

INFLUENCIA DEL MODELADO DE EDIFICIOS EN LA PREDICCIÓN DE PÉRDIDAS POR DIFRACCIÓN MÚLTIPLE EN ENTORNOS URBANOS

José-Víctor Rodríguez, María-José García-Martínez, José-María Molina-García-Pardo
y Leandro Juan-Llácer

Dpto. Tecnologías de la Información y Comunicaciones
Universidad Politécnica de Cartagena

Antiguo Cuartel de Antiguones, 30202 Cartagena

e-mail: jvictor.rodriguez@upct.es, leandro.juan@upct.es

Abstract- A study of the influence of building modeling when predicting the signal attenuation due to over-rooftop multiple diffraction in urban environments is presented. A straightforward formulation expressed in terms of Uniform Theory of Diffraction (UTD) coefficients is used for the above-mentioned analysis assuming a spherical-wave incidence over the array of buildings and considering the latter modeled as series of different representations such as knife edges, double knife edges, wedges and rectangular sections. The results clearly indicate the importance of an appropriate building modeling in obtaining realistic path-loss predictions in urban environments when multiple diffraction has to be considered.

I. INTRODUCCIÓN

El análisis de las pérdidas que sufre la señal de radio debidas a la difracción múltiple que tiene lugar sobre las azoteas de los edificios en entornos urbanos ha dado lugar a numerosas soluciones que tratan de predecir dicha atenuación [1]-[3]. En este sentido, dichas formulaciones usualmente modelan los edificios que forman la zona urbana a través de láminas o planos semi-infinitos absorbentes. Sin embargo, si consideramos que los edificios en cuestión pueden estar constituidos por azoteas con cornisas, tejados triangulares o cualquier otro tipo de estructura compleja, el empleo de modelos más elaborados que el de láminas absorbentes puede resultar más apropiado para amoldarse de una manera más fiel a las características físicas de los edificios y así obtener resultados más precisos y realistas en el cálculo de las mencionadas pérdidas por difracción múltiple. De esta manera, Piazzi y Bertoni realizan en [4] un estudio acerca de la influencia que tiene la elección de un modelado de edificios consistente en una sola lámina absorbente u otro, compuesto por dos de ellas, en la predicción de la atenuación por difracción múltiple.

En este trabajo, a través de una sencilla formulación expresada en términos de coeficientes UTD (Teoría Uniforme de la Difracción) que asume incidencia de onda esférica sobre la ciudad, se amplía el estudio mostrado en [4] analizando también los modelados en los que los edificios son sustituidos por cuñas perfectamente conductoras así como por secciones rectangulares de conductividad finita, posibilitando de esta manera un análisis más profundo del problema.

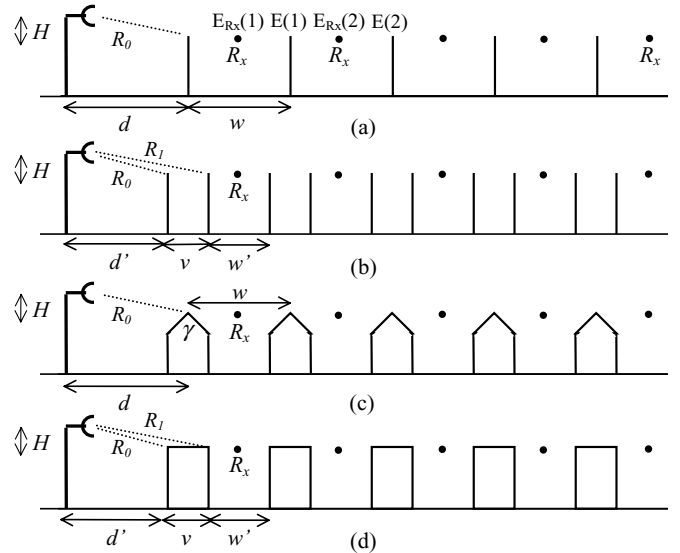


Fig. 1. Esquemas de los diferentes entornos de propagación considerados.

II. ENTORNO DE PROPAGACIÓN

En la Fig. 1 podemos observar los distintos entornos de propagación considerados para efectuar la comparación entre los diferentes modelados de edificios asumidos. En ella se puede apreciar cómo la fila de edificios ha sido sustituida por n (a) láminas individuales o planos semi-infinitos absorbentes (aristas), todos ellos separados entre sí una distancia constante w y situados a la misma altura, (b) conjuntos de dos aristas de la misma altura que están separadas una distancia v flanqueando el perfil del edificio, estando separado cada conjunto una distancia w' , (c) cuñas perfectamente conductoras con el mismo ángulo interior γ y misma altura separadas la misma distancia w , y (d) secciones rectangulares de conductividad finita de anchura v , misma altura y separados entre sí una distancia constante w' . La altura del punto transmisor se asumirá que se encuentra a una distancia d tanto de la fila de aristas individuales como de la de cuñas, y d' del resto de modelados, de tal manera que será una onda esférica la que incida sobre el primer edificio de la ciudad con un ángulo de incidencia α . Así mismo, la altura del punto transmisor relativa a la de los edificios queda definida por H , pudiendo ser tanto positiva (si se sitúa por encima del nivel establecido por la altura de los modelados) como negativa (en caso contrario). Por tanto, se considerarán los casos de incidencia de ángulo positivo y negativo sobre la fila de modelados así como el de incidencia rasante. Los

puntos receptores R_x estarán situados justo en medio de cada par de edificios y a la misma altura de estos.

III. FORMULACIÓN

Considerando la solución final expresada en términos de coeficientes de difracción UTD para el análisis de la difracción múltiple producida por una serie de edificios expresada en [5], el campo total que alcanza los puntos receptores $E_{R_x}(n)$ indicados en la Fig. 1, asumiendo $n \geq 1$, puede expresarse para cada uno de los entornos de propagación considerados, como

- Entorno (a):

- Para $H \geq 0$:

$$E_{R_x}(n) = \frac{1}{n} \sum_{p=0}^{n-1} E(p) \left[\frac{R_0}{R_{n-p}} \exp(-jk(R'_n - R_p)) + \sqrt{\frac{R_0}{(n-p-1/2)w[R_0 + (n-p-1/2)w]}} \right] \cdot D \left(\phi' = \frac{3\pi}{2}, \phi = \frac{\pi}{2} + \alpha, L = \frac{R_0(n-p-1/2)w}{R_0 + (n-p-1/2)w} \right) \cdot \exp(-jk(n-p-1/2)w) \quad (1)$$

donde k es el número de onda

$$R'_x = \sqrt{H^2 + (d + (x-1/2) \cdot w)^2} \quad (2)$$

$D(\phi, \phi', L)$ es el coeficiente de difracción para una arista absorbente expresado en [6], y

$$E(n) = \frac{1}{n} \sum_{m=0}^{n-1} E(m) \left[\frac{R_0}{R_{n-m}} \exp(-jk(R'_n - R_m)) + \sqrt{\frac{R_0}{(n-m)w[R_0 + (n-m)w]}} \right] \cdot D \left(\phi = \frac{3\pi}{2}, \phi' = \frac{\pi}{2} + \alpha, L = \frac{R_0(n-m)w}{R_0 + (n-m)w} \right) \cdot \exp(-jk(n-m)w) \quad (3)$$

con

$$R_x = \sqrt{H^2 + (d + x \cdot w)^2} \quad (4)$$

- Para $H < 0$: (1) y (3) deben ser utilizados sin los términos

$$\frac{R_0}{R_{n-p}} \exp(-jk(R'_n - R_p)) \quad \text{y} \quad \frac{R_0}{R_{n-m}} \exp(-jk(R'_n - R_m)), \text{ respectivamente.}$$

- Entorno (c): Mismas ecuaciones del Entorno (a) pero considerando el coeficiente de difracción para una cuña perfectamente conductora expresado en [7] con parámetros $\phi = 3\pi/2 - \gamma/2$ y $\phi' = \pi/2 + \alpha - \gamma/2$.

- Entorno (d):

- Para $H \geq 0$:

$$E_{R_x}(n) = \frac{1}{2n} \left\{ \sum_{s=0}^{n-1} E_s \left[\frac{R_0}{R_{2(n-s)}} \exp[-jk(R'_{2n} - R_{2s})] + \sqrt{\frac{R_0}{(n-s)(v+w) - w/2}} \sqrt{\frac{R_0}{R_0 + (n-s)(v+w) - w/2}} \right] \cdot D \left(\phi' = \frac{\pi}{2} + \alpha, \phi = \frac{3\pi}{2}, L = \frac{R_0[(n-s)(v+w) - w/2]}{R_0 + [(n-s)(v+w) - w/2]} \right) \cdot \exp[-jk[(n-s)(v+w) - w/2]] \right\} + \sum_{t=1}^n E(t) \left[\frac{R_0}{B_{2(n-t)+1}} \exp[-jk(R'_{2n} - R_{2t-1})] + \sqrt{\frac{R_0}{(n-t)(v+w) + w/2}} \sqrt{\frac{R_0}{R_0 + (n-t)(v+w) + w/2}} \right] \cdot D \left(\phi' = \alpha, \phi = \pi, L = \frac{R_0[(n-t)(v+w) + w/2]}{R_0 + (n-t)(v+w) + w/2} \right) \cdot \exp[-jk[(n-t)(v+w) + w/2]] \quad (5)$$

donde

$$R'_x = \sqrt{\left[d' + \frac{x}{2}(v+w) - w/2 \right]^2 + H^2} \quad (6)$$

$$B_x = \sqrt{\left[d' + \frac{x-1}{2}(v+w) + w/2 \right]^2 + H^2} \quad (7)$$

$D(\phi, \phi', L)$ es el coeficiente de difracción para una cuña finitamente conductora expresado en [6] y

$$E(n) = \frac{1}{2n-1} \left\{ \sum_{m=0}^{n-1} E_m \left[\frac{R_0}{R_{2(n-m)-1}} \exp[-jk(R_{2n-1} - R_{2m})] + \sqrt{\frac{R_0}{(n-m)(v+w) - w}} \sqrt{\frac{R_0}{R_0 + (n-m)(v+w) - w}} \right] \cdot D \left(\phi' = \frac{\pi}{2} + \alpha, \phi = \frac{3\pi}{2}, L = \frac{R_0[(n-m)(v+w) - w]}{R_0 + [(n-m)(v+w) - w]} \right) \cdot \exp[-jk[(n-m)(v+w) - w]] \right\} + \sum_{p=1}^{n-1} E(p) \left[\frac{R_0}{R_{2(n-p)}} \exp[-jk(R_{2n-1} - R_{2p-1})] + \sqrt{\frac{R_0}{(n-p)(v+w)}} \sqrt{\frac{R_0}{R_0 + (n-p)(v+w)}} \right] \cdot D \left(\phi' = \alpha, \phi = \pi, L = \frac{R_0(n-p)(v+w)}{R_0 + (n-p)(v+w)} \right) \cdot \exp[-jk(n-p)(v+w)] \quad (8)$$

con

$$R_x = \begin{cases} \sqrt{\left[d' + \frac{x}{2}(v+w) \right]^2 + H^2}, & x \text{ par} \\ \sqrt{\left[d' + \frac{x-1}{2}(v+w) + v \right]^2 + H^2}, & x \text{ impar} \end{cases} \quad (9)$$

y para $m \geq 1$,

$$E_m = \frac{1}{2m} \left\{ \sum_{q=0}^{m-1} E_q \left[\frac{R_0}{R_{2(m-q)}} \exp[-jk(R_{2m} - R_{2q})] + \sqrt{\frac{R_0}{(m-q)(v+w)}} \sqrt{\frac{R_0}{R_0 + (m-q)(v+w)}} \right] \cdot D \left(\phi' = \frac{\pi}{2} + \alpha, \phi = \frac{3\pi}{2}, L = \frac{R_0(m-q)(v+w)}{R_0 + (m-q)(v+w)} \right) \cdot \exp[-jk(m-q)(v+w)] \right\} + \sum_{r=1}^m E(r) \left[\frac{R_0}{R_{2(m-r)+1}} \exp[-jk(R_{2m} - R_{2r-1})] + \sqrt{\frac{R_0}{(m-r)(v+w) + w}} \sqrt{\frac{R_0}{R_0 + (m-r)(v+w) + w}} \right] \cdot D \left(\phi' = \alpha, \phi = \pi, L = \frac{R_0(m-r)(v+w) + w}{R_0 + [(m-r)(v+w) + w]} \right) \cdot \exp[-jk(m-r)(v+w) + w] \quad (10)$$

con

$$R'_x = \sqrt{\left[d' + \frac{x-1}{2}(v+w) + w \right]^2 + H^2} \quad (11)$$

- Para $H < 0$: Como en este entorno los edificios se consideran uniones de cuñas de conductividad finita y ángulo interior $\pi/2$ radianes unidas dos a dos formando las secciones rectangulares, el análisis de casos con ángulo de incidencia menor que cero ($\alpha < 0$) a través de la formulación expresada en [5] no puede llevarse a cabo ya que las ondas incidirían sobre las cuñas que forman las esquinas de los edificios situadas a la derecha desde dentro del propio edificio, lo que no tiene sentido.

- Entorno (b): Mismas ecuaciones del Entorno (d) pero considerando el coeficiente de difracción para una arista absorbente expresado en [6] con parámetros $\phi = 3\pi/2$ y $\phi' = \pi/2 + \alpha$.

- Para $H < 0$: (5), (8) y (10) deben ser utilizados sin los términos

$$\frac{R_0}{R_{2(n-s)}} \exp(-jk(R'_{2n} - R_{2s})) \quad \text{y} \quad \frac{R_0}{B_{2(n-t)+1}} \exp[-jk(R'_{2n} - R_{2t-1})],$$

$$\frac{R_0}{R_{2(n-m)-1}} \exp[-jk(R_{2n-1} - R_{2m})] \quad \text{y} \quad \frac{R_0}{R_{2(n-p)}} \exp[-jk(R_{2n-1} - R_{2p-1})],$$

$$\text{y} \quad \frac{R_0}{R_{2(m-q)}} \exp[-jk(R_{2m} - R_{2q})] \quad \text{y} \quad \frac{R_0}{R_{2(m-r)+1}} \exp[-jk(R_{2m} - R_{2r-1})],$$

respectivamente.

IV. RESULTADOS

En la Fig. 2 se presenta el campo total que alcanza los puntos receptores normalizado respecto al existente en espacio libre para cada uno de los entornos de propagación mostrados en la Fig. 1. Se ha considerado tanto el caso de polarización *hard* como el de *soft* para los Entornos (c) y (d) así como los

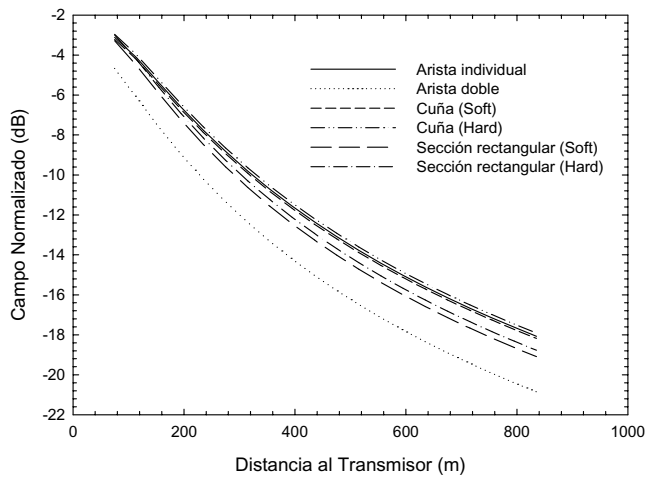


Fig. 2. Campo normalizado para los puntos receptores indicados en la Fig. 1.

parámetros $d=55$ m, $d'=50$ m, $w=40$ m, $w'=30$ m, $v=10$ m, $\gamma=90^\circ$, $f=900$ MHz, $H=2$ m y valores de $\epsilon_r = 5.5$ y $\sigma = 0.023$ S/m para el Entorno (d).

Podemos observar cómo la diferencia entre los resultados de campo normalizado para el modelado de aristas individuales y el de cuñas es muy pequeña para el valor de H considerado, estando esta diferencia añadida en el caso de polarización *soft* y restada en el de *hard*. No obstante, dichos modelados presentan menos pérdidas que el resto a lo largo de todos los puntos receptores considerados, ya que con respecto a estos casos se pueden constatar mayores diferencias en el campo calculado. El hecho interesante a resaltar es que la diferencia entre los resultados obtenidos para el modelado consistente en aristas individuales y los hallados considerando el resto de configuraciones tiende a estabilizarse convirtiéndose en una constante una vez transcurridos aproximadamente diez edificios. En el caso de la Fig. 2, esta diferencia estabilizada u *offset* alcanza un valor de 2.71 dB para el modelado de doble arista y 0.9 dB y 0.6 dB para los casos de sección rectangular, polarizaciones *soft* y *hard*, respectivamente.

De esta manera, en las Fig. 3 y Fig. 4 se muestran los valores del mencionado *offset* entre los resultados del modelado de aristas individuales y el del resto de entornos de propagación considerados para las frecuencias de 900 MHz y 2.1 GHz, respectivamente, en función de la altura de la antena transmisora H y asumiendo los mismos parámetros que los utilizados para obtener la Fig. 2. Como puede apreciarse, existen diferencias de atenuación de más de 5 dB en algunos casos respecto a los resultados obtenidos considerando el modelado más habitualmente utilizado de aristas absorbentes.

V. CONCLUSIONES

Se ha presentado un análisis de la influencia del modelado de edificios en la predicción de las pérdidas por difracción múltiple de la señal de radio en entornos urbanos. Los resultados obtenidos a través de una solución expresada en términos de coeficientes UTD muestran que existe un peculiar fenómeno que estabiliza la diferencia entre los resultados de campo normalizado obtenidos para el caso en

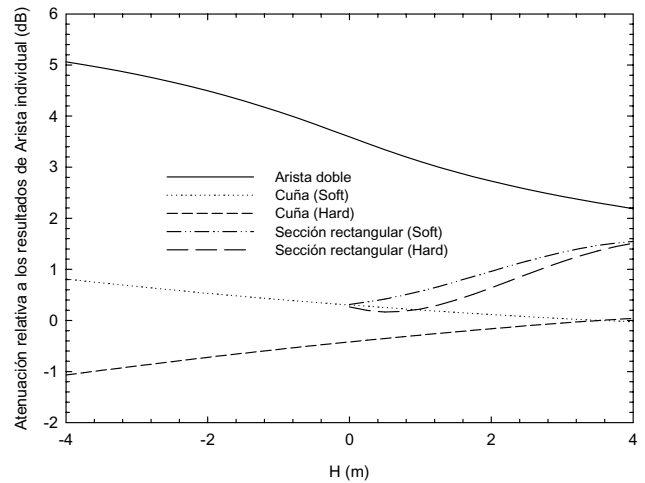


Fig. 3. Atenuación relativa a los resultados para el modelado de aristas individuales (*offset*). $f= 900$ MHz.

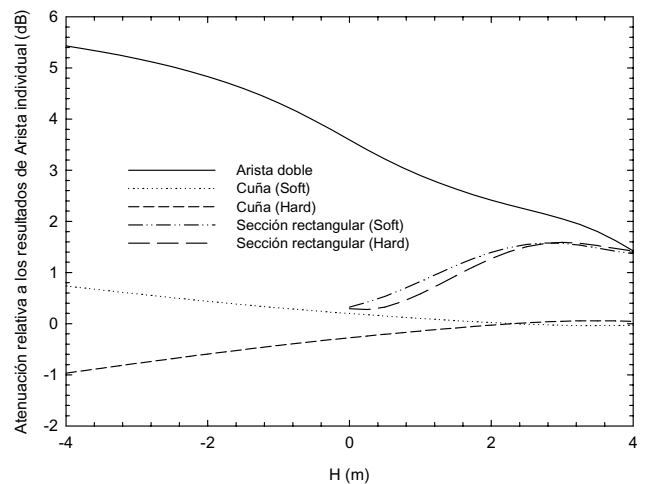


Fig. 4. Atenuación relativa a los resultados para el modelado de aristas individuales (*offset*). $f= 2.1$ GHz.

el que se modelen los edificios por aristas absorbentes y los calculados para el resto de representaciones una vez transcurridos diez edificios, aproximadamente. Esta diferencia puede alcanzar valores de hasta más de 5 dB en algunos casos, por lo que queda demostrado que la elección de un modelado de edificios apropiado puede resultar de gran importancia para obtener predicciones realistas de pérdidas por difracción múltiple.

REFERENCIAS

- [1] J. Walfisch y H.L. Bertoni, "A theoretical model of UHF propagation in urban environments," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. **36**, no.12, pp. 1788-1796, Dic. 1988.
- [2] S. R. Saunders y F. R. Bonar, "Explicit multiple building diffraction attenuation function for mobile radiowave propagation", *Electro. Lett.*, 1991, **27**, (14), pp. 1276-1277
- [3] L. Juan-Llácer y N. Cardona, "UTD solution for the multiple building diffraction attenuation function for mobile radiowave propagation", *Electro. Lett.*, 1997, **33**, (1), pp. 92-93
- [4] L. Piazzzi y H. L. Bertoni, "On Screen Placement for Building Representation in Urban Environments considering 2D Multiple Diffraction Problems", *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference*, 1999
- [5] J-V. Rodríguez, J-M. Molina-García-Pardo y L. Juan-Llácer, "A New Solution expressed in Terms of UTD Coefficients for Multiple Diffractions by Buildings considering Spherical-Wave Incidence", *IEEE Antennas and Propagation Conference*, Washington D. C., USA, July, 2005

- [6] R. J. Luebbers, "Finite Conductivity Uniform GTD versus Knife Edge Diffraction in Prediction of Propagation Path Loss", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 32, no. 1, pp. 70-76, Jan. 1984
- [7] R.G. Kouyoumjian and P.H. Pathak, "A Uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface", *Proc. IEEE*, 1974, **62**, (11), pp. 1448-1461