencia de Adaptación* o *Eficiencia de Reflexión* es la relación entre la potencia que le llega a la antena y la potencia que se le aplica a ella. Esta eficiencia dependerá mucho de la impedancia que presente la línea de transmisión y de la impedancia de entrada a la antena, luego se puede definir la *Eficiencia de Reflexión* $= 1 - |\text{Coeficiente de reflexión}|^2$, siendo el coeficiente de reflexión el cociente entre la diferencia de la impedancia de la antena y la impedancia de la línea de transmisión, y la suma de las mismas impedancias.

Algunas veces se define la *Eficiencia Total*, como:

Eficiencia Total = Eficiencia de Radiación x Eficiencia de Reflexión.

Ganancia Directiva y Ganancia de Potencia: La ganancia directiva es la relación de la densidad de potencia radiada en una dirección en particular con la densidad de potencia radiada al mismo punto por una antena de referencia, suponiendo que ambas antenas irradian la misma cantidad de potencia. El patrón de radiación para la densidad de potencia relativa de una antena es realmente un patrón de ganancia directiva si la referencia de la densidad de potencia se toma de una antena de referencia estándar, que por lo general es una antena isotrópica. La máxima ganancia directiva se llama directividad. Matemáticamente, la ganancia directiva relaciona la potencia irradiada de la antena de interés respecto de la potencia irradiada por una antena de referencia (generalmente una antena isotrópica) en el mismo punto, de acuerdo a la expresión:

$$P = D \cdot P_{ref}$$

donde:

D = ganancia directiva (sin unidades)

P = densidad de potencia en algún punto de una antena determinada (W/m^2)

P_{ref} = densidad de potencia en el mismo punto de una antena de referencia (W/m^2)

La ganancia de potencial es igual a la ganancia directiva excepto que se utiliza el total de potencia que alimenta a la antena (o sea, que se toma en cuenta la eficiencia de la antena). Se supone que la antena indicada y la antena de referencia tienen la misma potencia de entrada y que la antena de referencia no tiene pérdidas. Si una antena no tiene pérdidas, irradia 100% de la potencia de entrada y la ganancia de potencia es igual a la ganancia directa.

Una antena isotrópica distribuye la potencia radiada en todas las direcciones por igual, sin pérdidas, como ya se había señalado. Cuando se utiliza una antena isotrópica como referencia, se expresa la ganancia directiva de una antena en dBi.

Patrón de Radiación: En algunas circunstancias es necesario la representación gráfica de la fase del campo eléctrico. Esta representación recibe el nombre de Diagrama de Fase o Patrón de Radiación. Un patrón de radiación es un diagrama polar o gráfica que representa las intensidades de los campos o las densidades de potencia en varias posiciones angulares en relación con una antena. Si el patrón de radiación se traza en términos de la intensidad del campo eléctrico (E) o de la densidad de potencia (P), se llama patrón de radiación absoluto. Si se traza la intensidad del campo o la densidad de potencia en relación al valor en un punto de referencia, se llama patrón de radiación relativo.

Algunas veces no nos interesa el diagrama de radiación en tres dimensiones, al no poder hacerse mediciones exactas sobre él. Lo que se suele hacer es un corte en el diagrama de radiación en tres dimensiones para pasarlo a dos dimensiones. Este tipo de diagrama es el más habitual ya que es más fácil de medir y de interpretar.

Campos Cercanos y Lejanos: El campo de radiación que se encuentra cerca de una antena no es igual que el campo de radiación que se encuentra a gran distancia. El término campo cercano se refiere al patrón de campo que está cerca de la antena, y el término campo lejano se refiere al patrón de campo que está a gran distancia. Durante la mitad del ciclo, la potencia se irradia desde una antena, en donde parte de la potencia se guarda temporalmente en el campo cercano. Durante la segunda mitad del ciclo, la potencia que está en el campo cercano regresa a la antena. Esta acción es similar a la forma en que un inductor guarda y suelta energía. Por tanto, el campo cercano se llama a veces campo de inducción. La potencia que alcanza el campo lejano continúa irradiando lejos y nunca regresa a la antena por lo tanto el campo lejano se llama campo de radiación. La potencia de radiación, por lo general es la más importante de las dos, por consiguiente, los patrones de radiación de la antena, por lo regular se dan para el campo lejano. El campo cercano se define como el área dentro de una distancia D^2/λ de la

antena, en donde λ es la longitud de onda y D , la dimensión mayor de la antena, en las mismas unidades. En cambio, campo lejano es para distancias mayores a $2 D^2/\lambda$.

Polarización de la Antena: La polarización de una antena se refiere solo a la orientación del campo eléctrico radiado desde ésta. Una antena puede polarizarse en forma lineal (por lo general, polarizada horizontal o vertical), en forma elíptica o circular. Si una antena irradia una onda electromagnética polarizada verticalmente, la antena se define como polarizada verticalmente; si la antena irradia una onda electromagnética polarizada horizontalmente, se dice que la antena está polarizada horizontalmente; si el campo eléctrico radiado gira en un patrón elíptico, está polarizada elípticamente; y si el campo eléctrico gira en un patrón circular, está polarizada circularmente.

Ancho del Haz de la Antena: El ancho del haz de la antena es sólo la separación angular entre los dos puntos de media potencia (-3dB) en el lóbulo principal del patrón de radiación del plano de la antena, por lo general tomando en uno de los planos "principales". El ancho de haz de la antena se llama ancho de haz de -3dB o ancho de haz de media potencia.

Ancho de Banda de la Antena: El ancho de banda de la antena se define como el rango de frecuencias sobre las cuales la operación de la antena es "satisfactoria". Esto, por lo general, se toma entre los puntos de media potencia, pero a veces se refiere a las variaciones en la impedancia de entrada de la antena.

Análisis de un enlace de radiofrecuencia. En esta experiencia se analizará la propagación electromagnética en ambientes interiores. La señal transmitida por una antena será analizada en términos de potencia extraíble a través de una antena receptora en un conjunto de puntos cercanos entre sí. Del conjunto de potencias medidas cada grupo obtendrá algunos parámetros que permiten caracterizar de manera estadística la ganancia (o pérdidas) de un enlace de RF en ambientes interiores. Como se verá, en dichos escenarios la ganancia está sujeta a los llamados **desvanecimientos de pequeña escala**, que provocan grandes fluctuaciones de la potencia recibida al mover la antena receptora tan solo unos centímetros. A pesar de ello, se tendrá que se puede establecer un promedio de estos valores que, en caso de tener suficientes mediciones de muestras espaciales, debería corresponderse razonablemente con un modelo de propagación de la señal electromagnética de un

enlace con línea de vista entre transmisor y receptor, en un entorno en que no existen superficies reflectoras ni dispersores de la señal. Este modelo de propagación, que predice el nivel de la señal en promedio, se conoce como **modelo de propagación de gran escala**, y en caso de que no se experimente señales significativas en el extremo receptor, producto de rebotes de la señal transmitida, se conoce como **modelo de propagación de espacio libre**.

El modelo de espacio libre predice que la potencia recibida disminuye según el cuadrado de la separación d [m] entre el TX y RX, de acuerdo a la ecuación de Friis:

$$P_L^*(d) = P_{in} G_T(\theta_T, \phi_T) G_R(\theta_R, \phi_R) \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2, \quad (1)$$

donde P_{in} es la potencia eléctrica inyectada a la antena transmisora, $P_L^*(d)$ es la máxima potencia extraíble de la antena receptora, $G_T(\theta_T, \phi_T)$ es la ganancia de potencia de la antena transmisora hacia los ángulos θ_T, ϕ_T , $G_R(\theta_R, \phi_R)$ es la ganancia de la antena receptora desde los ángulos θ_R, ϕ_R y

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

es la longitud de onda de la señal electromagnética en metros, siendo $c = 3 \times 10^8$ [m/s] la velocidad de la luz en el aire y f la frecuencia de operación en [Hz]. Se extrae la máxima potencia de la antena receptora de impedancia Z_R cuando la carga conectada a ella tiene una impedancia $Z_L = Z_R^*$, donde $()^*$ denota conjugación. Los ángulos θ, ϕ son los ángulos de elevación y azimut que en un sistema de coordenadas esféricas (alineado con la antena correspondiente) determinan la orientación de la línea recta que une ambas antenas. Por lo tanto, la ganancia de cada antena es función de la orientación hacia/desde la que "ve" a la otra antena del enlace.

La potencia $P_L^*(d)$ disipada en la carga se relaciona con el fasor de tensión¹ en sus terminales, V_L , como

$$P_L^*(d) = \frac{1}{2} |V_L|^2 \Re \left\{ \frac{1}{Z_L} \right\} \quad (3)$$

Así,

$$|V_L| = \sqrt{2 P_L^*(d) \Re \left\{ \frac{1}{Z_L} \right\}} \quad (4)$$

La fase compleja de V_L dependerá, por una parte, de la fase de la senoide introducida a la antena transmisora y del desfase introducido por las antenas (fase que denominaremos ψ) y del desfase asociado al retardo de propagación por el aire. Este último, que denominaremos ϕ , está dado por $\phi = \beta d$, donde

¹ En este curso la magnitud de un fasor representa la amplitud de oscilación de la senoide asociada, *no su valor RMS*. Por esta razón, la

expresión para la potencia promedio desarrollada por una tensión V aplicada a una carga utiliza $|V|^2/2$ y no $|V|^2$.

$$\beta \equiv 2\pi/\lambda \text{ [rad/m]}$$

(5)

es la constante de fase de la onda (puede interpretarse como una “frecuencia angular espacial”). Así,

$$V_L = |V_L| e^{j(\psi+\phi)} \quad (6)$$

Note que mientras más grande es f , más grande es β y más grandes son las variaciones de ϕ producidas por un cambio de distancia dado. Por ejemplo, a $f = 2,4 \times 10^9$ GHz, $\lambda = 1/8$ [m] y, por lo tanto, aumentar d en 12,5 [cm] ocasiona un incremento de la fase de 2π [rad].

Es preciso destacar que (1) es válida solo cuando se opera en “campo lejano”, es decir, cuando la distancia supera $d_f = 2D^2/\lambda$, $d_f \gg \lambda$ donde D es la mayor dimensión lineal de la antena de transmisión o recepción.

En ambientes de propagación de interiores y en ambientes urbanos exteriores, aun cuando exista un trayecto no obstruido entre transmisor y receptor, la presencia de objetos grandes como paredes, puede producir múltiples reflexiones que generan frentes de onda con potencia comparable a la del trayecto directo. Esta situación se representa en la figura 2. La existencia de estas múltiples señales se conoce como “multitrayectoria” y sus aportes se suman en la antena receptora.

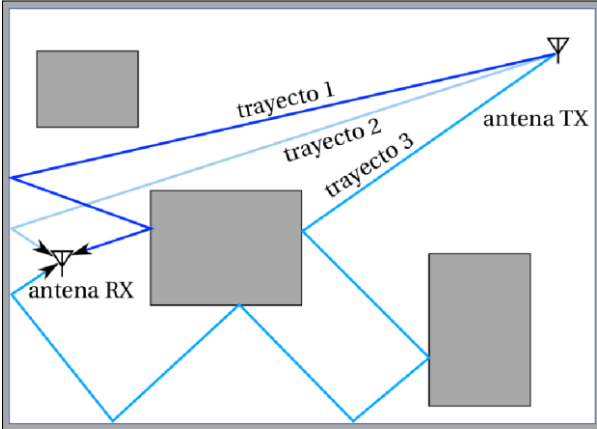


Figura 2: Antena transmisora y receptora y tres trayectos de los muchos posibles entre ambas en un ambiente interior.

Si se transmite a una única frecuencia, entonces cada una de las múltiples señales recibidas pueden escribirse fasorialmente. Sean V_k , $k = 1, 2, \dots$ los fasores de tensión producidos en los terminales de la carga Z_L por cada una de las (posiblemente infinitas) ondas que llegan a la antena receptora. Entonces el fasor de tensión total (o neto) en los terminales de la antena está dado por la suma

$$V_L = \sum_k V_k = \sum_k A_k e^{j(\psi_k + \beta d_k)} \quad (7)$$

donde d_k es el largo del trayecto que recorre la k -ésima señal (ver (6)).

Así, pequeños cambios de posición de la antena receptora pueden hacer que dos o más contribuciones tiendan a reforzarse o a cancelarse debido al cambio de la fase relativa entre ellas. Esto se conoce como “desvanecimientos de pequeña escala” pues bastan movimientos del orden de la longitud de onda para producir cambios muy significativos en la señal recibida.

En escenarios interiores comunes no es posible predecir la amplitud y fase que tendrá cada una de las componentes de la multitrayectoria. Además, estas componentes cambian con el movimiento de objetos o personas en cercanías al enlace de RF. Debido a todas estas fuentes de incertidumbre resulta adecuado describir el fenómeno de manera estadística. Así, no pretenderemos calcular a priori la tensión o potencia que entregará la antena receptora, sino que caracterizar con qué probabilidad (o cuan habitualmente) dicha tensión o potencia superará a cierto valor. Específicamente, la amplitud de la tensión en la carga medida en un instante dado en una determinada posición de la antena receptora, definida como $r \equiv |V_L|$, se modela como una realización de una variable aleatoria R con función de densidad de probabilidad (*pdf*) $f_R(r)$ y función de distribución acumulativa (CDF)

$$F_R(r) = \int_0^r f_R(\xi) d\xi. \quad (9)$$

Así, $f_R(r)$ es la densidad de probabilidad de R en el valor r y $\int_{r_1}^{r_2} f_R(r) dr$ es la probabilidad de que R este en el intervalo $[r_1, r_2]$, para cualquier $r_2 \geq r_1 \geq 0$.

La distribución estadística del voltaje en un ambiente multitrayectoria se ha estudiado desde hace décadas y existen modelos bien establecidos para caracterizarlo. Para ambientes interiores, los modelos más comunes describen r según una distribución Rayleigh o una distribución de Rice.

La distribución Rayleigh: En el caso en que entre el transmisor y el receptor no exista un trayecto directo y existe un gran número de multitrayectos (ver figura 2) se ha comprobado que un buen modelo para describir la distribución de probabilidad de r (amplitud de la tensión en la carga) es la distribución Rayleigh. En el apéndice V-A se explica cómo esta distribución surge naturalmente en tales casos.

La distribución Rayleigh tiene una *pdf* dada por:

$$f_R(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r}{2\sigma^2}\right) & (0 \leq r < \infty) \\ 0 & (r < 0) \end{cases} \quad (10)$$

El único parámetro de esta densidad es σ^2 . Por lo tanto, basta con conocer σ^2 para caracterizar la *pdf* completamente.

El valor medio \bar{R} , la varianza σ_R^2 y el segundo momento Ω_R de una variable R con distribución Rayleigh están dados por

$$\bar{R} \triangleq E[R] \stackrel{\text{Rayleigh}}{=} \int_0^\infty r \cdot f_R(r) dr = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad (11)$$

$$\sigma_R^2 \triangleq E[(R - \bar{R})^2] \stackrel{\text{Rayleigh}}{=} \int_0^\infty r^2 \cdot f_R(r) dr - \frac{\sigma^2 \pi}{2} \quad (12)$$

$$= 2\sigma^2 - \frac{\sigma^2 \pi}{2} = \sigma^2 \left(2 - \frac{\pi}{2}\right) \quad (13)$$

$$\Omega_R \triangleq E[R^2] \stackrel{\text{Rayleigh}}{=} 2\sigma^2, \quad (14)$$

donde $E[\cdot]$ denota esperanza.

La potencia (promedio temporal) disipada en la carga cuando la amplitud de la tensión en sus bornes es $|V_L|$ corresponde a $0,5|V_L|^2 < \{1/Z_L\}$. Así, $0,5 E[R^2] \Re\{1/Z_L\} = 0,5\Omega_R < \{1/Z_L\}$ debe entenderse como el valor esperado de la potencia en la carga conectada a la antena receptora al mover dicha antena en una región R pequeña en comparación con la distancia al transmisor. En otras palabras, es el valor medio espacial de dicha potencia.

Para estimar Ω_R resulta útil tomar M valores medidos r_1, r_2, \dots, r_M situando la antena receptora en muchas posiciones dentro de una región R , y estimar Ω_R como el valor cuadrático promedio de los

$$\Omega_R \simeq \hat{\Omega}_R \triangleq \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M r_m^2, \quad (15)$$

es decir, reemplazando la esperanza $E[R^2]$ por $\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M r_m^2$

(compare con (14)). Por la Ley Débil de los Grandes Números, cuánto más mediciones independientes se tomen, más precisa será esta estimación.

La distribución de Rice: En el caso que exista una componente de línea de vista, las variaciones de r con la posición son menores (el caso extremo es el escenario de “espacio libre”, en el que pequeñas variaciones de distancia no afectan la potencia en la carga Z_L).

Para enlaces con línea de vista se ha demostrado que un muy buen modelo para la amplitud de la tensión r en los terminales de la carga conectada a la antena receptora es la distribución de Rice. La *pdf* de R en este caso está

completamente definida por dos parámetros A^2 y σ^2 (ver derivación en el Apéndice V-B) como :

$$f_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2 + A^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{Ar}{\sigma^2}\right) \quad 0 \leq r < \infty. \quad (16)$$

El cociente

$$K \triangleq \frac{A^2}{2\sigma^2}, \quad (17)$$

conocido como “factor K ”, representa la relación entre la potencia media asociada al trayecto directo y la potencia media de las componentes que llegan por rebotes u otras formas de caminos indirectos, $2\sigma^2$. $I_0()$ es la función modificada de Bessel de primer tipo y orden cero. La *pdf* Rician se puede escribir en términos del factor K como

$$f_R(r) = \frac{2(K+1)r}{\Omega_R} e^{-K - \frac{(K+1)r^2}{\Omega_R}} I_0\left(2r\sqrt{\frac{K(K+1)}{\Omega_R}}\right) \quad (18)$$

$$r \geq 0, K \geq 0, \Omega_R \geq 0, \quad (19)$$

donde Ω_R es el segundo momento de R definido en (14), que en este caso está dado por

$$\Omega_R, E[R^2] \stackrel{\text{Rice}}{=} 2\sigma^2(K+1) \quad (20)$$

Si $A \rightarrow 0 \Rightarrow K \rightarrow 0$ (no hay potencia proveniente del trayecto directo) entonces la distribución de Rice degenera a una distribución de Rayleigh, cumpliéndose que $\Omega_R = 2\sigma^2$ (ver (14)).

Para estimar Ω_R se utiliza el mismo estimador definido en (15). Sin embargo, determinar el factor K (el segundo y último parámetro requerido para caracterizar la distribución de Rice) no es una tarea sencilla. Para efectos de este laboratorio, los estudiantes han de graficar la distribución de Rice para diferentes valores de K y compararla con histogramas construidos con las mediciones r_1, r_2, \dots, r_M . De este modo, por inspección (o por ajuste de parámetros a datos) será posible escoger el valor que entrega un mejor ajuste.

Para poder determinar las propiedades estadísticas de los datos medidos, es conveniente independizarlos de la potencia media propia del lugar, es decir del valor de Ω_R en la región de la medición. Para ello se estima primeramente Ω en esa región usando (15). La raíz cuadrada de Ω_R es el voltaje r.m.s. Si todos los voltajes medidos $r_m, m = 1, \dots, M$ se dividen

Por Ω_R se obtienen mediciones normalizadas

$$\tilde{r}_m \triangleq r_m / \sqrt{\hat{\Omega}_R} \quad (21)$$

cuyo valor cuadrático promedio es unitario, ya que, claramente,

$$\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \tilde{r}_m^2 = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{r_m^2}{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M r_i^2} = 1. \quad (22)$$

Desde luego, esta misma normalización puede hacerse con valores r_m obtenidos mediante simulación.

Note que si una variable aleatoria R es dividida por $\sqrt{\Omega_R}$ variable aleatoria normalizada resultante $R_e \equiv R/\sqrt{\Omega_R}$ tiene segundo momento unitario, es decir, $E[\hat{R}^2] = 1$. Si R distribuye Rayleigh con segundo momento Ω_R entonces \hat{R} también distribuye Rayleigh pero con segundo momento 1 (quedando así su *pdf* completamente caracterizada). En cambio, si R distribuye Rice entonces \hat{R} distribuye Rice con segundo momento unitario pero la *pdf* de \hat{R} no está completamente definida: existirá una familia de funciones dependiente del parámetro K . Esto es equivalente a considerar la función (18) para $\Omega_R = 1$.

III. INFORME PREVIO

1. Estudie y describa el modelo de propagación basado en la ecuación de Friis, como también el modelo de dos rayos y 10 rayos. Compare y describa las diferencias.
2. Estudie y describa qué son y qué representan las Zonas de Fresnel. ¿Cuál es la importancia de la primera zona?
3. Estudie los fenómenos de difracción, reflexión y refracción y relaciónelos con la propagación de ondas electromagnéticas de RF. ¿Qué ocurre cuando una onda "choca" contra una pared que se encuentra perpendicular a su campo eléctrico? ¿Qué pasa si es paralelo al campo?
4. Utilizando el simulador, analice la potencia de la señal propagada versus distancia, para tres frecuencias comerciales (700 MHz, 2.4 GHz, 5.8GHz). Grafique el comportamiento de la potencia versus distancia y comente sus resultados. Asuma un voltaje de 1 V e impedancias de antena de 50 Ohm y 75 Ohm. Comente sus resultados.
5. Utilizando el simulador, analice el comportamiento de la potencia estimada por la ecuación de Friis, para una señal de 4,5 GHz, que es afectada en el receptor por diferentes niveles de ruido. Modifique la potencia de ruido (varianza de ruido) en modo tal de realizar simulaciones con valores de relación señal a ruido de -10, 0 y 10 dB. Asuma que las antenas tienen 3 dBi de ganancia cada una. Decida a su voluntad la potencia transmitida y la distancia a la cual realizará el análisis.

Repita las simulaciones para el caso de capturar 100, 1000 y 10000 muestras. Grafique el comportamiento estadístico (histograma) de las potencias medidas en cada caso y relacione los resultados de las figuras con los parámetros utilizados en la simulación y mediciones estadísticas (media y desviación estándar). Comente sobre el efecto que tiene el número de muestras en sus resultados.

6. Utilizando la ventana "Friis 1T 2R", simule y analice la potencia recibida de una señal de 2,4 GHz en una grilla de 21x21 posiciones separadas por $\lambda/2$, y ubicada a una distancia media de 15 m desde la antena transmisora. Considere antenas de 2 dBi de ganancia y una potencia a la salida del transmisor de 2 W. Realice simulaciones con una sola muestra por posición, utilizando una SNR de 5 dB y 0 dB. Grafique el "manto" de la potencia recibida en la grilla, tal que los ejes x e y sean los puntos de la misma y el eje z corresponda a la potencia recibida en dBm. Describa y explique los resultados, en especial el efecto del ruido en las potencias recibidas. Nota: la ventana "Friis 1T 2R" permite simular 2 antenas receptoras; por lo tanto, las simulaciones deben ser repetidas manualmente para muestrear los puntos de la grilla. Si utiliza Matlab para graficar el manto, utilice el comando surf.
7. Utilizando la ventana "Friis 1T 2R", simule y analice la potencia recibida de una señal de 2,4 GHz con línea vista en una grilla de 21x21 posiciones separadas por $\lambda/2$, y ubicada a una distancia directa media de 15 m desde la antena transmisora. Considere antenas de 2 dBi de ganancia y una potencia a la salida del transmisor de 2 W. Considere que la separación entre los muros es de 10 metros y que la antena receptora se encuentra inicialmente a 5 metros de éstos (es decir en medio). Obtenga los mantos de la potencia recibida para 3 posiciones diferentes de la antena transmisora: a 2.5 m, 3 m y 5 m desde el muro inferior.
8. Repita el punto anterior considerando propagación sin línea vista. Comente sus resultados y compare con los resultados del punto 7.
9. Compare los mantos obtenidos en los puntos 7 y 8 con aquellos obtenidos en el punto 6. Describa y justifique las diferencias observadas.
10. Utilizando los datos obtenidos de los puntos 7 y 8, grafique los histogramas de cada uno de ellos e interprételos. ¿Qué valores de factor K obtiene en cada caso? Justifique los resultados. Describa qué representa el factor K y cuál es su importancia.

Sugerencia: Utilice fuentes confiables para la búsqueda de la información, como por ejemplo los siguientes libros:

1. T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed. Prentice Hall, 2002.
2. A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

IV. REFERENCIAS

1. A. Papoulis, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, McGraw-Hill, Third Edition, 1991.
2. T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed. Prentice Hall, 2002.
3. A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
4. http://www.emtalk.com/mwt_mpa.htm