Caratteristiche della propagazione urbana

Per descrivere la propagazione in ambiente urbano sono possibili dei modelli più o meno analitici, ma la maggior parte delle conoscenze sul comportamento del campo in AU è stata ottenuta da una serie di campagne di misura cominciate negli anni ’50 in Giappone.

Si è misurato il campo trasmesso da un Tx fisso (ma trasportabile) e ricevuto da un ricevitore mobile.

La previsione di campo è molto variabile da un ambiente all’altro, ma anche molto variabile all’interno dello stesso ambiente.

E’ però possibile estrarre delle caratteristiche generali più o meno comuni su tutti i tipi di collegamento.

Il segnale ricevuto è caratterizzato da tre scale di variazione spaziale (fast fading, shadow fading e variazione con la distanza del tipo $1/r^n$), da variazioni temporali e da polarizzazione mista.

Caratteristiche della propagazione urbana

Se l'utente si sposta lungo una strada (p.es in auto), esso sarà coperto dagli edifici circostanti ed il segnale della RBS verrà ricevuto attraverso cammini multipli.

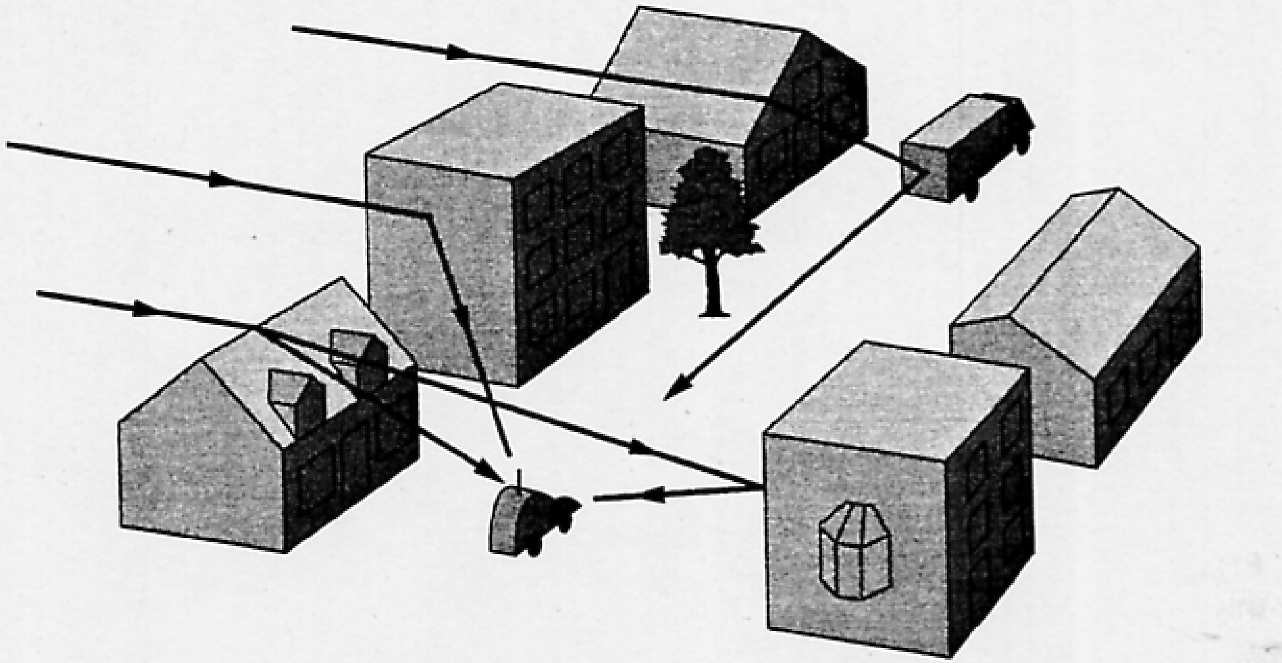


Figure 2-1 Scattering from objects in the vicinity of the mobile result in signals arriving at the subscriber from many directions.

Caratteristiche della propagazione urbana

Anche per spostamenti dell’ordine di alcune decine di cm (frazioni di lunghezza d’onda), il campo tende a variare in maniera consistente (anche di 20 dB tra un punto e l’altro).

Per spostamenti di qualche metro il segnale può variare anche di 30 dB.

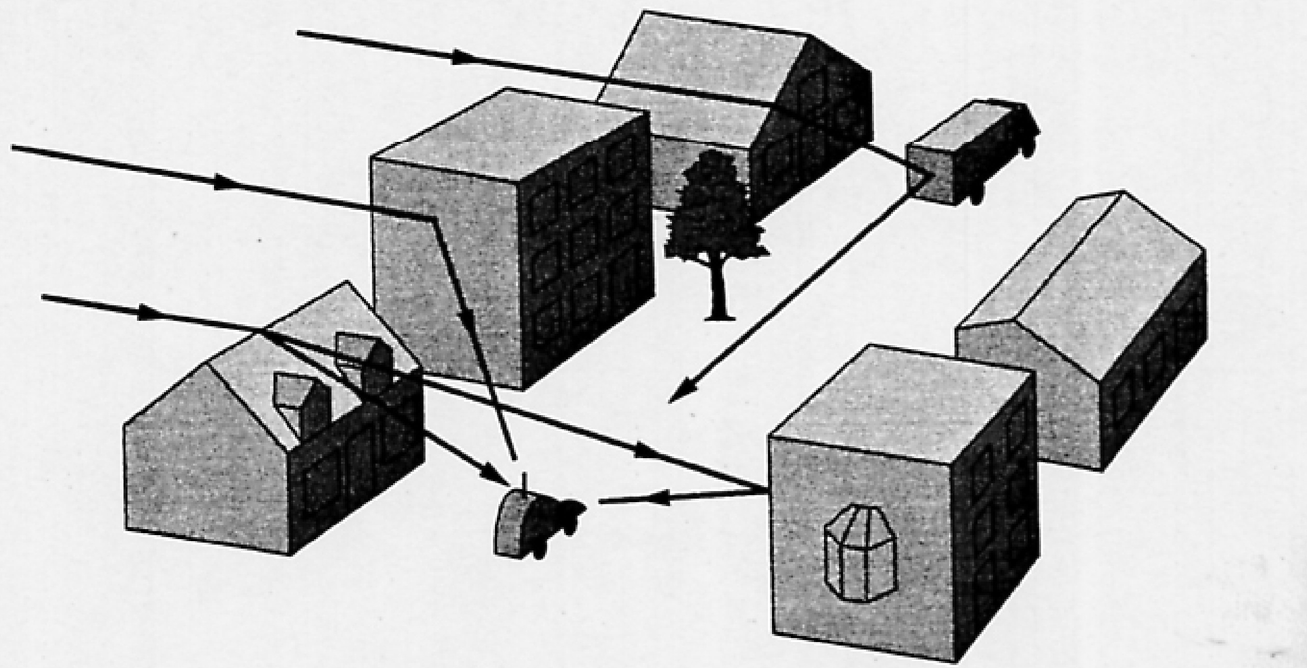


Figure 2-1 Scattering from objects in the vicinity of the mobile result in signals arriving at the subscriber from many directions.

Caratteristiche della propagazione urbana

Queste variazioni così rapide e così ampie sono dovute al fatto che il collegamento tra tx e rx, avviene in AU mediante più traiettorie/raggi (anche molte decine) dovuti a riflessioni, diffrazioni, scattering da edifici, veicoli, oggetti vicini al Rx.

I raggi hanno la caratteristica di avere (quando il ricevitore si sposta) ampiezza circa costante, ma fasi dipendenti dalla lunghezza del cammino (λ alle frequenze d'interesse è dell'ordine dei cm-m).

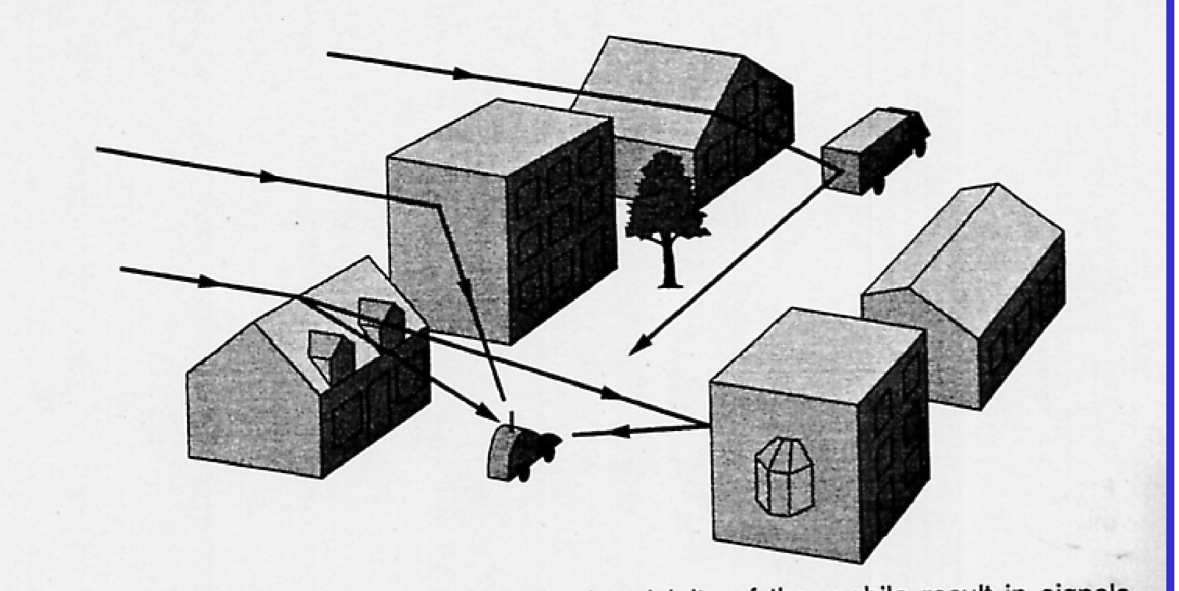


Figure 2-1 Scattering from objects in the vicinity of the mobile result in signals arriving at the subscriber from many directions.

Caratteristiche della propagazione urbana

Spostamenti pochi metri del Rx comportano una possibile variazione delle fasi dei raggi di un multiplo di 2π, che è diversa per ogni raggio.

Quando il Rx si sposta, ogni raggio percorre un cammino aggiuntivo pari alla costante di propagazione per lo spostamento per il coseno dell'angolo compreso tra direzione di spostamento e direzione di arrivo.

Dato un certo numero di raggi supposti in fase, dopo lo spostamento cambiano le fasi relative.

Il segnale complessivo ricevuto è dato dalla somma di più segnali che hanno fasi diverse, che produce una variazione rapida del campo (interferenza).

Questo fenomeno è noto come fast fading e può comportare variazioni fino a 15-20dB su scale molto piccole.

Caratteristiche della propagazione urbana

Il campo presenta anche una variazione ulteriore ma meno oscillante, dovuta al fatto che nel suo spostamento l'utente incontra edifici di altezze e dimensioni diverse, spazi vuoti, incroci stradali, ecc e questa differenza nelle dimensioni degli ostacoli incontrati modifica il valor medio delle fluttuazioni rapide (fast fading).

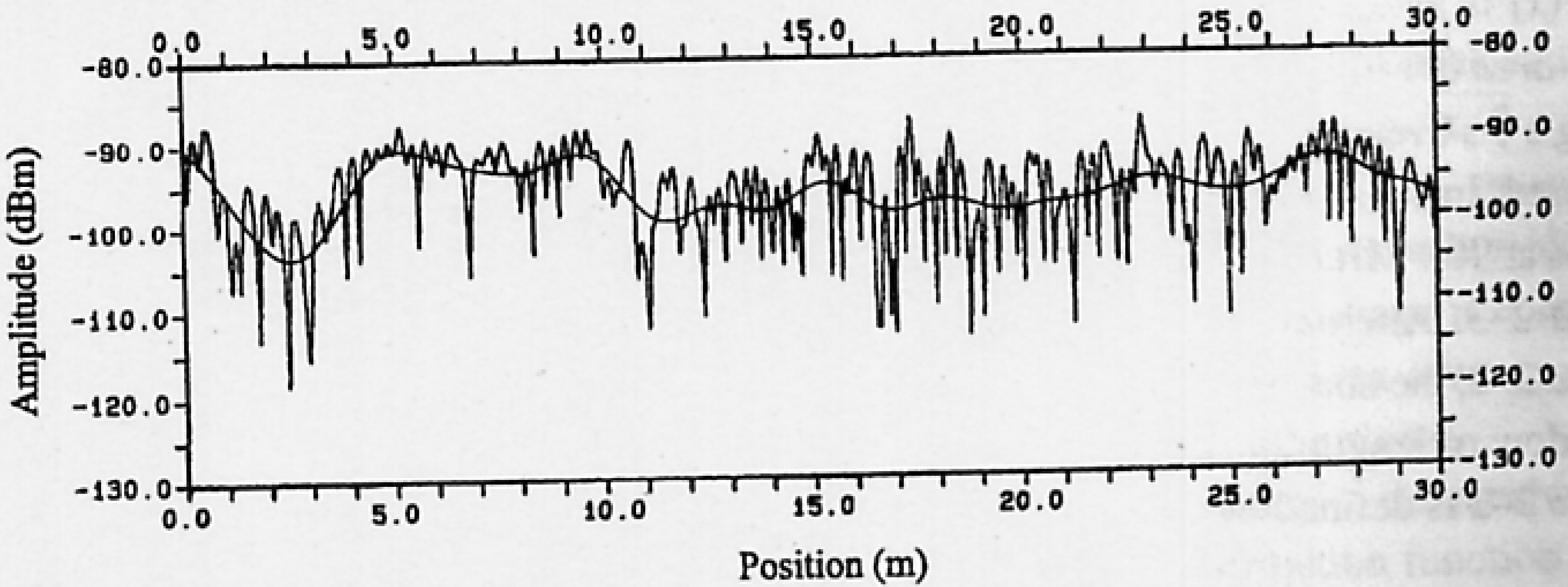


Figure 2-2 Narrowband (CW) signal variation in dBm measured along a street and the sliding average (shadow fading) as a function of position for non-LOS conditions [39] (©1988 IEEE).

Caratteristiche della propagazione urbana

Questa scala di variazione del segnale, che è dell’ordine delle dimensioni degli edifici, è chiamata shadow fading, o slow fading, o fading lognormale.

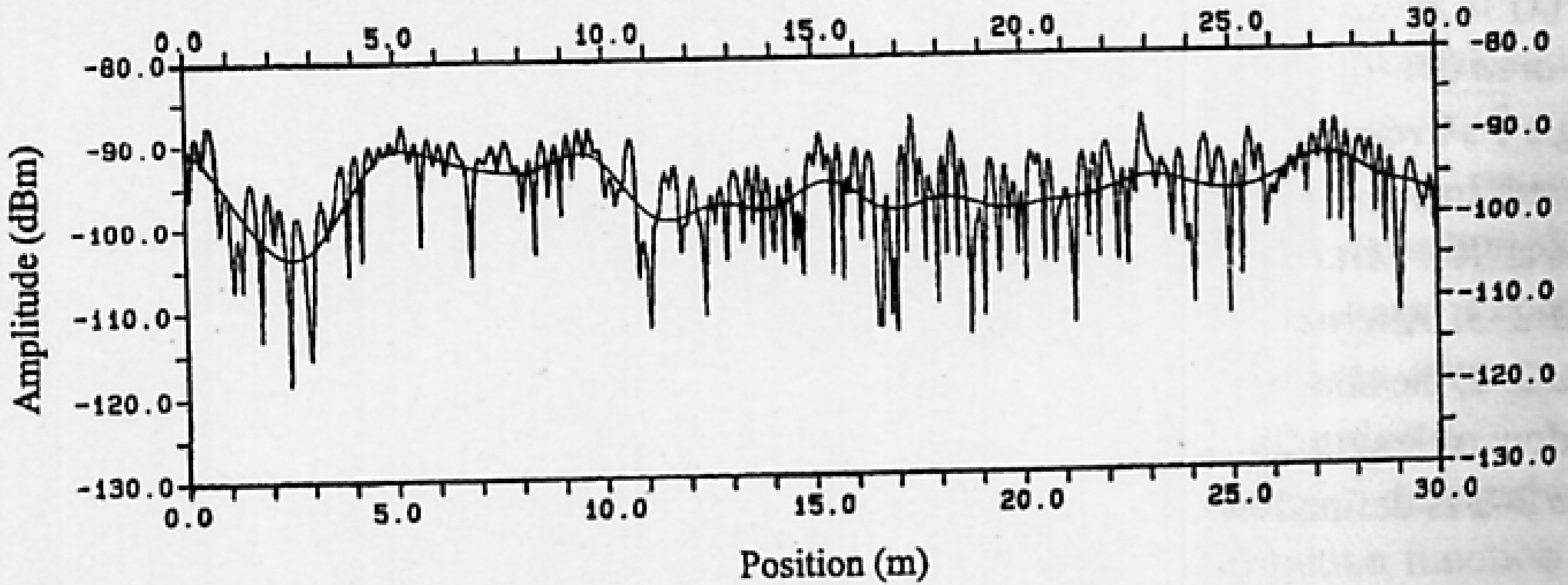


Figure 2-2 Narrowband (CW) signal variation in dBm measured along a street and the sliding average (shadow fading) as a function of position for non-LOS conditions [39] (©1988 IEEE).

Caratteristiche della propagazione urbana

Il valor medio complessivo del segnale decresce inoltre al crescere della distanza R dalla RBS secondo la legge R^n.

Il campo in AU si attenua con la distanza tramite una legge diversa da quella in spazio libero (1/r il campo, $1/r^2$ la potenza).

L'attenuazione è piu rapida: la potenza varia con una legge del tipo $1/r^n$, con n maggiore di 2 con 4 limite superiore (ad esempio su mare calmo).

Per separare il fast fading dallo shadow fading facciamo una media mobile del segnale ricevuto al variare della posizione V(x) su una finestra spaziale di larghezza 2W che tipicamente è dell'ordine di 10m.

In tal modo si smorzano le oscillazioni rapide del fast fading che hanno variano su una scala delle decine di cm.

Fast Fading

La media mobile è definita mediando il segnale su una finestra spaziale centrata nel punto x e vale:

$$\overline{V(x)} = \frac{1}{2W} \int_{-W}^{W} V(x+s)ds$$

Il segnale V(x) contiene sia il fast fading che lo shadow fading.

Il segnale normalizzato *V(x)/* $\overline{V(x)}$ contiene solamente il fast fading.

Calcolando il segnale medio si ottiene il fast fading, dato dal segnale misurato V(x) diviso il valor medio fatto con la media mobile.

Si eliminano le variazioni lente dal segnale:

$$Fast\ fading = \frac{V(x)}{\overline{V(x)}}$$

Fast Fading

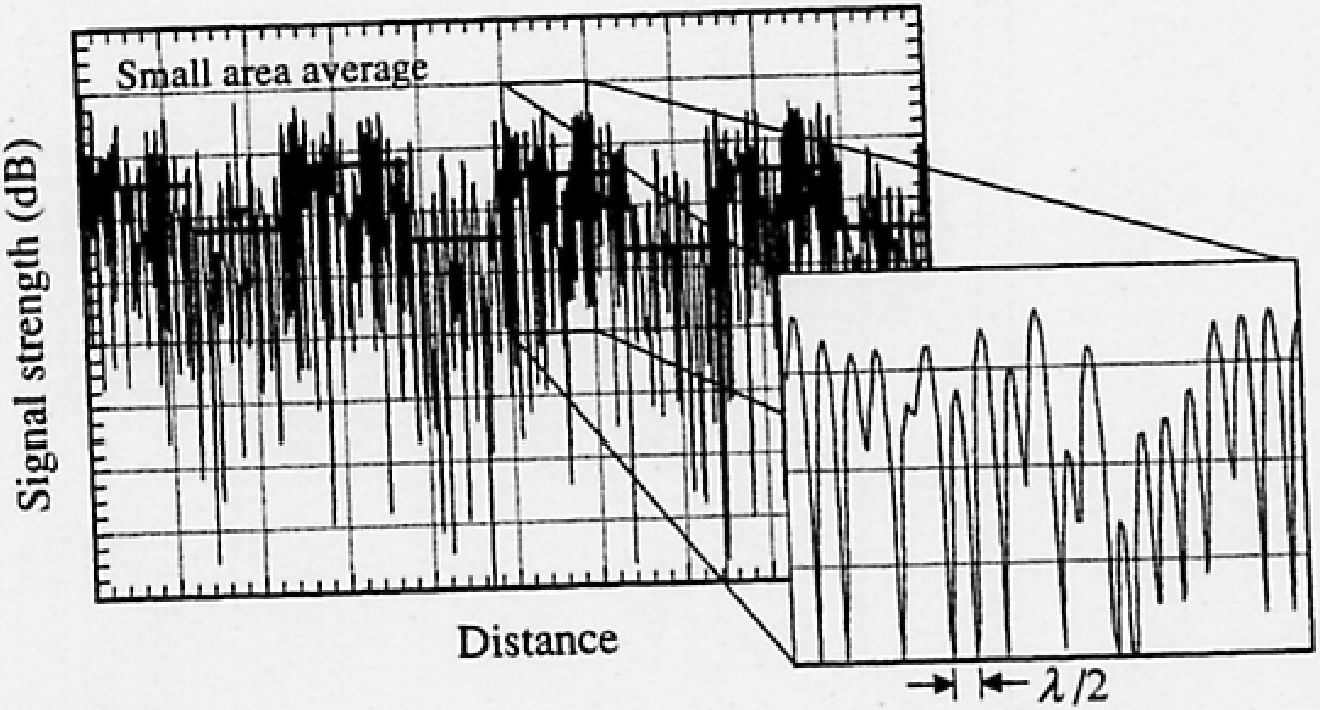


Figure 2-3 Small-area or sector averages obtained by averaging over discrete intervals.

Fast Fading

Il fast fading viene analizzato in termini di variabile aleatoria.

Dato che il fast fading ha un andamento molto irregolare, per predire le prestazioni del sistema è necessario caratterizzarlo mediante le sue proprietà statistiche.

Sia:

$$r_i = V(x_i) / \overline{V(x_i)}$$

il valore campionato della tensione normalizzata misurata al punto x_i.

Misurando un numero elevato di valori della tensione (qualche centinaio) al variare della posizione x_i si può costruire la funzione densità di probabilità (PDF) della variabile aleatoria r_i.

Fast Fading

Per posizioni del ricevitore circondate da edifici, la PDF che descrive il fast fading ha una distribuzione di Rayleigh (con *p(r)* definita solo per r $\geq$0):

$$p(r) = \frac{r}{\rho^2} e^{-\frac{r^2}{2\rho^2}}$$

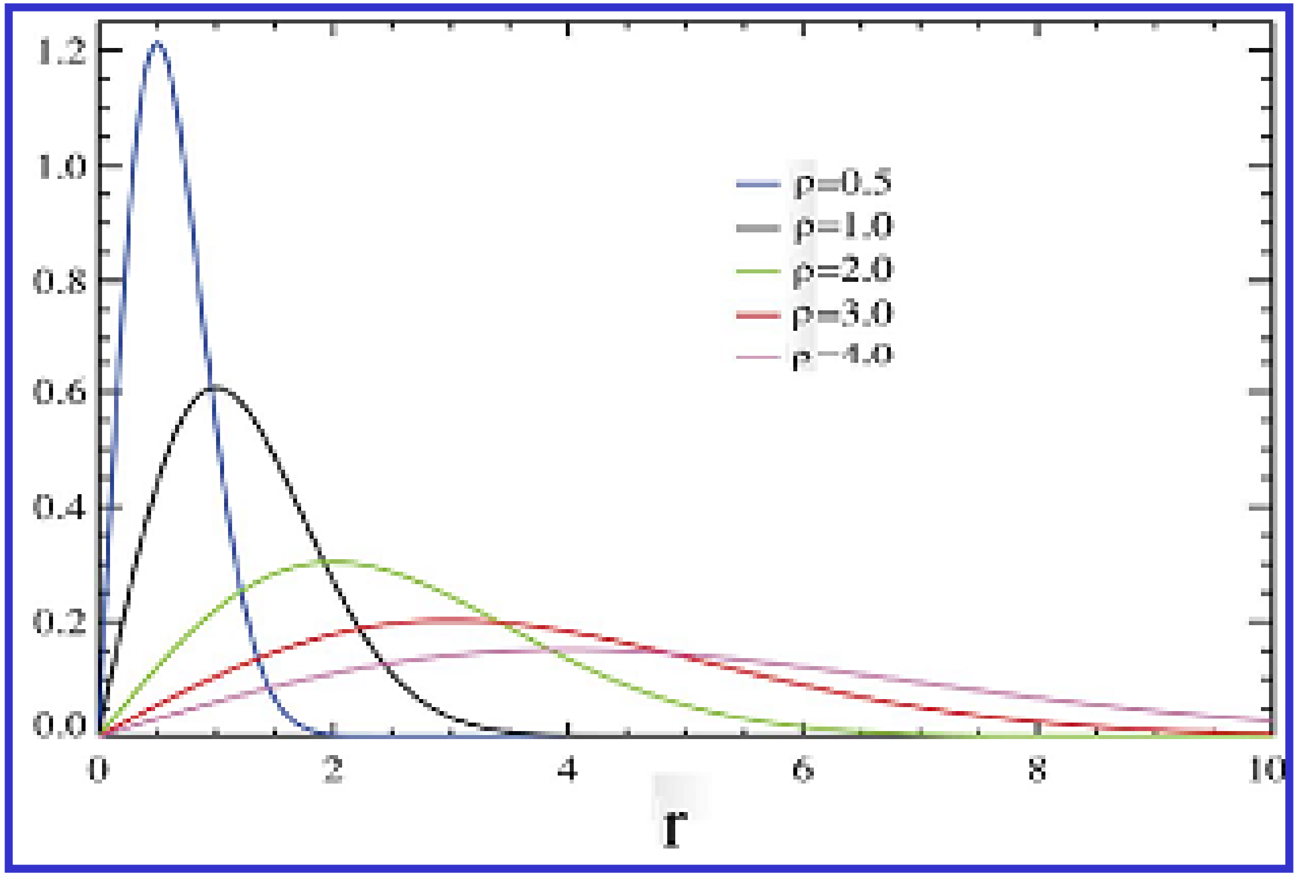
Il campo in ogni punto x (il ricevitore si sposta e il campo è campionato in tanti punti vicini) è la somma di tanti segnali (cammini multipli), ognuno con fase diversa dall’altra.

Si può supporre che ognuno di questi segnali abbia la stessa potenza, ma una fase aleatoria e che ogni segnale sia indipendente l’uno dall’altro.

Se si sommano tutti i segnali ricevuti, si stanno sommando tante variabili aleatorie tra loro indipendenti, ognuna delle quali contribuisce al risultato finale che è la tensione misurata al ricevitore.

Fast Fading

La distribuzione che rappresenta il segnale complessivamente ricevuto è gaussiana, ossia la parte reale e immaginaria del campo ricevuto sono, separatamente, variabili aleatorie gaussiane.



L’ampiezza del campo ricevuto (la radice quadrata della potenza) è allora una variabile aleatoria di tipo Raileygh.

Fast Fading

Nella pdf di Raileygh r è l'ampiezza del campo ricevuto, mentre ρ è l'unico parametro che caratterizza la distribuzione, a cui corrisponde il picco della distribuzione.

La media della variabile aleatoria r descritta dalla PDF di Rayleigh si dimostra valere:

$$< r >= \int_0^\infty r \cdot PDF(r) dr = \int_0^\infty r \cdot \frac{r}{\rho^2} e^{-\frac{r^2}{2\rho^2}} dr = \rho\sqrt{\frac{\pi}{2}} \cong 1.25\rho$$

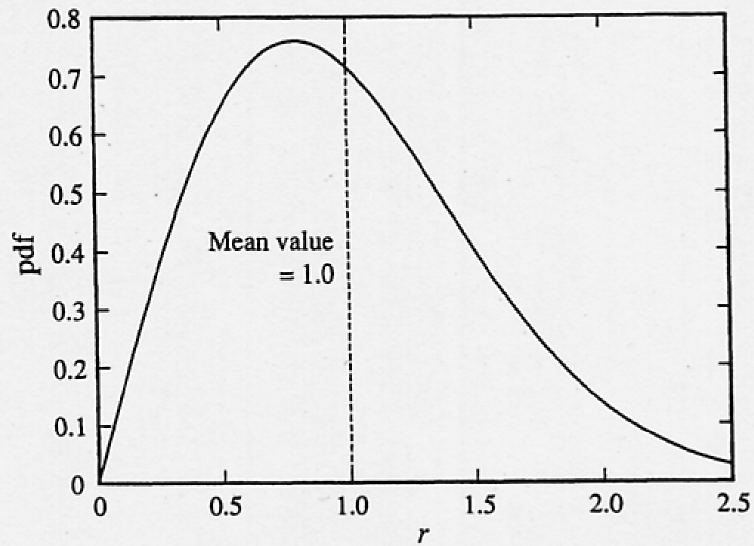


Figure 2-4 Probability distribution function $p(r)$ for a Rayleigh distribution having $\rho = \sqrt{2/\pi}$.

Fast Fading

La potenza associata al segnale è il valor medio di r^2 ed è pari a:

$$< r^2 >= \int_0^\infty r^2 \cdot PDF(r)dr = \int_0^\infty r^2 \cdot \frac{r}{\rho^2} e^{-\frac{r^2}{2\rho^2}} dr = 2\rho^2$$

Il parametro ρ della variabile di Raileygh è lo scarto quadratico medio di ciascuna delle due variabili gaussiane che rappresentato parte reale e parte immaginaria del segnale ricevuto, ciascuna con potenza ρ^2 (da cui il valore di potenza della variabile complessa V_r+jV_i pari a $2\rho^2$).

La varianza della variabile di Raileygh r è data da:

$$Var[r] = E[(r - E[r])^2] = E[r^2] - E[r]^2 = 2\rho^2 - \left(\rho\sqrt{\frac{\pi}{2}}\right)^2 = \frac{4-\pi}{2}\rho^2$$

Fast Fading

La conoscenza del solo valore ρ consente di calcolare tutti i parametri della distribuzione di Rayleigh.

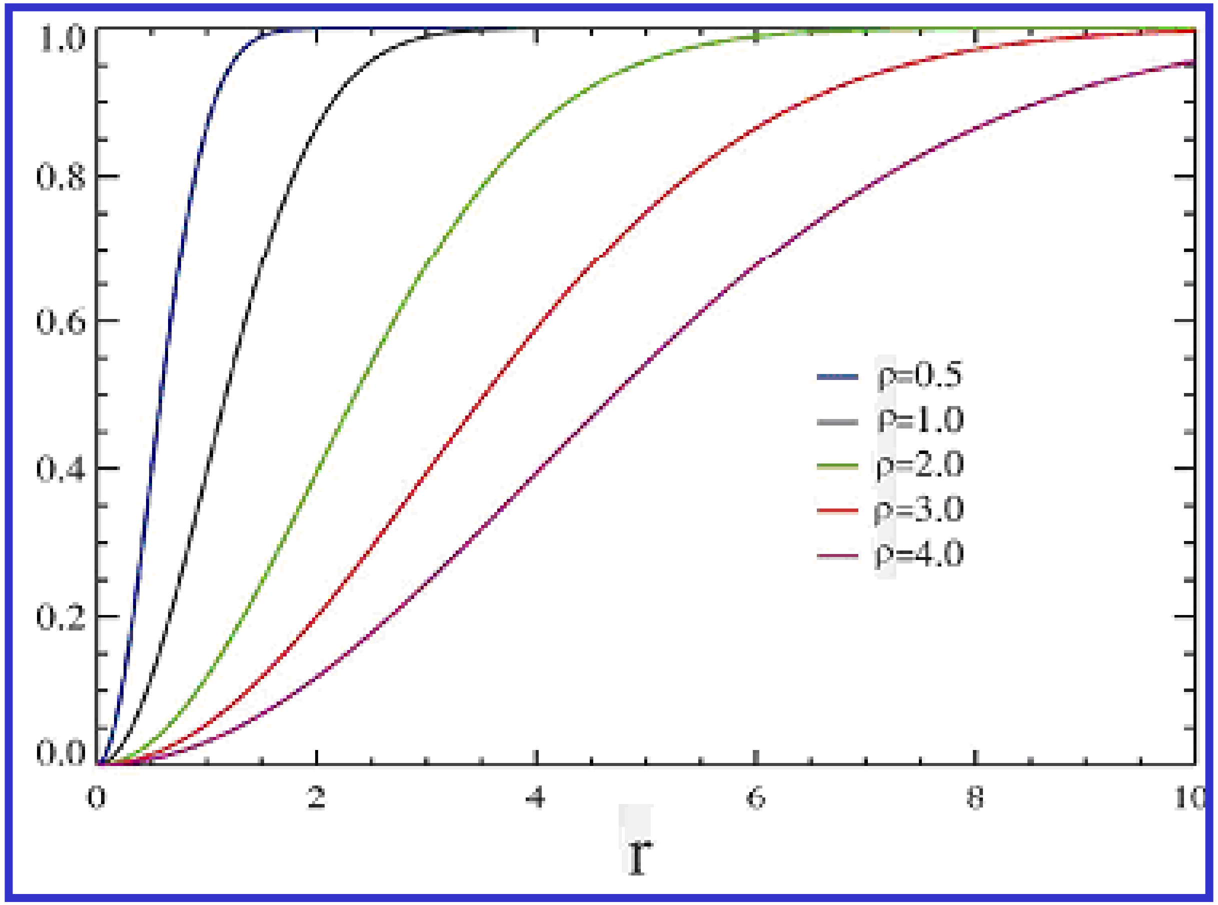
In patrticolare, è di fondamentale importanza per il progetto di una rete di copertura radiomobile stabilire la probabilità che una certa ampiezza di campo sia superata (lungo la traiettoria dello spostamento e quindi nel tempo).

Per determinare la probabilità che r (ampiezza del segnale ricevuto) sia maggiore di un certo valore accettabile r_{min} (che può ad esempio rappresentare la potenza minima di soglia per il terminale mobile), o per ricavare qual è il valore di r che viene superato con una certa probabilità, si utilizza la CDF (funzione cumulativa di distribuzione di probabilità), ossia l'integrale della PDF esteso ad un opportuno intervallo.

Fast Fading

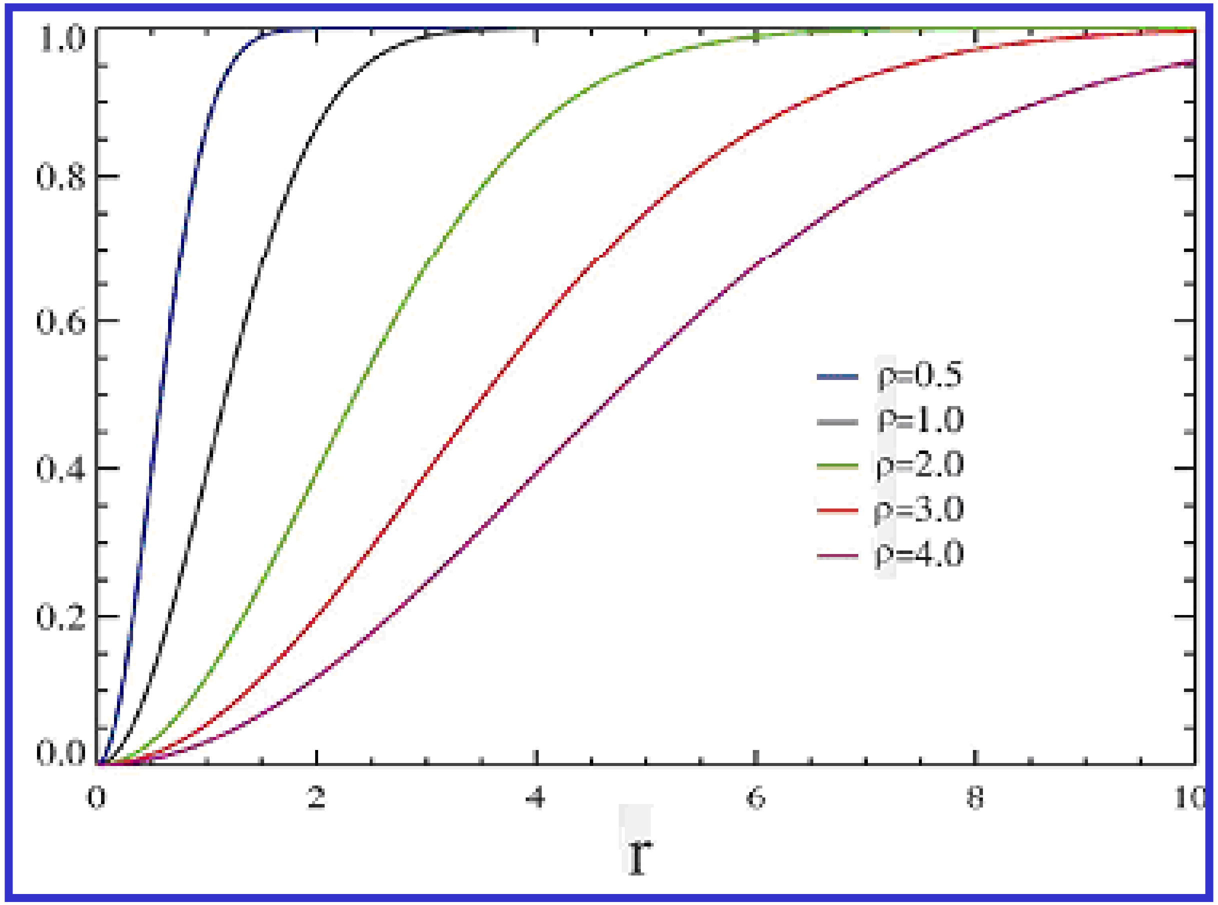
CDF(r_0) fornisce la probabilità che la variabile aleatoria r sia minore di r_0.

In termini di segnale ricevuto, rappresenta quindi la probabilità che il segnale che si riceve abbia una ampiezza minore di r_0.



Fast Fading

$$CDF(r_0) = p_r(r \le r_0) = \int_0^{r_0} PDF(r)dr = \int_0^{r_0} \frac{r}{\rho^2} e^{-\frac{r^2}{2\rho^2}} dr = 1 - e^{-\frac{r_0^2}{2\rho^2}}$$



Fast Fading

L’ampiezza del campo che è possibile ricevere, con probabilità diversa da zero, ha un valore che può teoricamente variare da zero a infinito.

Supponiamo di imporre la soglia ad un valore che corrisponde al valor medio meno un certo margine (per esempio 10 dB).

Se si riceve un valore di ampiezza superiore alla soglia prefissata (e quindi che è inferiore al valore medio di meno di 10 dB), il sistema continua a funzionare.

In fase di pianificazione è quindi importante determinare con quale probabilità si riceve una ampiezza che è pari alla soglia prefissata, e per quanto tempo si è sicuri di ricevere un segnale che è sopra la soglia.

Questa percentuale di tempo si può identificare come la probabilità con cui si riceve un segnale di ampiezza pari alla soglia.

Fast Fading

Nella pratica si passa quindi dalla probabilità al tempo, sostenendo che se un fenomeno ha una probabilità x di avvenire allora si verifica per l'x% del tempo.

Se si vuole ad esempio garantire di avere il collegamento per il 99% del tempo si dovrà determinare qual è il livello di probabilità pari ad 1% sulla CDF.

Il valore di r che sulla CDF corrisponde ad 1%, che possiamo chiamare r_{soglia}, indicherà allora che per il 99 % del tempo ci si può aspettare, statisticamente, di ricevere un segnale più grande di questo (a causa del solo fast fading) ed il sistema sarà dimensionato supponendo che il segnale ricevuto (o meglio la sua variazione dovuta al fast fading) sia almeno pari a r_{soglia}.

Fast Fading

Se si riceve di più si avrà una qualità migliore del servizio, ma in ogni caso si sta garantendo di ricevere almeno una ampiezza pari a r_{soglia}.

Se si riceve di meno, si potrebbe perdere il collegamento (il segnale minimo non supera la soglia) e si sta quindi sopravvalutando la ampiezza ricevuta, sapendo però che, statisticamente, questa pessima ricezione può avvenire solo per l' 1% del tempo.

Se si sta fermi, questo effetto non si percepisce, ma se il ricevitore è fermo, esso potrebbe essere posizionato, nel caso peggiore, in un punto di minimo della variazione del segnale, e □non si avrebbe collegamento.

Si deve quindi sempre prevedere un margine anche se si sta fermi: la soglia scelta per il collegamento dovrà garantirmi il collegamento anche nel caso peggiore (affidabilità del collegamento).

Fast Fading

Il fast fading è dovuto al fatto che, man mano che ci si sposta, al ricevitore arrivano molti raggi in numero approssimativamente sempre uguale, ma aventi fasi variabili in modo differente, con ampiezze simili e abbastanza piccole, ma con fasi variabili.

Può capitare anche che si riceva il raggio diretto, perché ci si può trovare in visibilità del trasmettitore (caso LOS).

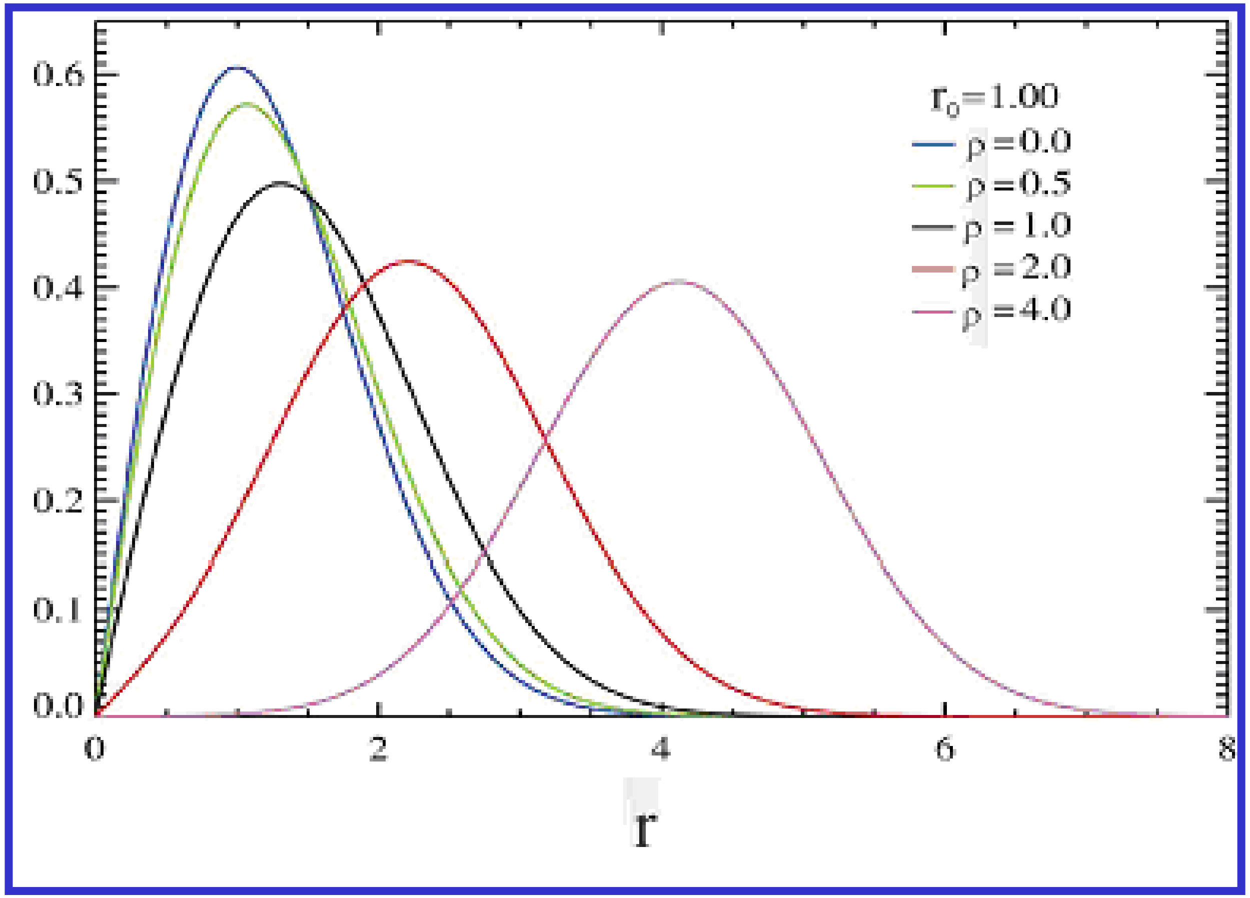
Se il collegamento è di tipo LOS, il raggio diretto che collega Tx e Rx sarà di tipo deterministico e molto più grande in potenza rispetto a tutti gli altri.

In questo caso, tra tutti i contributi ricevuti, se ne misura uno molto maggiore degli altri.

Fast Fading

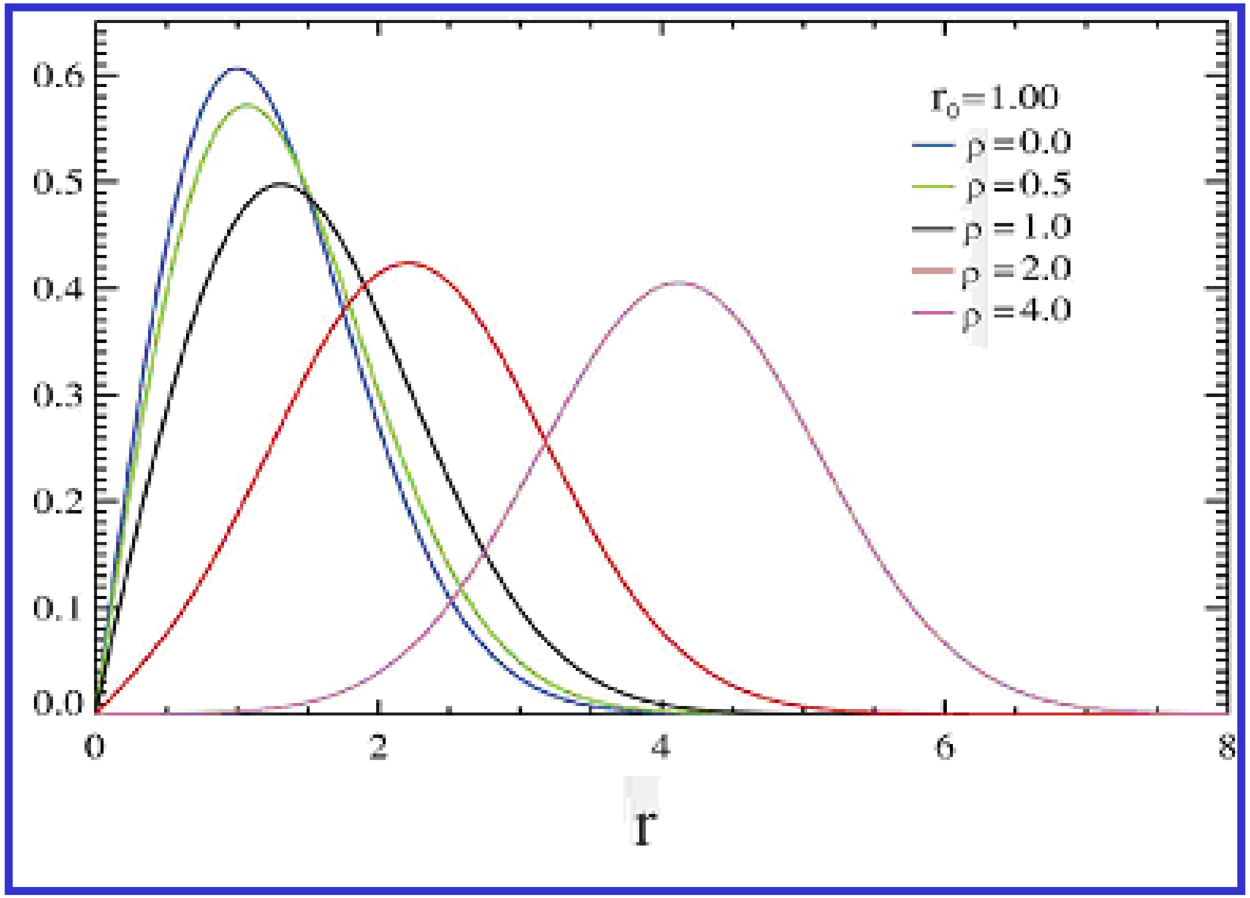
La densità di probabilità complessiva è una distribuzione di Rice (con *p(r)* definita solo per r $\geq$0):

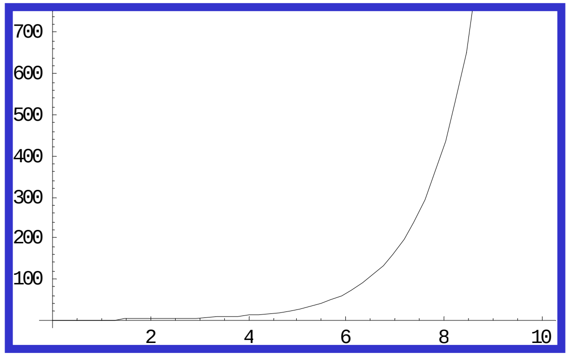
$$p(r) = \frac{r}{\rho^2} e^{-\frac{r^2+V_0^2}{2\rho^2}} \cdot I_0\left(\frac{r \cdot V_0}{\rho^2}\right)$$



Fast Fading

Questa distribuzione è proporzionale ad I_0, funzione di Bessel modificata di prima specie e di ordine zero, che ha andamento esponenziale. $I_0(x)$ parte da 1 per argomento nullo e tende ad infinito come $\frac{e^x}{\sqrt{x}}$ per x che tende a infinito.





$I_0(x)$

Fast Fading

$$p(r) = \frac{r}{\rho^2} e^{-\frac{r^2+V_0^2}{2\rho^2}} \cdot I_0\left(\frac{r \cdot V_0}{\rho^2}\right)$$

$V_0^2/2$ è proporzionale alla potenza del segnale ricevuto dominante (all'ampiezza V_0 del raggio diretto)

ρ^2 è proporzionale alla potenza associata a tutti gli altri segnali provenienti dai cammini multipli

L'ampiezza relativa del segnale dominante è espressa dal parametro K= $V_0^2/(2\rho^2)$.

Per V_0 piccolo (tendente a zero), la distribuzione di Rice tende ad una distribuzione di tipo Raileygh.

Per V_0 è grande, si ottene una distribuzione gaussiana centrata su V_0

Fast Fading

Il modello di Rice, quando il segnale diretto è molto più grande degli altri ($V_0 >> \rho$) è lo stesso modello che si può utilizzare quando si considera la ricezione di un segnale tenendo conto del rumore (ci si aspetta di ricevere una ampiezza che sia una gaussiana attorno al segnale LOS, quindi i contributi NLOS diventano come una sorta di rumore aggiuntivo rispetto a quello di ricezione).

CDF di Rice: simile a CDF di Raileygh

Inizialmente è più bassa, poi tende a crescere più rapidamente, tanto più rapidamente quanto più è grande il rapporto V_0/ρ.

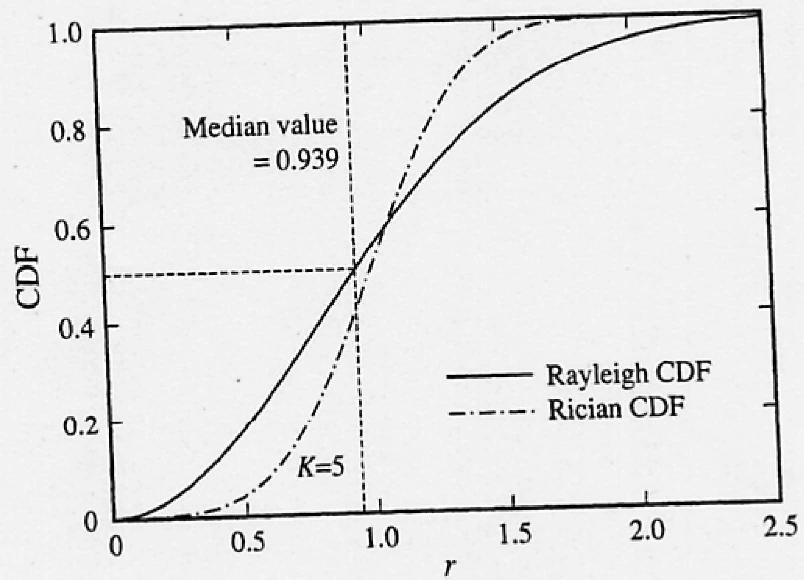


Figure 2-5 Cumulative distribution functions $P(r)$ for a Rayleigh distribution and a Rician distribution with $K = 5$. Both distributions have mean value $\langle r \rangle = 1$.

Slow Fading

Le variazioni del segnale ricevuto in una piccola area possono essere caratterizzate dal fast fading mediando il segnale in una finestra spaziale sufficientemente piccola.

La presenza di edifici e altri oggetti che ostruiscono il percorso fra Tx e Rx fa si che questa media vari non solo all’interno della stessa area (e quindi su scale dell’ordine del metro), ma anche fra un’area e l’altra (e quindi su scale dell’ordine della decina di metri).

Questa variazione del segnale è chiamata slow fading, o fading lento, ed è conseguenza del fatto che, se ci si sposta di decine di m, alcuni raggi scompaiono e altri raggi possono comparire (quindi i raggi che vengono ricevuti cambiano di numero, o qualcuno di essi cambia in maniera consistente di ampiezza).

Ciò causa una variazione del campo ricevuto di almeno altri 10 dB che si aggiungono a quelli dovuti al fast fading.

Slow Fading

La variazione della media mobile è spesso descritta in termini di potenza media (espressa in dB), piuttosto che in termini di tensione media.

La potenza media in una piccola area sarà proporzionale alla media spaziale della tensione al quadrato <V^2(x)>:

$$U_i = 10 \log_{10} \left\langle V^2 (x_i) \right\rangle$$

dove U_i è una variabile aleatoria, l'indice *i* si riferisce a differenti piccole aree ed x_i è la posizione della *i*-esima area.

La distribuzione della variabile aleatoria U_i attorno al suo valore medio è molto simile ad una distribuzione di tipo Gaussiano, con PDF data da:

$$p(U_i - \langle U \rangle) = \frac{1}{\sigma_{SF}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\left(U_i - \langle U \rangle\right)^2}{2\sigma_{SF}^2}}$$

Slow Fading

In città, la deviazione standard σ_{SF} (scarto quadratico medio, che misura la dispersione dei dati attorno al valore atteso) dello shadow fading è tipicamente compresa fra 6 e 10 dB.

Dato che il logaritmo della potenza presenta una PDF gaussiana (o normale), lo shadow fading è anche detto fading lognormale.

Il fading lento è il risultato di una successione di eventi che il segnale subisce durante il percorso di propagazione, ognuno dei quali ha l’effetto di moltiplicare il segnale per una quantità casuale.

Dipendenza dalla distanza

Per poter separare lo shadow fading dalla variazione del segnale ricevuto con la distanza dalla RBS, si grafica la potenza media in dB associata ad ogni piccola area rispetto alla distanza R in scala logaritmica.

Si ricava successivamente la retta che meglio approssima i dati misurati utilizzando il metodo dei minimi quadrati.

L'equazione della retta "interpolante" ha la forma:

$$P_{dB}(R) = 10\log_{10} P_T + 10\log_{10} A - n \cdot 10\log_{10} R$$

che corrisponde alla nota espressione:

$$P = P_T \cdot A / R^n$$

dove P_T è la potenza trasmessa dalla RBS, n l'indice di pendenza, ed A l'intercetta per R=1.

Dipendenza dalla distanza

La retta ottenuta rappresenta la dipendenza media del segnale dalla distanza R, e la perdita per fading lento nella *i*-esima area può essere ottenuta come differenza fra la potenza media del segnale nell'area $U(R_i)$ meno la potenza media legata alla distanza $P_{dB}(R_i)$ (misurata in corrispondenza dell'*i*-esima area): $U(R_i)-P_{dB}(R_i)$.

La relazione tra l'ampiezza del segnale ricevuto e la distanza R dal trasmettitore non è lineare

Si preferisce, anziché utilizzare modelli non lineari, fare ricorso al logaritmo delle due grandezze (ottenendo una relazione lineare), per poter costruire dei modelli lineari.

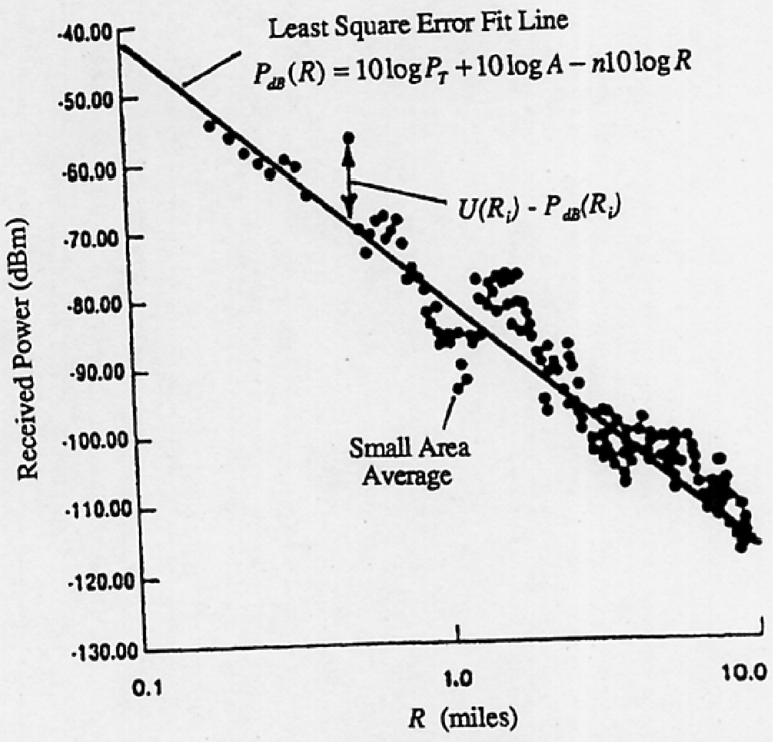


Figure 2-6 For measurements on flat terrain, the least-squares fit line to the small-area average is the range dependence, while the deviations from the least-squares fit line give the shadow fading. Small-area averages are based on [5] (©1978 IEEE).