

Revista Electrónica Nova Scientia

Metodología para el cálculo adecuado de las alturas de antenas en un radioenlace de microondas en Línea de Vista

Methodology to properly calculate the heights of the antennas in a line-of-sight microwave link

Gabriela Leija Hernández¹, José Luis López Bonilla¹ y Luis Alejandro Iturri Hinojosa¹

¹Instituto Politécnico Nacional, ESIME Zacatenco, México D.F.

México

José Luis López Bonilla. E-mail: joseluis.lopezbonilla@gmail.com

Resumen

Se presenta la metodología para posicionar adecuadamente las antenas en altura sobre la superficie terrestre en un radioenlace de microondas con visibilidad directa (LOS) a partir de su perfil radioeléctrico. Se describen el efecto de la atmósfera terrestre sobre las señales de radiofrecuencia, el factor de radio terrestre efectivo para México y el análisis de la primera zona de Fresnel. Con la posición adecuada de las antenas asegurando despeje de obstáculos a la primera zona de Fresnel se consigue apropiada recepción de haces transmitidos arribando por diferentes trayectorias a la antena del otro extremo, todos en fase con el haz directo en LOS.

Palabras clave: Perfil de radioenlace LOS, primera zona de Fresnel, altura de antenas

Recepción: 23-11-2012

Aceptación: 04-09-2013

Abstract

The methodology to properly calculate the heights of the antennas above the surface of the Earth in a line-of-sight (LOS) microwave link from its radio profile is presented. The effect of the Earth's atmosphere on RF signals, the effective Earth radius factor for Mexico and the analysis of the first Fresnel zone are described. With the proper position of the antennas ensuring clearance of the first Fresnel zone the proper reception of transmitted beams arriving from different paths to the antenna at the other end, all in phase with the direct beam in LOS is achieved.

Keywords: LOS radio link profile, first Fresnel zone, antennas height

Introducción:

En el diseño de un radioenlace de microondas con visibilidad directa es importante, realizar de manera adecuada, el cálculo de la posición de las antenas en altura respecto a la superficie terrestre. Así mismo, la posición de las antenas establece la longitud de las líneas de transmisión que conectan las antenas con los equipos transceptores. La longitud de estos alimentadores de antenas define la pérdida en decibelios que disminuye la potencia de la señal de radiofrecuencia (RF) de acuerdo al dato del fabricante. Así mismo, es necesario que los haces que siguen distintas direcciones resultado del efecto multirayectoria arriben en fase con la señal de RF transmitida entre equipos transceptores. Para asegurar que esto suceda, se calcula el perfil de radioenlace terrestre incluyendo el análisis de la primera zona (o elipsoide) de Fresnel. En la práctica se requiere despeje total, libre de obstáculos, a la primera zona de Fresnel.

En [6] se recomiendan ciertos procedimientos para encontrar la altura de las antenas. Considera únicamente el análisis del libramiento de la primera zona de Fresnel a partir el valor estimado del factor de radio terrestre (K), para los casos de clima templado y tropical, en la región del radioenlace. Por efecto de difracción, el factor K puede alcanzar valores bajos, ocasionando subrefractividad. Esto sucede cuando el valor del factor K varía el 99.9% del tiempo. Así mismo, [7] considera a los valores medio y efectivo del factor K como esenciales para la posición adecuada en altura de las antenas, cumpliendo con el despeje de trayectoria en el diseño de un radioenlace de microondas en particular, y así evitar pérdida por difracción debido a desvanecimiento por subrefractividad.

Para lograr el adecuado despeje de trayectoria, proponemos la metodología para obtener un perfil de radioenlace entre los sitios fijos que incluya las condiciones de refractividad de la atmósfera con el valor mínimo del factor efectivo K en la trayectoria de propagación de las ondas, y a partir de él calcular la altura de las antenas.

De igual manera, se describen los fenómenos atmosféricos y sus efectos sobre las señales de RF con el análisis de los parámetros de refractividad. Con valores estimados del gradiente del coindice de refracción radioeléctrica en la zona del radioenlace de microondas, es encuentra el valor del factor de radio terrestre efectivo K para considerar la propagación curva de las ondas electromagnéticas en la atmósfera de la tierra. Para simplificar el estudio, se traza el haz con visibilidad directa (LOS) entre antenas siguiendo trayectoria rectilínea y con la variación de la superficie terrestre utilizando el factor K se analiza la factibilidad del radioenlace.

Por último, se presenta la metodología para obtener el diagrama del perfil radioeléctrico entre los dos sitios a partir de un mapa topográfico de escala 1:50000 considerando que no se cuenta con software especializado que incluya base de datos de las curvas de niveles para México. El perfil radioeléctrico incluye la posición en altura para las antenas, el rayo directo entre antenas y primera zona de Fresnel cuya característica es inversamente proporcional a la frecuencia de la señal portadora.

1. Propagación de las señales de radiofrecuencia

Las ondas electromagnéticas correspondientes a las señales de radio frecuencia se propagan en un medio dieléctrico con índice de refractividad cercano a la unidad, que comprende la región desde la superficie de la tierra hasta aproximadamente los 11 km de altura, denominada tropósfera. Específicamente, hasta los 8 o 10 km en latitudes polares, hasta los 10 o 12 Km en latitudes medias y hasta los 16 o 18 Km en el Ecuador. El índice de refractividad se expresa por $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ donde ϵ es la permitividad relativa y μ es la permeabilidad relativa, y para el aire varía alrededor de 1.0003, con variaciones que están entre el 5to. y 6to. decimal.

Para mejor interpretación, se utiliza el índice de refractividad troposférico (N) en términos de un valor escalado de n dado por:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 \quad (1)$$

el cual puede aproximarse para determinada región utilizando la ecuación:

$$N = 77.6 P/T + 373256/T^2 \cdot a \exp(bt/(t + c)) \quad (2)$$

con el conocimiento de la temperatura (T), presión (P) y de las constantes t , b y c para agua y hielo de acuerdo con [1].

El índice de refracción N también depende de la refractividad en la superficie N_s (o coindice de refracción radioeléctrica) hasta el primer kilómetro de altitud, cuyo valor disminuye con la altura de acuerdo con [1]:

$$N(h) = N_s \exp(-c \cdot h) \quad (3)$$

donde la variable c ($= \ln(N_s/(N_s + \Delta N))$) depende del gradiente de refractividad ΔN , interpretado como las variaciones de refractividad en N -valores.

De acuerdo con (1) el índice de refracción radioeléctrica en la superficie n_s será:

$$n_s = 1 + N_s \times 10^{-6} \quad (4)$$

Así mismo, la refractividad superficial N_s está relacionada con el negativo del gradiente del coindice de refracción radioeléctrica ΔN de acuerdo con [1]:

$$-\Delta N = 7.32 \exp(0.005577 \cdot N_s) \quad (5)$$

Consecuencia de la refractividad troposférica se induce la formación de ductos permitiendo la propagación de las ondas electromagnéticas. Así mismo, debido al índice de refractividad atmosférico los haces electromagnéticos se curvan en su trayecto. Al mismo tiempo, las ondas de radio durante su trayecto experimentan absorción y dispersión, cuya intensidad depende de la frecuencia y de la altura respecto al nivel del mar [2].

En la tropósfera ocurren las consecuencias de los cambios climatológicos, como lluvia, nieve, vapor de agua, etc. Los cambios de temperatura, presión y contenido de vapor ocasionan que las ondas de radio en la troposfera igualmente experimenten refracción, y también son consecuencia de dispersión.

La absorción y la dispersión por efecto de lluvia y nieve son significativas sobre las señales con frecuencia superiores a 10GHz. El vapor de agua tiene un efecto significativo sobre las señales con frecuencia superior a 22 GHz. Las señales al interactuar con variaciones meteorológicas generan absorción y difusión de energía ocasionando atenuación de las señales transmitidas.

2. Tipos de atmósfera

Consideremos por un instante que no hay atmósfera y que la tierra es plana. Un haz emitido por una antena en estas condiciones, percibirá una atenuación o pérdida de energía hacia otra antena (receptora) igual a:

$$L_{FS} = (4\pi r f/c)^2 \quad (6a)$$

o bien

$$L_{FS, dB} = 92.4417 + 20 \log r_{km} + 20 \log f_{c, GHz} \quad (6b)$$

donde r , f_c y c son la distancia entre antenas, frecuencia portadora y velocidad de propagación de las ondas en el espacio libre, respectivamente. A L_{FS} también se denomina atenuación por

espacio libre. De igual manera, la señal de RF recibida es atenuada por múltiples haces que siguen distintas trayectorias [3].

Como la tierra no es plana se complica el cálculo del haz reflejado en la superficie terrestre. Este haz produce interferencia constructiva (arriba en fase) o destructiva (arriba en contrafase) sobre la señal que arriba a la antena con visibilidad directa. Esto produce desvanecimiento selectivo que es un factor determinante en un radio enlace digital.

Cuando consideramos la atmósfera en el diseño de un enlace de microondas se tienen tres tipos fundamentales de atmósfera. Debido a la presencia de agentes difractantes se producen la atmósfera estándar, sub-estándar y súper-estándar. La atmósfera estándar es la típica, con presión y densidad disminuyendo con la altura, lo cual origina que la propagación de la señal de RF siga una trayectoria curva similar a la curvatura de la superficie terrestre.

3. Factor de radio terrestre efectivo K para México

Para facilitar el estudio de propagación de ondas en el trayecto entre las antenas es necesario correlacionar las distintas condiciones atmosféricas con la curvatura de las ondas de radio por efecto de difracción.

Para tal fin se ideó el factor de radio terrestre efectivo K que es un equivalente al radio real de la tierra de acuerdo con la ecuación [6]:

$$R'_0 = KR_0 \quad (7)$$

donde R_0 es el verdadero radio terrestre (6373.02 Km) y R'_0 es el radio ficticio de la tierra donde todo haz radiado se propagaría en línea recta. En condiciones normales la trayectoria del haz se curva según el factor K . El haz se curva debido al gradiente del coindice de refracción radioeléctrica ΔN dependiente de la refractividad superficial N_s y de la altura sobre el nivel del mar [4]. El factor K se puede estimar utilizando la ecuación:

$$K = \frac{1}{1 + \frac{R_0}{n_s} \cdot \ln\left(\frac{N_s}{N_s + \Delta N}\right) \cdot N_s \cdot 10^{-6}} \quad (8)$$

La Unión Internacional de Telecomunicaciones en su recomendación UIT-R P.453-10 [1] presenta curvas que indican los valores promedios aproximados del gradiente ΔN para México en

algunos meses del año. Los valores negativos del gradiente de refractividad ($-\Delta N$) para los meses de febrero, mayo, agosto y noviembre se muestran en la figura 1.

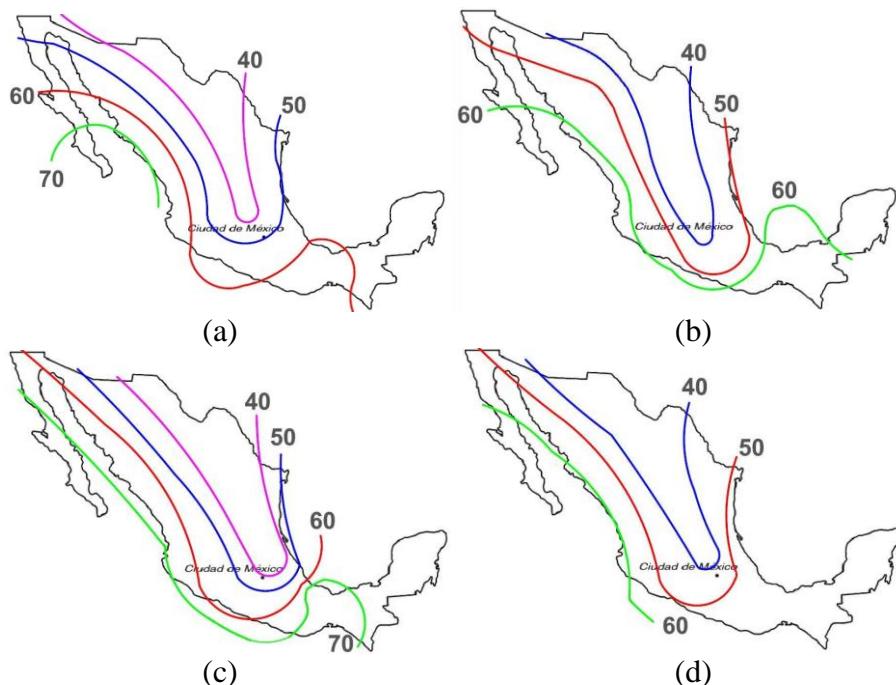


Fig. 1 Disminución del gradiente del coíndice de refracción radioeléctrica ($-\Delta N$) estimado por [1] para México en los meses (a) febrero, (b) mayo, (c) agosto y (d) noviembre

Por ejemplo, si consideramos el diseño de un radio enlace LOS en algún estado de México con gradiente de refractividad $\Delta N = -50$ (ver figura 1) como valor promedio mensual, la refractividad superficial N_s se obtiene de la ecuación (5): $N_s = 179.31 \cdot \ln(|\Delta N/7.32|) = 344.53$, n_s se obtiene de (4) y el factor K a tomar en cuenta, de acuerdo con (8), es $K = 1.5248$. Así, la trayectoria curva de los haces en esta región es mayor a la trayectoria que siguen los haces en atmósfera caracterizada por un factor $K = 4/3$.

De acuerdo al valor del factor K se presentan distintos comportamientos de propagación de las señales de RF, pues existe directa dependencia con la característica del gradiente de atmósfera del lugar donde se diseña el radio enlace de microondas LOS.

La figura 2 muestra los tipos de curvatura que experimentan los haces durante su propagación en el espacio libre.

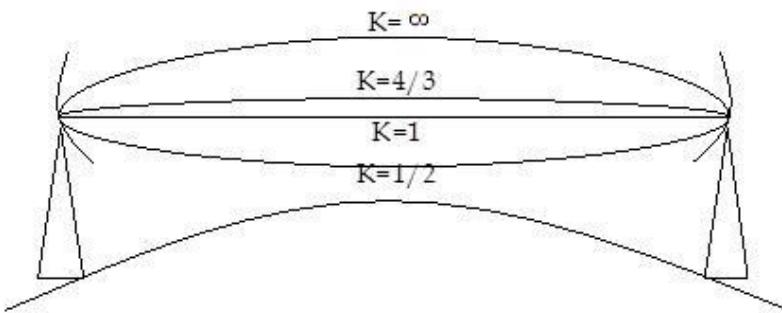


Fig. 2 Tipos de curvatura para diversas atmósferas

El factor K corresponde al 50% de aparición. En Argentina debido a su clima, corresponde a un 60% de aparición. Para $K < 4/3$ se tiene una atmósfera sub-estándar. Si $K = 1$ el rayo será directo. La atmósfera subestándar se produce por niebla creada por el paso de aire cálido sobre aire frío o sobre una superficie húmeda. Esto hace que la densidad próxima a la tierra sea menor que a grandes alturas, provocando una curvatura del rayo hacia arriba. Un $K = 0.8$ se produce el 1% del tiempo.

4. Zonas de Fresnel

La difracción de las señales electromagnéticas en las partículas del aire produce los denominados elipsoides o zonas de Fresnel. Para fines de estudio, las zonas de Fresnel se consideran como una familia de elipsoides que se forman en el medio de propagación por donde las señales de RF viajan de emisor a receptor [5]. Una zona de Fresnel está definida por los límites donde las ondas interiores llegan al receptor con la misma fase de la señal transmitida. La fase de las señales en las zonas de Fresnel están, de esta manera, alternadas: en fase (primera zona) otra en contrafase (segunda zona), otra en fase (tercera zona), etc. El radio de la zona de Fresnel depende de la longitud de onda (λ) y de la distancia entre las antenas. Para señales con longitud de onda baja la diferencia entre distintos caminos dará una zona de contrafase más rápidamente y con ello el radio de Fresnel será menor. Si d_1 y d_2 son las distancias de los sitios al punto donde se desea conocer la zona de Fresnel, propio del obstáculo más pronunciado en el trayecto de propagación, el radio (en metros) de la primera zona de Fresnel se calcula con la ecuación [6]:

$$rf = 547 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{fd}} \quad (6)$$

donde d (=d₁+d₂) es la distancia total del enlace. Las distancias d₁, d₂ y d se toman en Km y la frecuencia de la portadora en MHz.

O bien, se puede utilizar la ecuación:

$$rf = 17.32 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{fd}} \quad (7)$$

donde las distancias d₁, d₂ y d están en Km y la frecuencia de la portadora en GHz. En la práctica, se busca que el 100% de la primera zona de Fresnel esté libre de obstáculos.

5. Trazo del perfil de radio enlace terrestre

El objetivo de trazar el perfil de radioenlace considerando el efecto de la atmósfera con el factor de radio terrestre efectivo (K), es determinar la posición en altitud de cada una de las antenas las cuales se instalarán en soportes (torres) metálicos, orientada una con la otra. Conociendo la posición (o altura de torres) de cada una de las antenas (h_1 y h_2), se obtiene la longitud de las líneas de alimentación de las antena, y se calculan las pérdidas en alimentadores (L_{FTX} y L_{FRX}) de antenas considerando el dato que proporciona el fabricante respecto a la pérdida (en dB) por cada 100 metros sobre la señal de RF. Las pérdidas de alimentadores se suman a las pérdidas que existan entre la salida del dispositivo transmisor y la entrada del dispositivo receptor.

Como resultado de la metodología descrita previamente, la figura 3 presenta un ejemplo de perfil de enlace terrestre LOS que incluye el trazo del haz directo entre antenas de los dos sitios con altitud Alt₁ y Alt₂ (respecto al nivel del mar), primera zona de Fresnel y las alturas de torres de antenas h_1 y h_2 , respectivamente. Las alturas de torres de antenas establecen las longitudes de líneas de transmisión en posición vertical que se utilizarán en la conexión de los equipos transceptores con las antenas correspondientes.

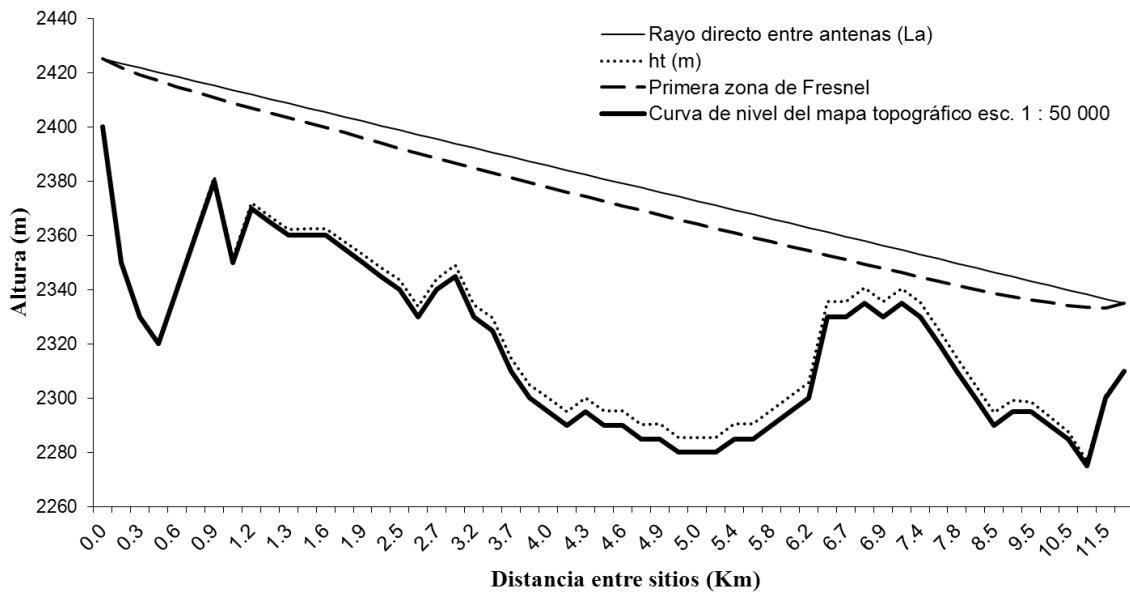


Fig. 3 Ejemplo de un radioenlace de microondas LOS de 12Km de distancia

Las variables para obtener el perfil de radio enlace terrestre se detallan en la tabla 1.

Tabla 1. Variables de un perfil de radioenlaces LOS

Parámetro	Descripción
L_M	Curva de nivel obtenido de un mapa topográfico con escala 1:50000 de la región (sin factor K)
h	Desviación del perfil terrestre.
h_t	Altura desde 0 m.s.n.m al perfil (con factor K)
L_a	Altura desde 0 m.s.n.m al haz directo.
r_f	Radio de la primera zona de Fresnel
e	Altura desde la curva de nivel con factor K al rayo directo.

La desviación del perfil terrestre (h) para obtener el perfil con factor K es igual a:

$$h = d_1 d_2 / 12.75 / K \quad (8)$$

Para realizar el trazo del rayo directo entre las dos antenas con visibilidad directa, se utiliza la siguiente variable:

$$i = |H_A - H_B| / (N_d - 1) \quad (9)$$

donde N_d es el número de curvas de nivel (o datos) entre las antenas de ambos sitios (tomadas del mapa topográfico) que atraviesan el haz con visibilidad directa. $H_A(Alt_1 + h_1)$ y $H_B(Alt_2 + h_2)$

son las alturas de las antenas con respecto al nivel del mar. El extremo de la primera zona de Fresnel (Z_f) se obtiene con la diferencia del haz directo (L_a) y del radio de Fresnel (r_f).

A la zona entre el primer elipsoide de Fresnel y la superficie terrestre con factor K que esté libre de obstáculos se la conoce como *despeje*. Se asegura despeje si la distancia desde la trayectoria directa del haz al obstáculo más pronunciado (e) es mayor o igual al radio de la primera zona de Fresnel en ese punto.

6. Construcción del perfil de radioenlace

En una hoja de cálculo se obtiene el perfil de radioenlace similar al de la figura 3 a partir de la construcción de las siguientes columnas: N_d , d1(Km), d2(Km), L_M (m), L_a (m), h_t (m), r_f (m), Z_f (m), e (m) y e/r_f . En celdas separadas, conectadas con la construcción de las columnas mencionadas, se ubican los valores de las variables: h_1 , h_2 , Alt1, Alt2, i , K, f_c y d .

Si los valores en la columna e/Z_f son todos mayores a la unidad se asegura que todas las distancias del haz directo a las curvas de nivel en los puntos considerados son mayores al primer radio de Fresnel, es decir, $e > r_f$.

Conclusiones:

Se presenta una metodología para el cálculo de la posición adecuada en altura de las antenas de un radioenlace de microondas LOS. Se presentan y se describen las variables para obtener el perfil de radioenlace terrestre propuesto considerando el factor de radio terrestre efectivo K para las características de la atmósfera en la región. Se presenta como ejemplo, el cálculo del factor K (=1.5248) para un valor característico del gradiente de refractividad (-50 unidades de N/Km) de una región en México.

Se presenta la construcción del perfil de radioenlace con las variables involucradas utilizando una hoja de cálculo. A partir del perfil de radioenlace y con la consideración de despeje de la primera zona de Fresnel, se calcula la posición en altura de las antenas para asegurar la adecuada recepción de la señal de RF que se propaga entre las antenas de ambos sitios.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo recibido por el proyecto SIP20141285.

Referencias:

- [1] Recomendación UIT-R P.453-10, Índice de refracción radioeléctrica: su fórmula y datos sobre la refractividad, Sector de Radiocomunicaciones de la UIT, 2012.
- [2] Roger L. Freeman, Radio System Design for Telecommunications, Wiley-Interscience, Third Edition, 2006.
- [3] Ruisi He, Zhangdui Zhong, Bo Ai, Jianwen Ding, and Ke Guan, “Analysis of the Relation Between Fresnel Zone and Path Loss Exponent Based on Two-Ray Model.pdf”, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 11, 2012.
- [4] T.J. Afullo and P.K. Odedina, “Effective Earth Radius Factor Measurement and Modeling for Radio Link Design in Botswana”, South African Institute of Electrical Engineers, Vol.99(3) September 2008.
- [5] H. Sizun, Radio Wave Propagation for Telecommunication Applications, Springer Berlin Heidelberg New York, 2005.
- [6] Recomendación UIT-R P.530-14, “Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales con visibilidad directa”, Serie P Propagación de las ondas radioeléctricas, febrero 2012.
- [7] Abraham M. Nyete and Thomas J. O. Afullo, “Seasonal Distribution Modeling and Mapping of the Effective Earth Radius Factor for Microwave Link Design in South Africa”, Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 51, 1-32, 2013.