

Lezione n. 9

*Calcolo del campo elettromagnetico:
tecniche empiriche
per propagazione outdoor*

Impatto ambientale dei campi elettromagnetici

Modelli empirici outdoor

- Esistono moltissimi modelli empirici per il PL in ambiente outdoor, molto diversi per approccio, accuratezza, complessità.
- La maggior parte derivano da misure effettuate nell'area in esame

- **Modello di Okumura**
- **Modello di Hata**
- **Modello Walfish-Bertoni**
- **Modello Ikegami**
- **Modello COST 231**

Modello di Okumura

- Il modello di Okumura (1968) è uno dei più usati per pianificare sistemi mobili (specie in Giappone..)
- E' considerato uno dei migliori come accuratezza. Ha valori di deviazione standard entro 12dB dai dati misurati.
- Basato esclusivamente su dati misurati non fornisce alcuna spiegazione / interpretazione dei dati.
- E' valido soprattutto per aree urbane o suburbane, meno per aree rurali su terreno irregolare
- Valido per:
 - frequenza 150 - 2000 MHz;
 - distanze 1 - 100 km;
 - altezza effettiva stazione radio-base 30 - 1000 m
- Okumura ha sviluppato un insieme di curve in funzione della frequenza e della distanza (range 1 - 100 km) per l'attenuazione media relativa allo spazio libero (A_{mn}) per un'altezza effettiva della BSA di 200m, terreno liscio, area urbana, altezza effettiva antenna mobile 3 m o 1.5 m
- Secondo il modello di Okumura, l'attenuazione supplementare A_{mn} deve essere aggiunta al path loss in spazio libero, insieme a dei fattori di correzione che tengano conto delle altezze effettive delle antenne, se diverse dalle condizioni di riferimento

Modello di Okumura

Il modello si può esprimere come:

$$L_{50}(\text{dB}) = L_F + A_{mn}(f,d) - G(h_{te}) - G(h_{re}) - G_{AREA}$$

$L_{50}(\text{dB})$ = valor medio del Path-Loss

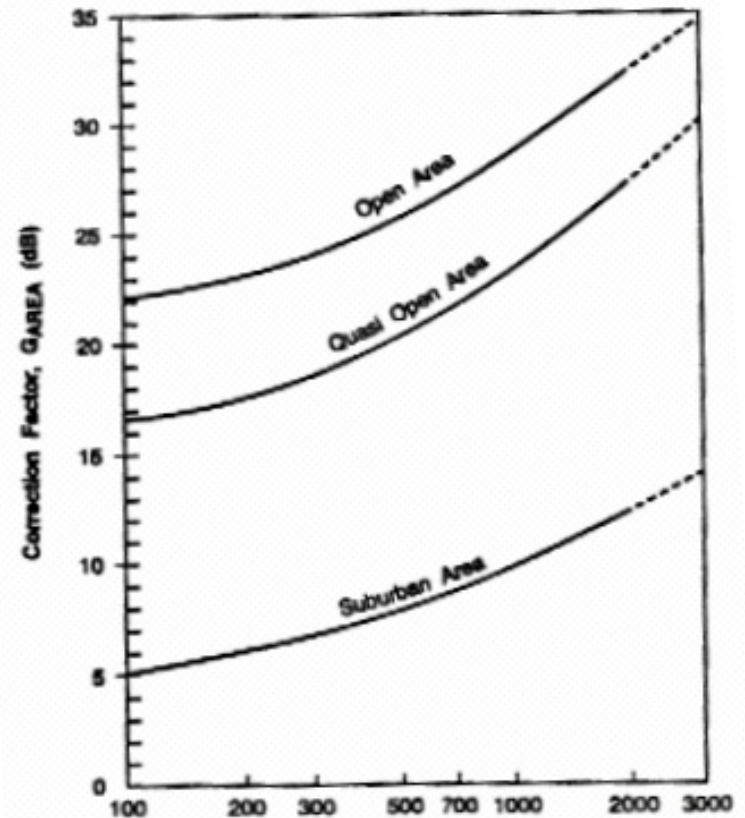
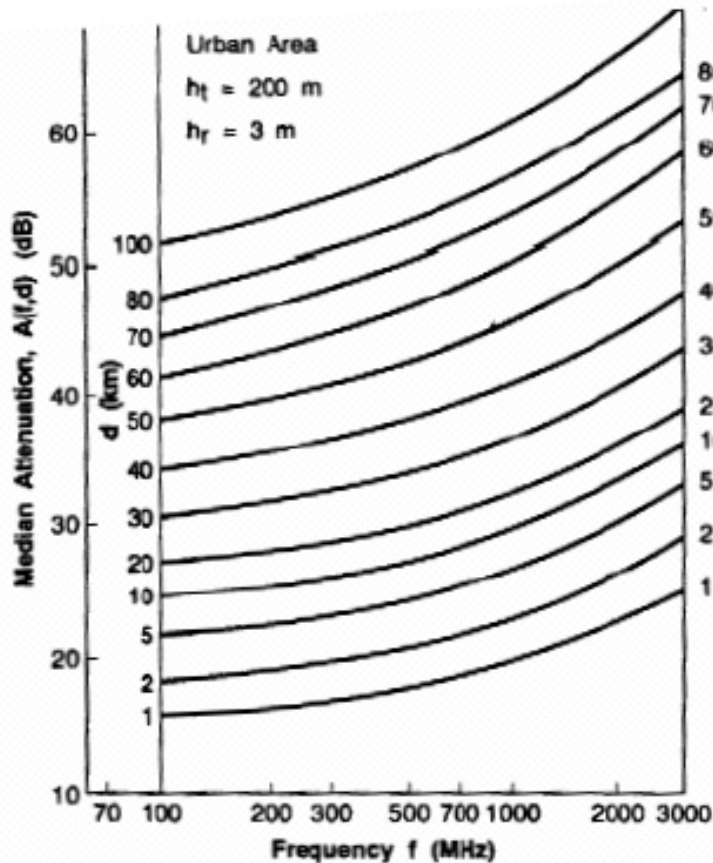
L_F = Path-Loss dovuto allo spazio libero

$A_{mn}(f,d)$ = Attenuazione media nel mezzo
relativa allo spazio libero (f = freq; d = dist.)

$G(h_{te})$ e $G(h_{re})$ = Guadagni delle antenne trasmettenti e riceventi
(h_{te} e h_{re} = altezze dal suolo della stazione RB e del mobile)

G_{AREA} = Guadagno generato dall'ambiente in cui si opera

Modello di Okumura : curve sperimentali



I valori di A_{mn} e G_{AREA} si ricavano da curve sperimentali del tipo di quelle sopra riportate.

Analogamente, $G(h_{te})$ e $G(h_{re})$ sono graficati. $G(h_{te})$ varia come 20 dB/decade, mentre $G(h_{re})$ (per $h_{re} < 3$ m) varia come 10 dB per decade

Modello di Okumura: fattori di correzione

- Al modello di Okumura si possono aggiungere diversi fattori di correzione, in particolare per il profilo del terreno.
- Sono stati sviluppati in modo grafico, correttivi per:
 - altezza ondulazione terreno,
 - altezza creste isolate,
 - pendenza media terreno,
 - terra mista mare

Modello di Hata

- Hata (1980) ha espresso in forma analitica le curve di Okumura, attraverso delle formulazioni empiriche, cercando di mantenere l'accuratezza del modello originale ma sviluppando formule il più possibili semplici.
- Il modello di Hata non ammette tutti i correttivi sviluppati per il modello di Okumura.
- Per distanze superiori ad 1 km, il modello di Hata si mantiene entro 1 dB dai valori di Okumura.
- Pertanto, il modello di Hata è adatto per studiare le macrocelle dei sistemi mobili ma non per sistemi di comunicazione personale (in cui la cella ha circa 1 km di diametro..)
- Il modello risulta valido per:
 - f : 150 - 1500 MHz;
 - h_b : 30 - 200 m;
 - R : 1 - 20 km

Modello di Hata - 1

- Partendo dalla formula di Friis, nell'ipotesi di antenna trasmittente e ricevente isotrope,

$$P_R [W] = SA_{eff} \eta$$



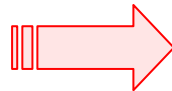
Per antenna trasmittente isotropa, potenza irradiata = EIRP

Per antenna ricevente isotropa $A_{eff} \eta = \lambda^2 / 4\pi$

$$P_R [W] = S \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

Ma:

$$S = \frac{|E|^2}{\zeta} [W / m^2]$$



$$P_R [W] = \frac{|E|^2}{\zeta} \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

Modello di Hata - 2

- Dalla definizione di Path Loss (PL):

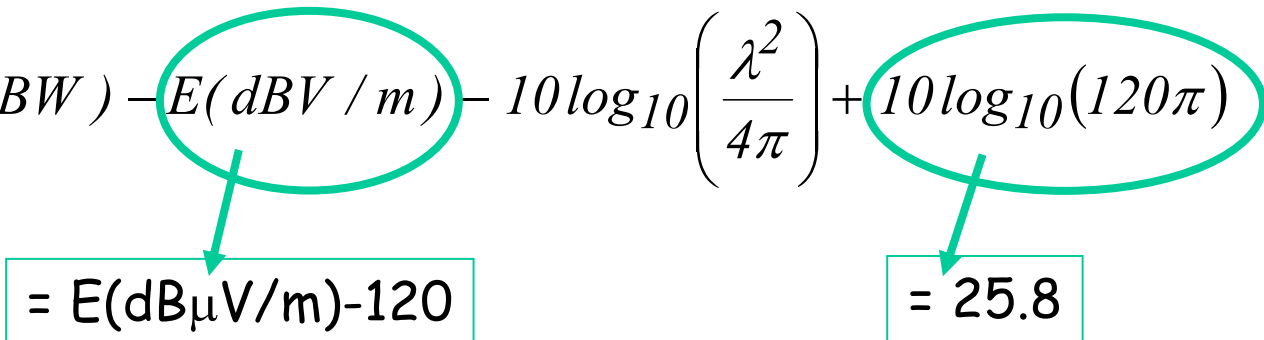
$$PL = \frac{\text{Potenza trasmessa}}{\text{Potenza ricevuta}} = \frac{EIRP}{P_R} = \frac{EIRP}{\frac{|E|^2 \lambda^2}{\zeta 4\pi}}$$

- con


$$\zeta = 120 \pi$$

- pertanto, in dB

$$PL(dB) = EIRP(dBW) - E(dBV/m) - 10 \log_{10} \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right) + 10 \log_{10}(120\pi)$$



$= E(dB\mu V/m) - 120$ $= 25.8$


$$PL(dB) = EIRP(dBW) - E(dB\mu V/m) - 10 \log_{10} \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right) + 145.8$$

Modello di Hata - 3

Poiché le curve sperimentali di Okumura forniscono il campo ricevuto per 1 kW ERP/dipolo, si ha:

- $EIRP = ERP/dipolo + 2.2(dB) \leftarrow$ guadagno dipolo (n.b., sarebbe 2.15...)
- $1 \text{ kW} = 30 \text{ dBW}$

e quindi,

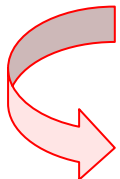
$$PL(dB) = 178 - E(dB\mu V / m) - 10 \log_{10} \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right)$$

In base alle curve di Okumura, Hata ha fatto la seguente assunzione:

$$E(dB\mu V / m) = \gamma + \beta \log_{10} R_k \quad \text{con } R_k \text{ in km}$$

per cui si ottiene:

$$PL(dB) = 178 - \gamma - 10 \log_{10} \left(\frac{\lambda^2}{4\pi} \right) - \beta \log_{10} R_k$$



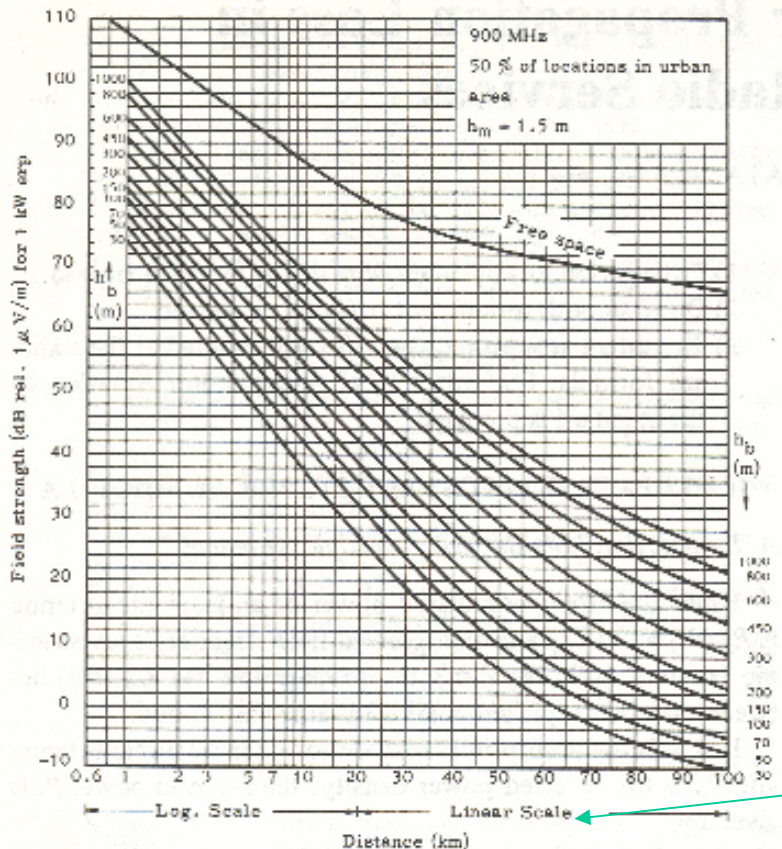
$$PL(dB) = A + B \log_{10} R_k$$

Modello di Hata - 4

$$PL(dB) = A + B \log_{10} R_k$$

A corrisponde al valore del campo per $R = 1$ km, mentre B è dato dalla pendenza della curva di campo.

I valori di γ e β e quindi di A e B sono valutati a partire dalle curve di Okumura che si presentano come in figura.



Al variare della frequenza, Hata ha ottenuto delle tabelle per A e B, a partire dalle quali, interpolando i dati, ha ricavato delle semplici formule analitiche

h_m = altezza del mobile = 1.5 m

h_b = altezza antenna stazione radio base variabile tra 30 e 1000 m

R_k = distanza

Modello di Hata - 5

Per il parametro A , Hata ha trovato la seguente relazione:

$$A = 69.55 + 26.16 \log_{10} f_M - 13.82 \log_{10} h_b$$

(il PL cresce con la frequenza e si riduce al crescere dell'altezza dell'antenna della stazione radio base)

Per il parametro B ,

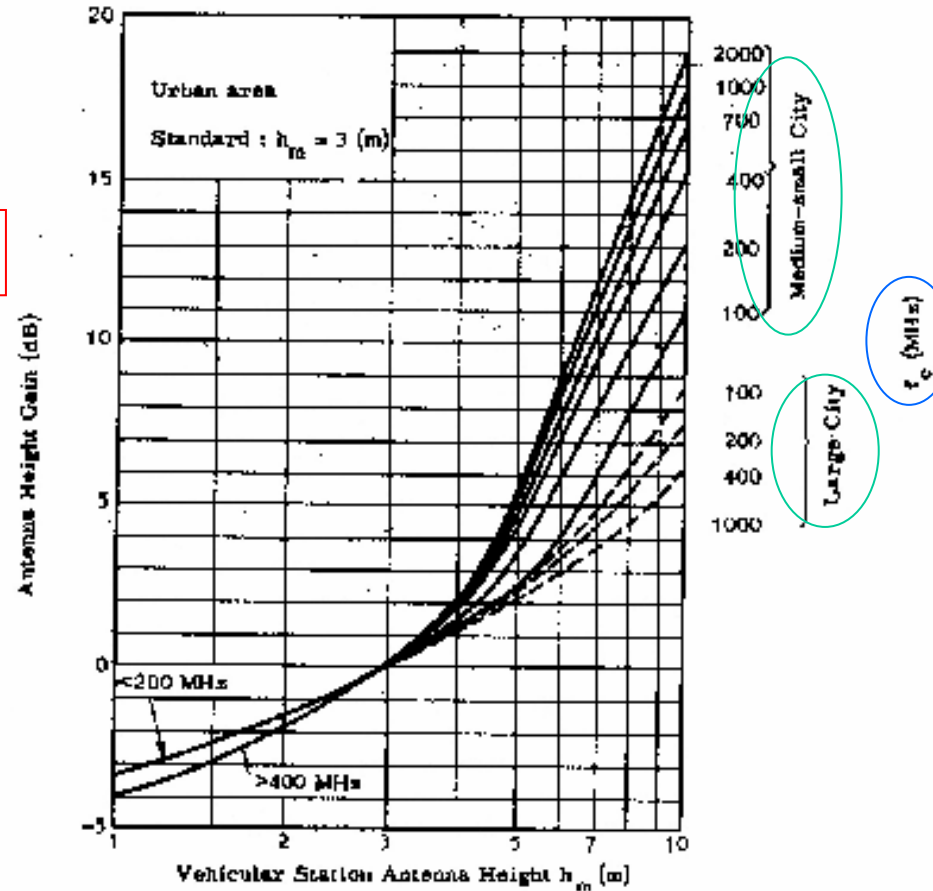
$$B = 44.9 - 6.55 \log_{10} h_b$$

(la pendenza del PL in funzione di R non dipende dalla frequenza)

Modello di Hata - 6

- Le curve derivate da Okumura a cui si fa riferimento hanno $h_m = 1.5$ m.
- Per tener conto delle variazioni di PL con h_m , Hata ha introdotto un ulteriore parametro $a(h_m)$ tale che $a = 0$ dB quando $h_m = 1.5$ m.
- Al variare di h_m , "a" varia con una legge che ha andamenti diversi, soprattutto per alti valori di h_m , se si considera una grande città o una città medio-piccola.
- In particolare, per $h_m > 3$ m si ottengono "a" più grandi, e quindi PL minori, nelle città medio-piccole, mentre per $h_m < 3$ m non c'è differenza.
- Inoltre, nelle città medio-piccole "a" aumenta con la frequenza mentre nelle città grandi decresce con f.

a



h_m

Modello di Hata - 7

Gli andamenti di a con la frequenza e l'altezza dell'antenna mobile sono stati interpolati da Hata ottenendo,

- per città medio-piccole:

$$a(h_m) = (1.1 \cdot \log_{10} f_M - 0.7) \cdot h_m - (1.56 \log_{10} f_M - 0.8)$$

con h_m : 1 - 10 m,
e f_M : 150 - 1500 MHz.

- per città grandi:

$$a(h_m) = 8.29(\log_{10} 1.54h_m)^2 - 1.10 \text{ (dB)} \quad \text{per } f_M \leq 200 \text{ MHz}$$

$$a(h_m) = 3.2(\log_{10} 11.75h_m)^2 - 4.97 \text{ (dB)} \quad \text{per } f_M \geq 400 \text{ MHz}$$

Modello di Hata - 8


$$PL(dB) = A + B \log_{10} R_k$$

$$A = 69.55 + 26.16 \log_{10} f_M - 13.82 \log_{10} h_b$$

$$B = 44.9 - 6.55 \log_{10} h_b$$

$$a(h_m)$$

- In conclusione, il PL secondo il modello di Hata è dato da:

$$PL = 69.55 + 26.16 \log_{10} f_M - 13.82 \log_{10} h_b - a(h_m) \\ + (44.9 - 6.55 \log_{10} h_b) \log_{10} R_k$$

Tale modello di base ha poi dei parametri correttivi per aree suburbane o rurali. Di nuovo, questi fattori di correzione, grafici nel modello di Okumura, sono stati espressi da Hata in forma analitica

Modello di Hata - 9

In aree suburbane:

$$PL_S = PL - K_R(dB)$$

$$K_R(dB) = 2 \left\{ \log_{10} \left(\frac{f_M}{28} \right) \right\}^2 + 5.4$$

In aree aperte (rurali):

$$PL_O = PL - Q_R(dB)$$

$$Q_R(dB) = 4.78 \{ \log_{10} f_M \}^2 - 18.33 \log_{10} f_M + 40.94$$

f_M = frequenza in MHz

Modello di Walfish Bertoni - 1

- Il modello di Walfish Bertoni (1988) predice il valore del segnale medio a livello della strada come prodotto di tre termini:

$$S = P_0 Q^2 P_1$$

PL spazio libero
per radiatori
isotropi = $(\lambda/4\pi R)^2$

riduzione del segnale per la
presenza di tetti fino alla riga
di edifici che "oscura" la
strada in esame

riduzione del segnale per
l'ultimo tratto, da tetto a
livello strada

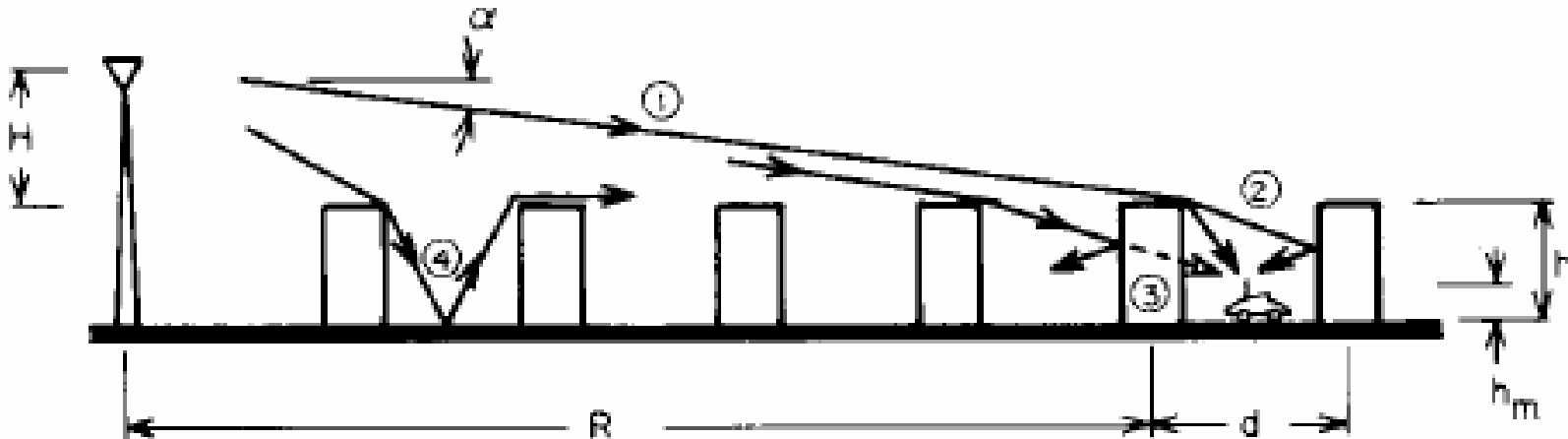


Fig. 1. Various ray paths for UHF propagation in presence of buildings.

Modello di Walfish Bertoni - 2

- Per l'attenuazione in spazio libero (antenne isotrope):

$$P_R = P_T \frac{\lambda^2}{4\pi R^2} \quad \Rightarrow$$

$$PL = \frac{P_T}{P_R} = \frac{(4\pi R)^2}{\lambda^2} = \left(\frac{4\pi}{c} f R \right)^2 = \left(\frac{4\pi}{3 \cdot 10^8} f_M \cdot 10^6 R_k \cdot 10^3 \right)^2$$

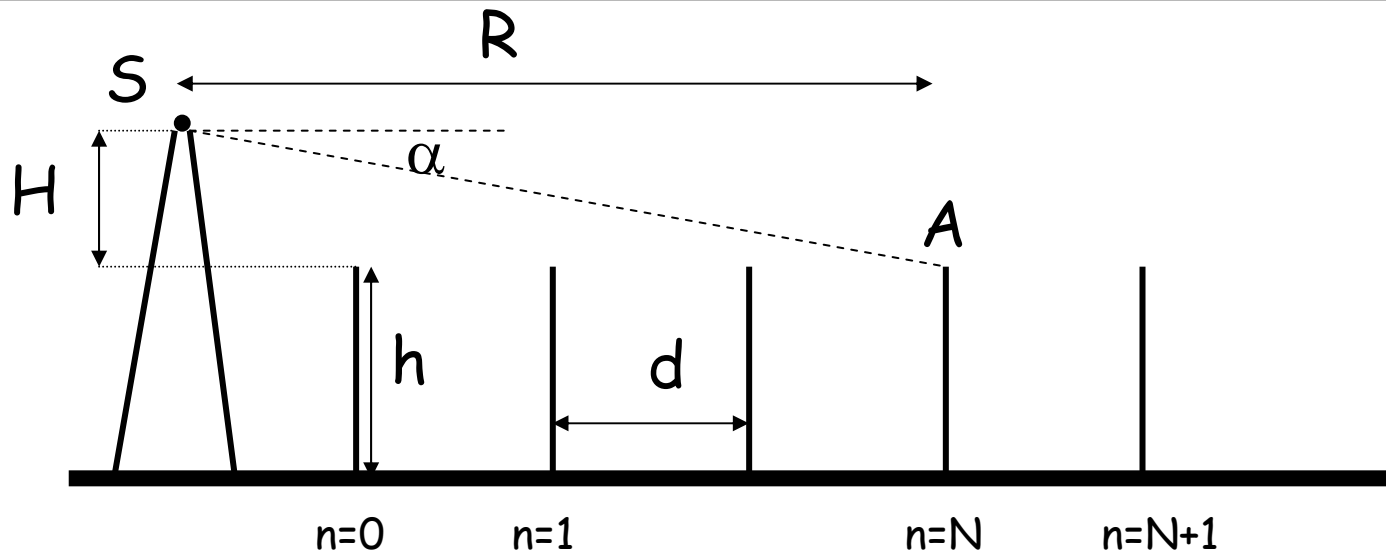
- in dB:

$$P_0 = PL(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{3} 10 \right)^2 + 10 \log_{10} (f_M)^2 + 10 \log_{10} (R_k)^2$$

$$P_0 = PL(dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{3} 10 \right) + 20 \log_{10} f_M + 20 \log_{10} R_k$$

$$PL(dB) = 32.4 + 20 \log_{10} f_M + 20 \log_{10} R_k$$

Modello di Walfish Bertoni - 3



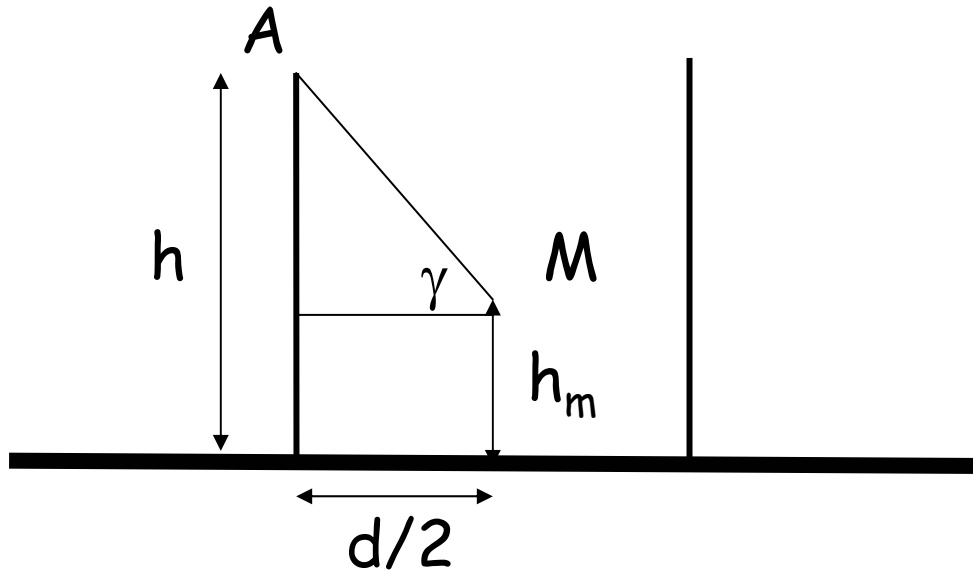
Il termine Q è valutato considerando un'onda piana incidente, con campo magnetico polarizzato lungo z (ortogonale al foglio), su una successione di piani semi-infiniti. Per un numero sufficientemente elevato di righe di edifici, il campo diffratto all' n -esima riga tende ad un valore costante che dipende solo dall'angolo α e dalla distanza delle righe d :

$$Q(\alpha) = \frac{E_A}{E_{1V/m}} \cong 0.1 \left[\frac{\alpha \sqrt{d/\lambda}}{0.03} \right]^{0.9}$$

ma α è circa $= H/R$, quindi per H fissato, Q varia come $1/R^{0.9}$, e il PL come $1/R^{1.8}$, in accordo con alcuni dati sperimentali.

Modello di Walfish Bertoni - 4

L'ultimo termine da valutare è P_1 che rappresenta l'attenuazione tra l'ultimo tetto e la posizione dell'antenna ricevente mobile.



$$\tan \gamma = \frac{(h - h_m)}{d/2}$$

Per valutare il campo in M (antenna mobile) dovuto al campo in A (ultimo tetto), la formula proposta è:

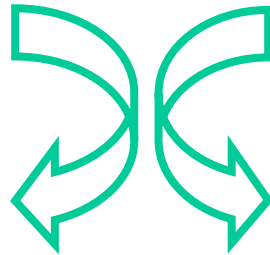
$$\sqrt{P_1} = \frac{E_M}{E_A} \cong \frac{\sqrt{\lambda}}{2\pi} \frac{1}{\left[\left(\frac{d}{2} \right)^2 + (h - h_m)^2 \right]^{1/4}} \left(\frac{1}{\gamma} \right)$$

Modello di Walfish Bertoni - 5

Mettendo insieme gli ultimi due termini:

$$Q(\alpha) = \frac{E_A}{E_{IV/m}} \cong 0.1 \left[\frac{\alpha \sqrt{d/\lambda}}{0.03} \right]^{0.9}$$

$$\alpha \approx H/R,$$



$$\sqrt{P_1} = \frac{E_M}{E_A} \cong \frac{\sqrt{\lambda}}{2\pi} \frac{l}{\left[\left(\frac{d}{2} \right)^2 + (h-h_m)^2 \right]^{1/4}} \left(\frac{l}{\gamma} \right)$$

$$\frac{E_A}{E_{IV/m}} \frac{E_M}{E_A} \cong (0.1) \left(\frac{l}{0.03} \right)^{0.9} \left(\frac{H}{R} \right)^{0.9} \left(\frac{d}{\lambda} \right)^{\frac{0.9}{2}} \left(\frac{l}{2\pi} \right) (\lambda)^{\frac{1}{2}} \left[\left(\frac{d}{2} \right)^2 + (h-h_m)^2 \right]^{-\frac{1}{4}} (\gamma)^{-1}$$

Modello di Walfish Bertoni - 6

$$\frac{E_A}{E_{IV/m}} \frac{E_M}{E_A} \cong (0.1) \left(\frac{1}{0.03}\right)^{0.9} \left(\frac{H}{R}\right)^{0.9} \left(\frac{d}{\lambda}\right)^{\frac{0.9}{2}} \left(\frac{1}{2\pi}\right) (\lambda)^{\frac{1}{2}} \left[\left(\frac{d}{2}\right)^2 + (h-h_m)^2 \right]^{-\frac{1}{4}} (\gamma)^{-1}$$

Passando ai dBV/m

0.1 → -20 dB

$$20 \log_{10}(R)^{-0.9} = -18 \log_{10}(R_k 10^3) = -18 \log_{10}(R_k) - 54$$

$$20 \log_{10}(H)^{0.9} = 18 \log_{10} H$$

$$20 \log_{10} \left(\frac{1}{0.03}\right)^{0.9} = 18 \log_{10} \left(\frac{1}{0.03}\right) = 27.4$$

$$20 \log_{10} (d)^{\frac{0.9}{2}} = 9 \log_{10} d$$

c'è un +3 dB perché notano che c'è anche un campo riflesso dalle pareti che si somma al raggio diretto dal tetto...

$$20 \log_{10} \left(\frac{1}{\lambda^2} \frac{-9}{\lambda^{20}} \right) = 20 \log_{10} \left[\frac{1}{\lambda^{20}} \right] = \log_{10} \lambda = \log_{10} (3 \cdot 10^8 f^{-1})$$

$$= \log_{10} \left(\frac{3 \cdot 10^8}{f_M 10^6} \right) = \log_{10} (3 \cdot 10^2) - \log_{10} (f_M) = 0.95 - \log_{10} (f_M)$$

Modello di Walfish Bertoni - 7

$$PL = PL_0 + L_{ex1} + L_{ex2} =$$

$$= 32.4 + 20 \log_{10} f_M + 20 \log_{10} R_k +$$

$$+ 57.1 + \log_{10} f_M + 18 \log_{10} R_k - 18 \log_{10} H +$$

$$+ 5 \log_{10} \left[\left(\frac{d}{2} \right)^2 + (h - h_m)^2 \right] - 9 \log_{10} d + 20 \log_{10} \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{2(h - h_m)}{d} \right] \right\}$$

→ PL_0 = path-loss in spazio libero per antenne isotrope

L_{ex} = path-loss in eccesso = $L_{ex1} + L_{ex2}$

→ L_{ex2} = path loss in eccesso legato alla geometria degli edifici

Il segnale ricevuto all'antenna si trova sottraendo PL alla potenza irradiata sommata ai guadagni delle antenne in dB

Modello di Ikegami - 1

Modello per la propagazione del segnale dal tetto di un edificio all'antenna mobile a livello di strada. E' basato su 2 raggi (gli altri contributi sono trascurabili...)

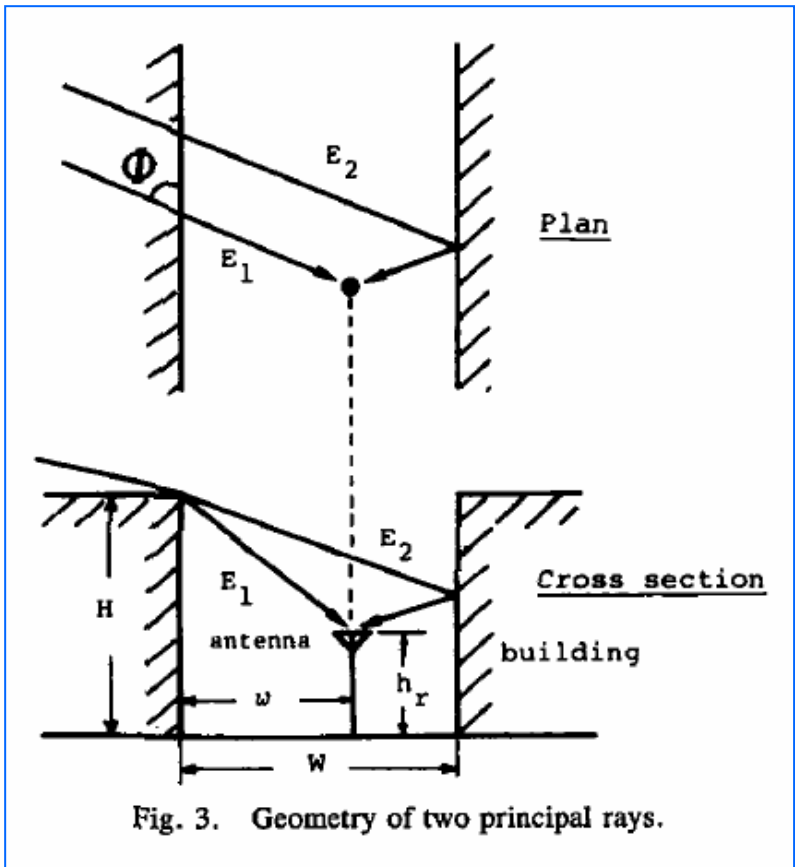


Fig. 3. Geometry of two principal rays.

Vista dall'alto

è quindi previsto anche un angolo di arrivo del campo (non trasmettitore e ricevitore in linea come in Bertoni)

Vista laterale

sono evidenziati i due raggi (E_1 diretto, E_2 riflesso). Entrambi derivano da un campo diffratto da lamina, espresso come:

$$E \doteq 0.225 \frac{E_0}{v}$$

$$v = h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} \text{sen} \phi$$

← v parametro di Fresnel (quello scritto per diffrazione da knife-edge sviluppato per "incidenza radente...") con in più angolo tra raggio e spigolo

Modello di Ikegami - 2

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

per $d \gg w$ (distanza trasmettitore \gg larghezza strada)

$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda w}}$$

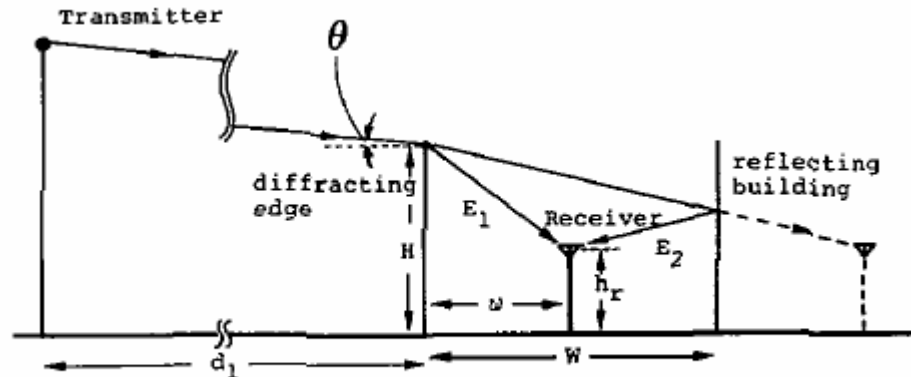


Fig. 16. Transformed path profile.

- I due raggi risultano allora espressi da:

$$E_1 = 0.225 \frac{E_0}{v_1} \quad v_1 = \sqrt{2}(H - h_r) \sqrt{\frac{\sin \phi}{\lambda w}}$$

$$E_2 = 0.225 \frac{E_0}{v_2 L_r} \quad v_2 = \sqrt{2}(H - h_r) \sqrt{\frac{\sin \phi}{\lambda(2W - w)}}$$

$$E_1 = \frac{0.225}{\sqrt{2}} E_0 \frac{\sqrt{\lambda w}}{(H - h_r) \sqrt{\sin \phi}}; \quad E_2 = \frac{0.225}{\sqrt{2}} E_0 \frac{\sqrt{\lambda(2W - w)}}{L_r (H - h_r) \sqrt{\sin \phi}}$$

coefficiente riflessione parete

Modello di Ikegami - 3

- Il campo risultante:

$$\bar{E} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} = \frac{0.225}{\sqrt{2}} E_0 \frac{\sqrt{\lambda \left(w + \frac{2W - w}{L_r^2} \right)}}{(H - h_r) \sqrt{\sin \phi}}$$

- da misure effettuate si nota come il campo sia sostanzialmente costante lungo tutta la larghezza della strada. Allora ($w=W/2$)

$$\bar{E} = \frac{0.225}{2} \sqrt{1 + \frac{3}{L_r^2}} E_0 \frac{\sqrt{\lambda W}}{(H - h_r) \sqrt{\sin \phi}}$$

- e in dB:

$$\bar{E}_{dB} = E_{0dB} + 5.8 + 10 \log \left(1 + \frac{3}{L_r^2} \right) + 10 \log W +$$
$$- 20 \log (H - h_r) - 10 \log \sin \phi - 10 \log f_{MHz}$$

W, H, h_r in metri
 f in MHz

Modello Walfish Ikegami (COST 231) - 1

- COST 231 ha proposto una combinazione dei modelli di Walfisch e Ikegami,
- con una formulazione chiamata COST-Walfisch-Ikegami-Model (COST-WI).
- Il modello permette una valutazione del PL utilizzando maggiori dati, rispetto ad altri modelli, per descrivere il carattere dell'ambiente urbano, in particolare:
 - altezza edifici h_{Roof} ,
 - larghezza strade w ,
 - separazione tra edifici b e
 - orientazione strade rispetto al cammino diretto.
- Il modello è ancora di tipo statistico in quanto si possono inserire solo valori tipici e non dati topografici degli edifici.

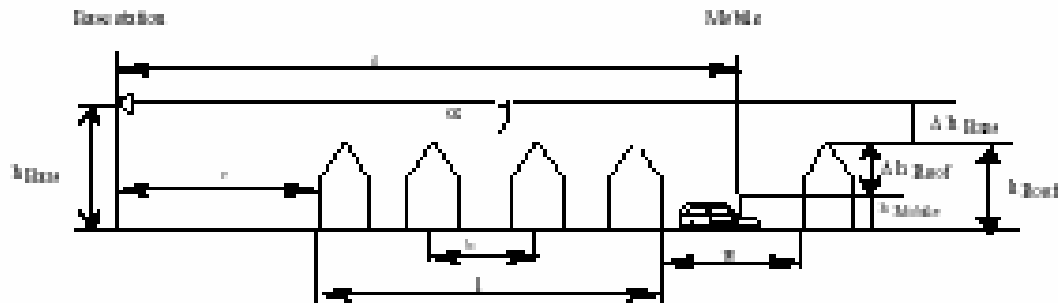


Fig 4.4.1 Typical propagation situation in urban areas and definition of the parameters used in the COST-WI model and other Walfisch-type models [24], [45], [52].

Modello Walfish Ikegami (COST 231) - 2

Il modello distingue tra situazione LOS (propagazione in una strada vista come un canyon) e NON LOS:

LOS

$$L_b \text{ (dB)} = 42.6 + 26 \log(d/\text{km}) + 20 \log(f/\text{MHz}) \quad \text{for } d \geq 20 \text{ m}$$

NLOS

$$L_b = \begin{cases} L_0 + L_{rts} + L_{msd} & \text{for } L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_0 & \text{for } L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases}$$

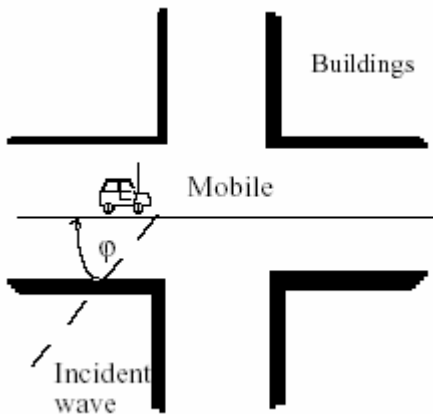
Con L_0 attenuazione per lo spazio libero:

$$L_0 \text{ (dB)} = 32.4 + 20 \log(d/\text{km}) + 20 \log(f/\text{MHz})$$

Modello Walfish Ikegami (COST 231) - 3

Il termine L_{rts} descrive l'accoppiamento dell'onda che si propaga dal cammino a più schermi verso la strada dove è collocata l'antenna mobile. È fondamentalmente basato sul modello di Ikegami, tenendo in conto la larghezza della strada e la sua direzione. COST 231, tuttavia, ha usato una funzione diversa per descrivere la direzione della strada rispetto al lavoro di Ikegami:

$$L_{rts} = -16.9 - 10 \log \frac{w}{m} + 10 \log \frac{f}{\text{MHz}} + 20 \log \frac{\Delta h_{\text{Mobile}}}{m} + L_{\text{Ori}}$$



$$L_{\text{Ori}} = \begin{cases} -10 + 0.354 \frac{\varphi}{\text{deg}} & \text{for } 0^\circ \leq \varphi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075 \left(\frac{\varphi}{\text{deg}} - 35 \right) & \text{for } 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4.0 - 0.114 \left(\frac{\varphi}{\text{deg}} - 55 \right) & \text{for } 55^\circ \leq \varphi < 90^\circ \end{cases}$$

$$\Delta h_{\text{Mobile}} = h_{\text{Roof}} - h_{\text{Mobile}}$$

$$\Delta h_{\text{Base}} = h_{\text{Base}} - h_{\text{Roof}}$$

Modello Walfish Ikegami (COST 231) - 4

L_{msd} è il termine legato alla diffrazione tra più schermi. Il termine ottenuto da Walfisch e Bertoni è una soluzione approssimata della diffrazione nel caso in cui l'antenna della stazione radio base è posta sopra il livello dei tetti. Il modello proposto dal COST231 estende la soluzione anche al caso di antenna posta sotto il livello dei tetti utilizzando una funzione empirica basata su misure.

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log \frac{d}{\text{km}} + k_f \log \frac{f}{\text{MHz}} - 9 \log \frac{b}{m}$$

where

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log(1 + \frac{\Delta h_{Base}}{m}) & \text{for } h_{Base} > h_{Roof} \\ 0 & \text{for } h_{Base} \leq h_{Roof} \end{cases}$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & \text{for } h_{Base} > h_{Roof} \\ 54 - 0.8 \frac{\Delta h_{Base}}{m} & \text{for } d \geq 0.5 \text{ km and } h_{Base} \leq h_{Roof} \\ 54 - 0.8 \frac{\Delta h_{Base}}{m} \frac{d / \text{km}}{0.5} & \text{for } d < 0.5 \text{ km and } h_{Base} \leq h_{Roof} \end{cases}$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{for } h_{Base} > h_{Roof} \\ 18 - 15 \frac{\Delta h_{base}}{h_{roof}} & \text{for } h_{Base} \leq h_{Roof} \end{cases}$$

$$k_f = -4 + \begin{cases} 0.7 \left(\frac{f / \text{MHz}}{925} - 1 \right) & \text{for medium sized city and suburban} \\ & \text{centres with medium tree density} \\ 1.5 \left(\frac{f / \text{MHz}}{925} - 1 \right) & \text{for metropolitan centres} \end{cases}$$

Modello Walfish Ikegami (COST 231) - 5

Il modello COST-WI model è valido per:

- f : 800 ... 2000 MHz
- h_{Base} : 4 ... 50 m
- h_{Mobile} : 1 ... 3 m
- d : 0.02 ... 5 km

- Il modello è stato accettato dall' ITU-R (International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector).
- La stima fornita per il PL è in buon accordo con le misure per stazioni radio-base sopra il livello dei tetti.
- L'errore medio è entro +3 dB e la deviazione standard 4-8 dB.
- Tuttavia, l'errore diviene grande se $h_{\text{Base}} \cong h_{\text{Roof}}$ rispetto ai casi in cui $h_{\text{Base}} \gg h_{\text{Roof}}$. Inoltre, le prestazioni diminuiscono quando $h_{\text{Base}} \ll h_{\text{Roof}}$.

Confronto modelli

TABLE 8.4
Comparison of models for path loss

| Model Name | Suitable Environment | Complexity | Experimental Data | Details of Environment Request | Accuracy | Time | Other |
|---------------|-------------------------------------|------------|----------------------|--------------------------------|-----------|-----------|---|
| Okumura model | Macrocell | Simple | Based on experiments | No | Good | Little | Graphical path loss data |
| Hata model | Macrocell (early cellular) | Simple | No | No | Good | Little | |
| Cost-231 | Microcell (outdoor) | Simple | No | No | Good | Little | |
| Dual-slope | Microcell and picocell (LOS region) | Simple | No | No | Good | Little | |
| Ray-tracing | Outdoor and indoor | Complex | No | Yes | Very good | Very much | |
| FDTD | Indoor (small) | Complex | No | Every detail | Best | Very much | Often combined with ray-tracing |
| MOM | Indoor (small) | Complex | No | Every detail | Best | Very much | |
| ANN | Outdoor and indoor | Complex | Yes | Detail | Very good | Little | Take time to learn from experimental data |