Modelos de Propagación electromagnética

Modelos deterministicos de propagación

Alexandre Wagemakers y Borja Ibarz

23 de octubre de 2007

Modelos deterministicos de propagación

Plan de la clase:

- Propagación en terrenos irregulares.
- Modelos sencillos de propagación para móviles.
- Difracción por obstáculos agudos.
- Métodos geométricos de estimación de perdidas.
- Planificación radioeléctrica.

Problemas de las comunicaciones móviles

Problemas con las antenas:

- Son generalmente isotrópicas y de altura baja.
- Los costes bajos de los componentes.
- Limitaciones de potencia por medidas de seguridad.

Problemas con el entorno:

- Es muy probable que el canal sea de multitrayecto sin vista de la antena.
- El alcance de la antena es limitado.
- El usuario se mueve.

Problemas con la banda:

- Hay que dar servicio a todo el mundo con un ancho de banda limitado.
- Hay que compartirla entre varios proveedores.
- Mucha contaminación electromagnética.

Soluciones de las comunicaciones móviles

Soluciones con las antenas:

- Se aumentan los tratamientos numéricos para compensar.
- Se usan antenas baratas pero eficientes.

Soluciones con el entorno:

- Se usan modelos de propagación para rectificar las señales.
- Los filtros de la capa física se encargan de regenerar las señales.

Soluciones con la banda:

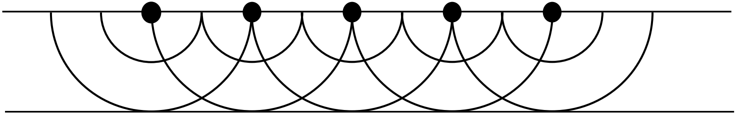
- Se reusan las frecuencias en varias celdas o microceldas.
- Se crean comisiones responsables de la atribución de la banda.

Modelos de propagación en terreno irregular.

En las comunicaciones móviles hacer una predicción de la señal recibida es muy difícil. Depende del terreno, de la banda, del movimiento del usuario etc...
Sin embargo se pueden usar teorías y modelos físicos para garantizar un cierto nivel de recepción en el peor caso.

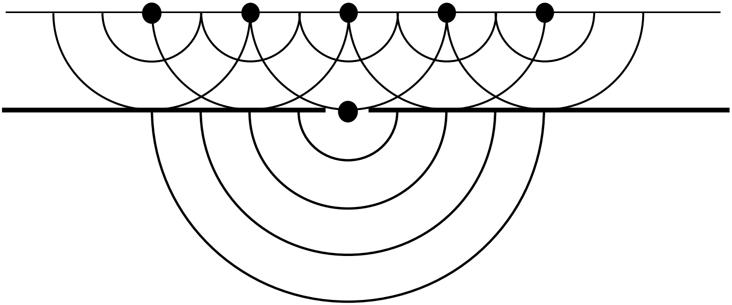
La difracción

El principio de Huygens exprime el hecho de que un frente de onda se comporta como una fuente secundaria para formar un nuevo frente de onda.



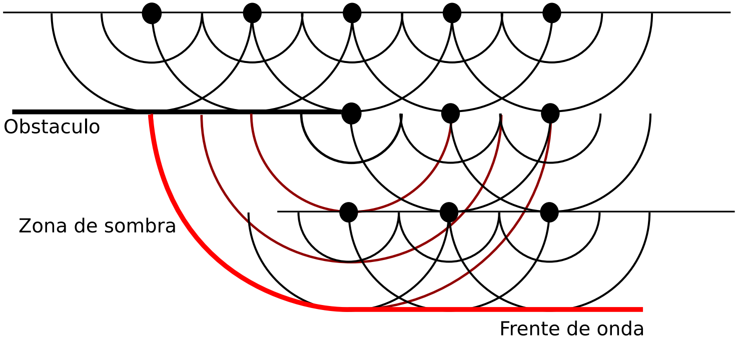
La difracción

Como consecuencia del principio de difracción, cuando la onda intercepta un obstáculo, el obstáculo se convierte en una fuente secundaria. Aquí tenemos la difracción por una apertura pequeña frente a la longitud de onda.



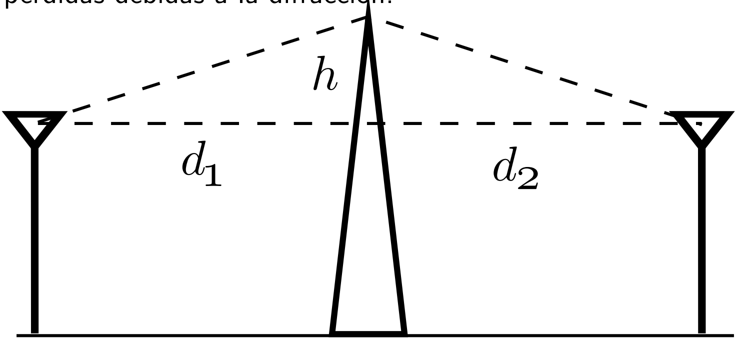
La difracción

Si el obstáculo consiste en una barrera, un nuevo frente de onda se forma, este esta deformado por objetos situados detrás de esta barrera pueden recibir la onda.



La difracción por objetos delgados

En el caso de objetos agudos se puede determinar teóricamente las perdidas debidas a la difracción.

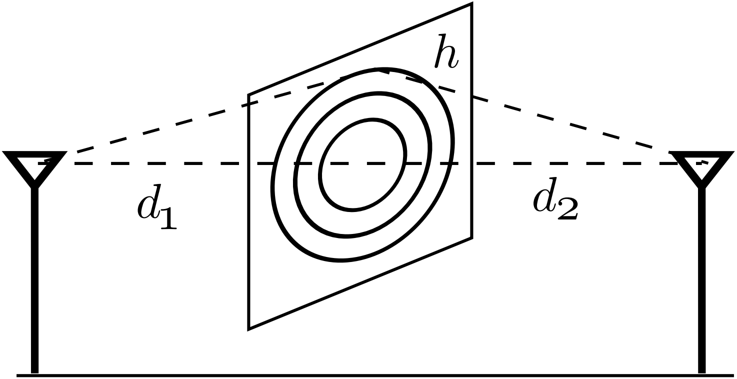


La diferencia de caminos se expresa con la diferencia de fase entre las señal emitida y recibida:

$$\Delta \simeq \frac{h^2}{d}\left(\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2}\right) \quad (1)$$

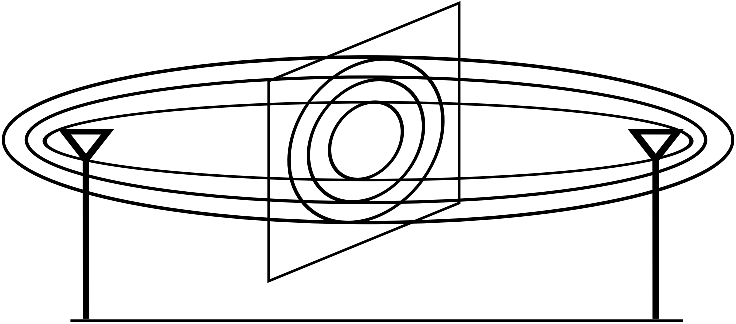
Elipsoides de Fresnel

Podemos definir círculos para los cuales los caminos son iguales. Están perpendiculares a la plano de transmisión.



Elipsoides de Fresnel

La familia de caminos para las cuales la diferencia de fase Φ es múltiple de media longitud de onda se representan por elipsoides de Fresnel.



La difracción por objetos delgados

La diferencia de fase se expresa como:

$$\Phi = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} = \frac{2\pi h^2}{\lambda d}\left(\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2}\right) \tag{2}$$

Se expresa en función del termino

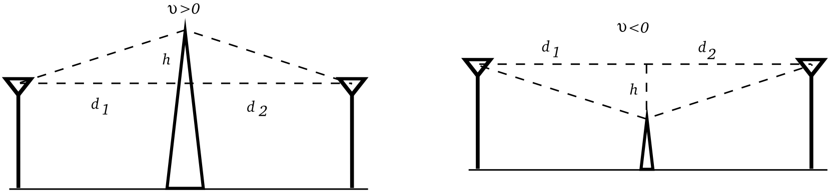
$$\Phi = \frac{\pi}{2}\nu^2 \tag{3}$$

con ν el parámetro de difracción de Fresnel-Kirchhoff:

$$\nu = h\sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} \tag{4}$$

La difracción por objetos delgados

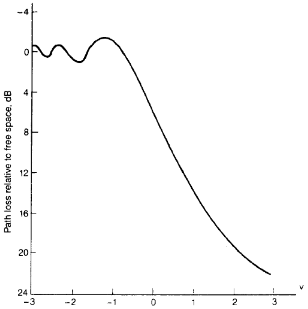
Para calcular las perdidas debidas al obstáculo podemos integrar el campo para todas las fuentes secundarias que no son absorbidas por el obstáculo.



Podemos distinguir dos casos, $\nu > 0$ y $\nu \leq 0$.

La difracción por objetos delgados

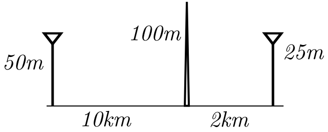
Perdidas en función de:



Existe una aproximación lineal de esta curva:

$$L(\nu) = \begin{cases} -20log(0{,}5 - 0{,}62\nu) & -0{,}8 < \nu < 0 \\ -20log(0{,}5exp(-0{,}95\nu)) & 0 < \nu < 1 \\ -20log(0{,}4 - \{0{,}1184 - (0{,}38 - 0{,}1\nu)^2\}^{1/2}) & 1 < \nu < 2{,}4 \\ -20log(0{,}225/\nu) & \nu > 2{,}4 \end{cases} \quad (5)$$

Ejemplo



La frecuencia de transmisión es de 900MHz. Calculo de ν:

$$\nu = h\sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}}$$

Aqui las alturas de las antenas son diferentes, el calculo se complica.

$$h = h_o - h_t + \frac{d_1(h_t - h_r)}{d_2 + d_1} = 70{,}833$$

El parametro ν es

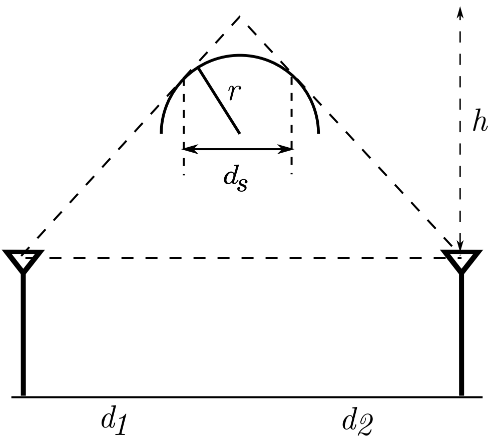
$$\nu = 4{,}25$$

Leyendo la curva tenemos una perdidad de 25dB aproximadamente

La difracción por objetos delgados

```
function L=diffraction(d1,d2,ho,ht,hr,lambda)
%   Funcion para calcular las perdidas con obstaculos redondos:
%   d1 distancia Tx->obstaculo
%   d2 distancia obstaculo->Rx
%   ho altura obstaculo
%   ht altura Tx
%   hr altura Rx
%   lambda longitud de onda de la transmisión

h_eq  =  ho- ht + d1*(ht-hr)/(d1+d2);

nu= h_eq*sqrt(2*(d1+d2)/lambda/d1/d2);

if nu > -0.8 & nu <0,

    L= -20 * log10(0.5-0.62*nu);

end

if nu >= 0 & nu <1,

    L= -20*log10(0.5*exp(-0.95*nu));
end

if nu >= 1 & nu <2.4,

    L= -20*log10(0.4-(0.1184-(0.38-0.1*nu)^2)^(1/2));
end

if nu>=2.4,

    L= -20*log10(0.225/nu);
end
```

Obstaculos redondos



Para un obstaculo con una forma cilindrica con un radio de curvatura se puede mejorar la predicción de las perdidas.

Obstaculos redondos

Para los obstaculos redondos se añade un termino mas a las perdidas del difracción por obstaculos delgados:

$$L = L_d if(\nu) + A(\rho) + U(\nu, \rho) \tag{6}$$

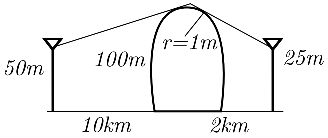
Con las siguientes funciones:

$$U(\nu\rho) = \begin{cases} (43{,}6 + 23{,}5\nu\rho)\log(1 + \nu\rho) - 6 - 6{,}7\nu\rho \text{ dB} & \nu\rho < 1 \\ \\ 22\nu\rho - 20\log(\nu\rho) - 14{,}13 \text{ dB} & \nu\rho \geq 2 \end{cases} \tag{7}$$

$$A(0, \rho) = 6 + 7{,}19\rho - 2{,}02\rho^2 + 3{,}63\rho^3 - 0{,}75\rho^4 \text{ para } \rho < 1{,}4 \tag{8}$$

$$\rho = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^{1/6} r^{1/3} \left(\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2}\right)^{1/2} \tag{9}$$

Obstaculos redondos, Ejemplo



La frecuencia de transmisión es de 900MHz. Calculo de ν:

$$\nu = 4{,}25$$

Leyendo la curva tenemos una perdidad de 25dB aproximadamente para las perdidas por difracción (ver ejemplo anterior).

Obstaculos redondos, Ejemplo

```
function L=rounded_hills(d1,d2,r,ho,ht,hr,lambda)
%   Funcion para calcular las perdidas con obstaculos redondos:
%   d1 distancia Tx->obstaculo
%   d2 distancia obstaculo->Rx
%   r  radio de curvatura del obstaculo
%   ho altura obstaculo
%   ht altura Tx
%   hr altura Rx
%   lambda longitud de onda de la transmisión

h_eq  =  ho- ht + d1*(ht-hr)/(d1+d2);

nu= h_eq*sqrt(2*(d1+d2)/lambda/d1/d2);

rho=(lambda/pi)^(1/6)*r^(1/3)*sqrt((d1 + d2)/(d1*d2));

if nu*rho <1,
U = (43.6+23.5*nu*rho )*log10(1+nu*rho) -6 -6.7*nu*rho;

else

U= 22*nu*rho - 20*log10(nu*rho) -14.13;
end

if rho< 1.4;
A = 6 + 7.19 *rho -2.02*rho^2 + 3.63*rho^3 - 0.75*rho^4 ;

else

A=0;

end

L=A + U + perd_dif(nu);
```

La difracción por objetos delgados

```
function L=perd_dif(nu)

if nu > -0.8 & nu <0,

    L= -20 * log10(0.5-0.62*nu);

end

if nu >= 0 & nu <1,

    L= -20*log10(0.5*exp(-0.95*nu));

end

if nu >= 1 & nu <2.4,

    L= -20*log10(0.4-(0.1184-(0.38-0.1*nu)^2)^(1/2));

end

if nu>=2.4,

    L= -20*log10(0.225/nu);

end
```

Obstaculos redondos ITU 526-9

Ojo, aqui d_1 y d_2 se refieren al trayecto de los rayos de la antena al obstaculo y no la distancia en linea directa. Las perdidas del obstaculo se calculan con las siguiente formula:

$$A = J(\nu) + T(m, n) \tag{10}$$

Donde $J(\nu)$ son las perdidas por difracción de objeto delgado y T depende del obstaculo:

$$T(m,n) = \begin{cases} 7{,}2m^{1/2} - (2 - 12{,}5n)m + 3{,}6m^{3/2} - 0{,}8m^2 \text{ dB} & \text{para } mn < 4 \\ -6 - 20\log(m,n) + 7{,}2m^{1/2} - (2 - 17n)m + 3{,}6m^{3/2} - 0{,}8m^2 \text{ dB} & \text{para } mn > 4 \end{cases} \tag{11}$$

Los coeficientes m y n se obtienen a partir de los parametros del obstaculo:

$$m = R\left(\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2}\right)\left(\frac{\pi R}{\lambda}\right)^{1/3} \tag{12}$$

$$n = \frac{h}{R}\left(\frac{\pi R}{\lambda}\right)^{1/3} \tag{13}$$

Discusión de la teoría de la difracción

Esta teoría explica porque en las zonas de sombras todavía hay señal. Sin embargo tiene inconveniente:

- Pocas veces los obstáculos son cuñas delgadas.
- El coste computacional puede ser importante.
- No toma en cuenta otros efectos como la polarización, la conductividad, la rugosidad etc...
- Las reflexiones en el suelo tampoco se toman en cuenta, en el caso de los móviles pueden ser importantes.

Sin embargo tiene un fundamente geométrico muy bonito y fácil de entender.

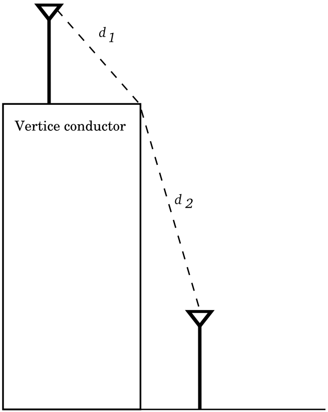
Otros modelos de propagación basado en la difracción

Para resolver los problemas de la difracción por cuñas se ha propuesto otros métodos basados en geometría.

- GTD: Geometric theory of diffraction.
- UTD: Unified theory of diffraction.

La UTD: Unified theory of diffraction

La UTD consiste en un tomar las cunas como prismas cuyo ángulo puede ser distinto, podría ser también en un vértice de un edificio. Se toma en cuenta la polarización de la onda así como su naturaleza (esférica, cónica, plana). El edificio tiene una cierta conductividad que influye en la propagación.



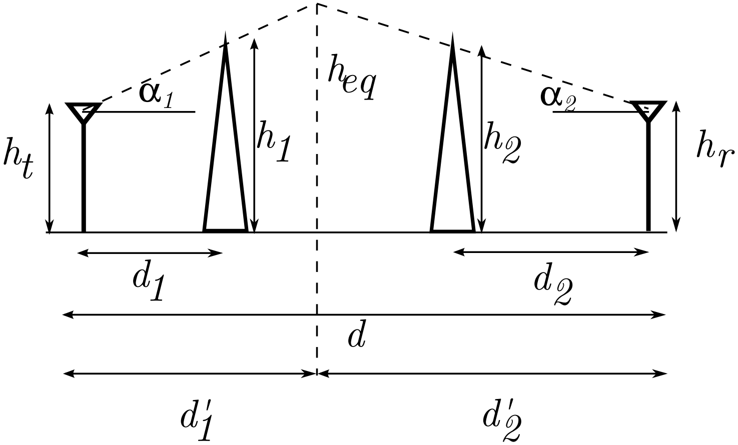
Cuando hay mas de una difracción

Para estimar las perdidas de difracción cuando hay mas de un objeto se pueden usar varios métodos:

- El metodo de Bullington.
- El metodo Japones.
- El metodo Epstein-Perterson.
- El método Deygout
- El método IUT

El metodo Bullington

El metodo Bullington consiste en definir un nuevo obstáculo efectivo de altura h_m entre los dos obstáculos presentes.



Método Bullington

Las perdidas equivalentes de propagación se calculan entonces como si tuviéramos un obstáculo agudo de altura h_m y las perdidas se calculan con las formulas de difracción anteriores.
Este metodo tiene el problema de que obstáculos por debajo del horizontes son despreciados y puede llevar a errores en el calculo de las perdidas.

Método Bullington

Calculo de la altura del nuevo obstaculo para $h_1, h_2 > h_t, h_r$ y con un poco de geometria:

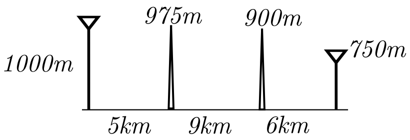
$$h_{eq} = \begin{cases} h_r + (d + d_1 \frac{h_t - h_r}{h_1 - h_t}) \frac{(h_2 - h_r)(h_1 - h_t)}{d_1(h_2 - h_r) + d_2(h_1 - h_t)} & \text{para } h_t > h_r \\ h_t + (d + d_2 \frac{h_r - h_t}{h_2 - h_r}) \frac{(h_2 - h_r)(h_1 - h_t)}{d_1(h_2 - h_r) + d_2(h_1 - h_t)} & \text{para } h_t < h_r \end{cases} \tag{14}$$

por otra parte

$$d_1' = d_1 \frac{h_e q - h_t}{h_1 - h_t} \tag{15}$$

$$d_2' = d_2 \frac{h_e q - h_r}{h_2 - h_r} \tag{16}$$

Ejemplo



La frecuencia de transmisión es de 900MHz. Calculo de h_eq:

$$h_eq = h_t + (d + d_2\frac{h_r - h_t}{h_2 - h_r})\frac{(h_2 - h_r)(h_1 - h_t)}{d_1(h_2 - h_r) + d_2(h_1 - h_t)} = 937$$

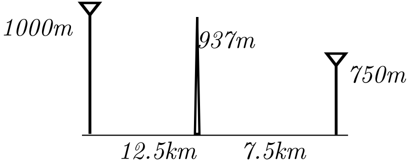
y de las distancias:

$$d_1' = d_1\frac{h_eq - h_t}{h_1 - h_t} = 17500$$

$$d_2' = d_2\frac{h_eq - h_r}{h_2 - h_r} = 7500$$

Ejemplo

El problema es ahora un calculo de difraccion simple con la geometria siguiente:



$$h = h_0 - h_t + \frac{d_1'(h_t - h_r)}{d_2' + d_1'} = 93{,}75$$

$$\nu = h\sqrt{\frac{2(d_1' + d_2')}{\lambda d_1' d_2'}} = 3{,}3541$$

Las perdidas son entonces:

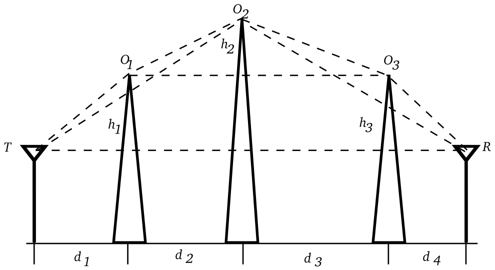
$$L_b = L(3{,}3541) = 23{,}4679$$

Código Matlab

```
%%%
%% Perdidas bullington
%%%

ht=1000
hr=750
h1=975
h2=900

d1=5e3
d2=6e3
d=20e3

lambda = 3e8/900e6;

heq=(d+d2*(hr-ht)/(h2-hr))*(h2-hr)*(h1-ht)/(d1*(h2-hr)+d2*(h1-ht)) + ht

dd1=d1*(heq-ht)/(h1-ht)
dd2=d2*(heq-hr)/(h2-hr)

h= heq - ht - dd1*(hr-ht)/(d)

nu= h*sqrt(2*(dd1+dd2)/lambda/dd1/dd2)

Ld_bull= -20*log10(0.225/nu)
```

Método Epstein-Peterson

El método de Epstein peterson consiste en descomponer el problema. Se descompone el camino y se se calculan las perdidas por difracción en el camino TO_2 y luego O_1O_3 y al final O_2R se calculan las perdidas con el metodo de difracción anterior y se suman las perdidas.

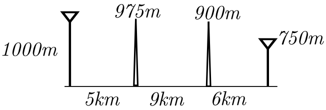


Las perdidas son:

$$L(RT, d_1, d_2) = L(h_1, d_1, d_2) + L(h_2, d_2, d_3) + L(h_3, d_3, d_4) \quad (17)$$

Sin embargo hay que aportar una corrección debida a Millington en algunos casos.

Ejemplo



La frecuencia de transmisión es de 900MHz.
Calculo de la perdida del camino TO_2:

$$h_{eq1} = h_1 - h_t + \frac{d_1(h_t - h_2)}{d_2 + d_1} = 10{,}7143$$

$$\nu_{TO_2} = h_{eq1}\sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} = 0{,}4629$$

Calculo de la perdida del camino $0_1 R$:

$$h_{eq2} = h_2 - h_1 + \frac{d_2(h_1 - h_r)}{d_2 + d_3} = 60$$

$$\nu_{O_1 R} = h_{eq2}\sqrt{\frac{2(d_2 + d_3)}{\lambda d_2 d_3}} = 2{,}4495$$

Ejemplo

La correccion de Millington se escribe como:

$$Lc = 10 \log \frac{(d_1 + d_2)(d_2 + d_3)}{(d_2(d_1 + d_2 + d_3))} = 0{,}6695 \tag{18}$$

Las perdidas en total son:

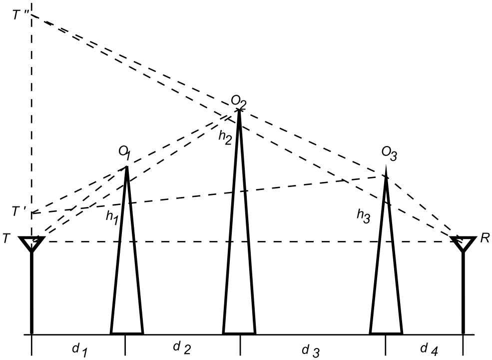
$$L_{Eps} = L(\nu_{TO_2}) + L(\nu_{O_1 R}) + Lc = 31{,}2477 \tag{19}$$

Código Matlab

```
%%
%% Perdidas Epstein
%%

ht=1000
hr=750
h1=975
h2=900

lambda = 3e8/900e6;

d1= 5e3
d2= 9e3
d3 = 6e3

h_eq1  =  h1 - ht + d1*(ht-h2)/(d2+d1)

nu1= h_eq1*sqrt(2*(d1+d2)/lambda/d1/d2)

h_eq2  =  h2 - h1 + d2*(h1-hr)/(d2+d3)

nu2= h_eq2*sqrt(2*(d2+d3)/lambda/d2/d3)
Lc=10*log10((d1+d2)*(d2+d3)/(d2*(d1+d2+d3)));

L_eps = perd_dif(nu1)+perd_dif(nu2)+Lc
```

Método Japonés

El método japonés es similar al método de Epstein-Peterson pero con la diferencia siguiente. El camino para cada trayecto toma como punto de inicio la vertical del emisor que coincide con la horizontal del receptor (o del punto estudiado).



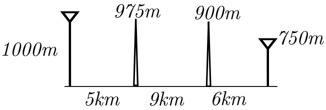
Método Japonés

Las perdidas son:

$$L(RT, d_1, d_2) = L(h_1, d_1, d_2) + L(h_2, d_1 + d_2, d_3) + L(h_3, d_1 + d_2 + d_3, d_4) \tag{20}$$

Este método es mas preciso que el Epstein-Peterson porque no necesita las correcciones de Millington.

Ejemplo



La frecuencia de transmisión es de 900MHz.
Calculo de la perdida del camino $T0_1O_2$:

$$h_{eq1} = h_1 - h_t + \frac{d_1(h_t - h_2)}{d_2 + d_1} = 10{,}7143m$$

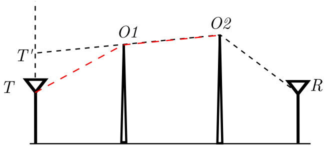
$$\nu_{TO_2} = h_{eq1}\sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} = 0{,}4629$$

Calculo de la perdida del camino $T'0_2R$:

$$h_{eq2} = h_2 - h_{T'} + \frac{(d_1 + d_2)(h_{T'} - h_r)}{d_1 + d_2 + d_3} = 60m$$

$$\nu_{T'R} = h_{eq2}\sqrt{\frac{2(d_1 + d_2 + d_3)}{\lambda(d_1 + d_2)d_3}} = 2{,}4495$$

Ejemplo



aqui la altura $h_{T'}$ es:

$$h_{T'} = h_1 - d_1 \frac{h_2 - h_1}{d_2} = 1016m$$

Las perdidas del método Japonés son:

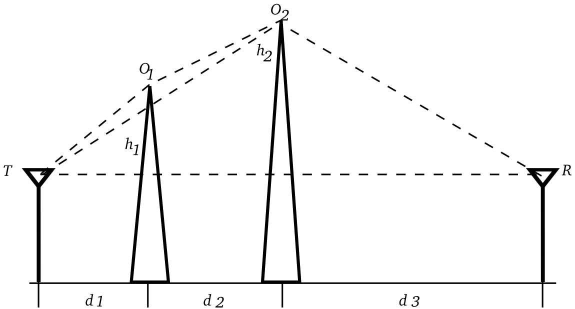
$$L_{jap} = L(\nu_{TO_2}) + L(\nu_{T'R}) = 31{,}2477$$

Código Matlab

```
%%
%% Perdidas método Japones
%%

ht=1000
hr=750
h1=975
h2=900

d1= 5e3
d2= 9e3
d3 = 6e3

lambda = 3e8/900e6;


h_eq1  =  h1 - ht + d1*(ht-h2)/(d2+d1)

nuj1= h_eq1*sqrt(2*(d1+d2)/lambda/d1/d2)

htprima=  h1  - d1*(h2-h1)/d2

h_eq2  =  h2 - htprima + (d1+d2)*(htprima-hr)/(d1+d2+d3)

nuj2= h_eq2*sqrt(2*(d1+d2+d3)/lambda/(d1+d2)/d3)

L_jap = perd_dif(nuj1)+perd_dif(nuj2)
```

Método Deygout

El método de Deygout viene a calcular primero el efecto de la difracción del obstaculo dominante.



Método Deygout

Las perdidas son:

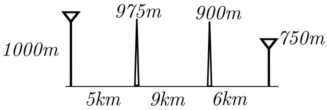
$$L(RT, d_1, d_2, d_3) = L(h_2, d_1 + d_2, d_3) + L(h_1, d_1, d_2) \tag{21}$$

Un termino de correcciones se aplica a las perdidas:

$$L_c = (12 - 20\log\frac{2}{1-\alpha/pi})(\frac{\nu_1}{\nu_2})^{2\nu_1} \tag{22}$$

$$\alpha = atan(\sqrt{\frac{s_2(s_1+s_2+s_3)}{s_1 s_3}}) \tag{23}$$

Ejemplo



La frecuencia de transmisión es de 900MHz.
Primero se calculan las alturas referidas al trayecto TR:

$$h_1' = h_1 - h_t + \frac{d_1(h_t - h_r)}{d_1 + d_2 + d_3} = 37{,}5m$$

$$h_2' = h_2 - h_t + \frac{(d_1 + d_2)(h_t - h_r)}{d_1 + d_2 + d_3} = 75m$$

Domina el obstaculo 2, Calculo de la perdida del camino $T0_2R$:

$$h_{eq1} = h_2 - h_t + \frac{(d_1 + d_2)(h_t - h_r)}{d_1 + d_2 + d_3} = 75m$$

$$\nu_{TO_2R} = h_{eq1}\sqrt{\frac{2(d_1 + d_2 + d_3)}{\lambda(d_1 + d_2)d_3}} = 2{,}8347$$

Ejemplo

Calculo de la perdida del camino TO_1O_2:

$$h_{eq2} = h_1 - h_t + \frac{d_1(h_t - h_2)}{d_1 + d_2} = 10{,}7$$

$$\nu_{TO_1O_2} = h_{eq2}\sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} = 0{,}4629$$

Las perdidas son:

$$L_{deg} = L(\nu_{TO_2R}) + L(\nu_{TO_1O_2}) - L_c = 22{,}0066 + 9{,}8403 - 0{,}05 = 37{,}1359$$

Código Matlab

```
%%
%% Perdidas método Deygout
%%

ht=1000
hr=750
h1=975
h2=900

d1= 5e3
d2= 9e3
d3 = 6e3

lambda = 3e8/900e6;

h_eq1  =  h2 - ht + (d1+d2)*(ht-hr)/(d2+d1+d3)

nud1= h_eq1*sqrt(2*(d1+d2+d3)/lambda/(d1+d2)/d3)


h_eq2  =  h1 - ht + d1*(ht-h2)/(d1+d2)

nud2= h_eq2*sqrt(2*(d1+d2)/lambda/d1/d2)


alpha=atan( sqrt(d2*(d1+d2+d3)/(d1*d3)));

L_cd=(12-20*log10(2/(1-alpha/pi)))*(nud2/nud1)^(2*nud1);

L_deg= perd_dif(nud1)+perd_dif(nud2) - L_cd
```

Múltiples obstáculos (superior a tres)

En el caso de varios obstáculos se usa el siguiente método del ITU:

1. Se busca el obstáculo con el mayor μ.
2. Este obstáculo divide el trayecto entre el emisor y el receptor en dos. Sea μ_n este parámetro.
3. En cada sub intervalo se busca el obstáculo con mayor μ, sea μ_t y μ_r estos obstáculos.

Las perdidas se estiman con:

$$L = J(\mu_p) + T[J(\mu_r) + J(\mu_t) + C] \text{ para } \mu_p > -0{,}78 \tag{24}$$

$$L = 0 \text{ sino} \tag{25}$$

con $C = 10 + 0{,}04D$, donde D es la distancia total en km y $T = 1 - exp(-J(\mu_p)/6)$

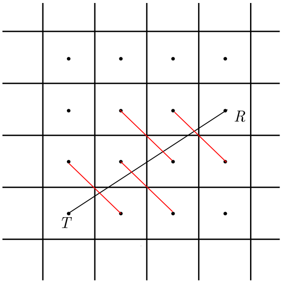
Este método esta basado en el método de Deygout para mas de dos obstáculos.

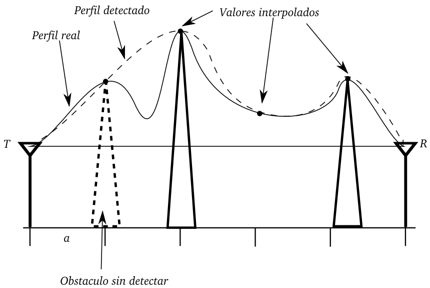
La recomendación ITU-R P.526

La recomendación de la ITU da métodos para determinar las perdidas por difracción así como formulas detalladas para el metodo UTD y los métodos de obstáculos agudos y obstáculos redondos.
También se puede citar el libro del grupo COST 231 muy completo

Elaboración de perfiles

Para elabora un perfil de terreno entre dos puntos se usan datos topograficos:





El modelo de Egli

Este modelo permite tener una aproximación rapidamente:

$$L = G_t G_r \left(\frac{h_t h_r}{d^2}\right)^2 \left(\frac{40}{f}\right)^2 \tag{26}$$

La mediana estadistica de los valores de las perdidas.

El modelo de Longley-Rice

También es un modelo estadistico pero toma en cuenta muchos mas parametros para el calculo de las perdidas:

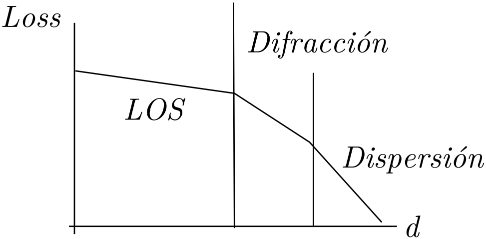
- Altura media del terreno (ondulación)
- Refracción de la troposfera
- Perfiles del terreno
- Conductividad y permitivada del suelo
- Climat

El programa da intervalos de confianza para las perdidas medianas de propagación.

`http://flattop.its.bldrdoc.gov/itm.html`

El modelo de Longley-Rice

Para el cálculo de las perdidas el modelo usa la teoría de la difracción, la refracción troposferica y el escatering del terreno. Las perdidas adicionales estan basadas en medidas tomadas en varias situaciones.



El método IUT P370

El modelo de la IUT nos proporciona curvas obtenidas a partir de numérosos experimentos realizados en varios paises. Estas curvas permiten estimar las perdidas en terreno irregular.

Planificación Radioeléctrica

Con el ayuda de estos métodos y otros parámetros como la geografía de los sitios podemos hacer una predicción de las perdidas sobre un área y así diseñar la red móvil.
Existen numerosos programas de análisis de radio enlaces.

Planificación Radioeléctrica

- AWE Winprop `www.awe-communications.com`
- SIRADEL
  `http://www.mobilecomms-technology.com/contractors/netwo`
- Progira
  `http://www.progira.com/?gclid=CIHynfmm7o4CFQVjMAodsQO9I`
- ATDI Radio `http://www.atdi.com`
- Una lista completa de software:
  `http://members.shaw.ca/propagation/planning.html`

Ondulación del terreno

Para estimar el tipo de propagación (reflexión o dispersión), se usa el criterio de Rayleigh para la rugosidad del terreno. Se mide la desvación tipica de la altura del terreno y se aplica el criterio:

$$C =\simeq \frac{4\pi\sigma \sin\psi}{\lambda} \tag{27}$$

si $C < 0{,}1$ entonces tenemos una reflexión, el terreno es liso, para $C > 10$ tenemos la dispersión de la señal sobre el terreno. ψ es el angulo de incidencia sobre el terreno.

Bibliografía

1. J.D. Parson, the Mobile Radio Channel, Wiley, 2000
2. JM Hernando Rabanos, Transmisión por radio, Editorial Ramón Areces, 2006.
3. Recomendación UIT-R P526: Propagación por difracción.
4. Hufford, G. A., A. G. Longley, and W. A. Kissick (1982), A guide to the use of the ITS Irregular Terrain Model in the area prediction mode, NTIA Report 82-100. Availbale from NTIS, Access. No. PB82-217977.