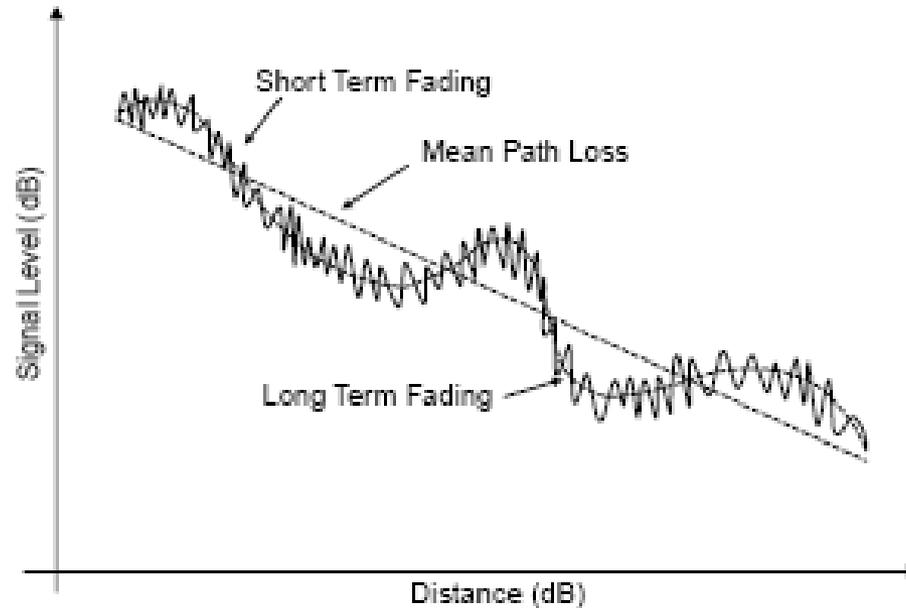


Richiami sul canale di comunicazione radio

Richiami sul canale di comunicazione radio



Fading lento (shadowing) è causato da ostacoli di grandi dimensioni (palazzi) tra TX e RX

Il path loss è proporzionale a r^α , dove α è in genere tra 2.5 e 5 (in ambiente urbano)
Entrambi si affrontano con soluzioni di sistema (es. Posizione della stazione base)

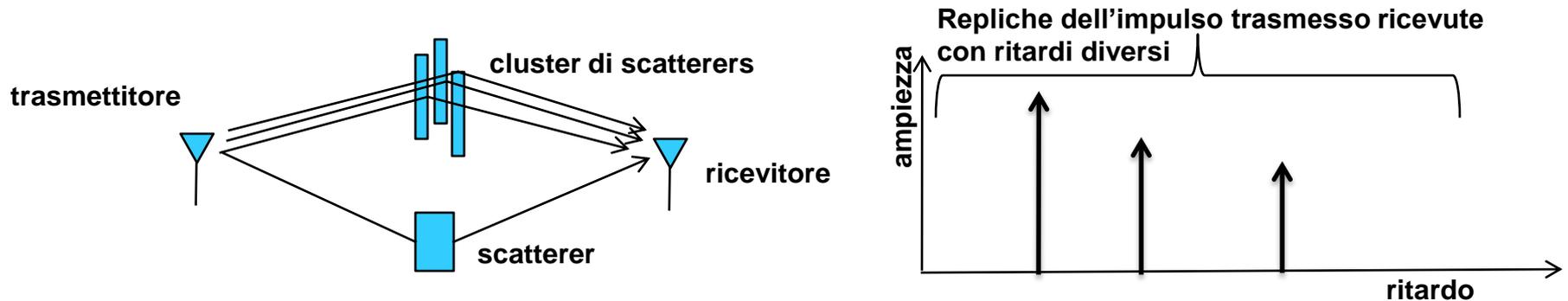
Il fading veloce (Fast fading) è dovuto allo scattering del segnale dovuto a oggetti prossimi al trasmettitore (legato quindi al fenomeno del multipath)

Si affronta in genere progettando opportunamente l'interfaccia radio in particolare a livello fisico (es. Modulazione) e di collegamento (es. Codifica, meccanismi ARQ)

Richiami sul canale di comunicazione radio

Canali affetti da “cammini multipli” ossia multipath

Su di un canale caratterizzato dal fenomeno dei cammini multipli (multipath), in seguito alla trasmissione di un singolo impulso, il segnale ricevuto apparirà come un treno di impulsi corrispondenti alla componente diretta (se presente) e alle componenti riflesse da singoli oggetti riflettenti (scatterers) o da un cluster di scatterers.



Nota: cluster di scatterers sono dei riflettori che producono delle repliche del segnale con ritardi molto vicini e come tali, a volte, non risolvibili.

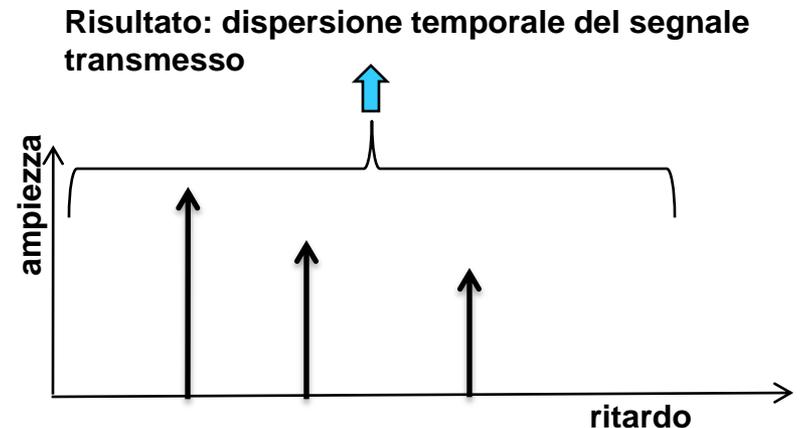
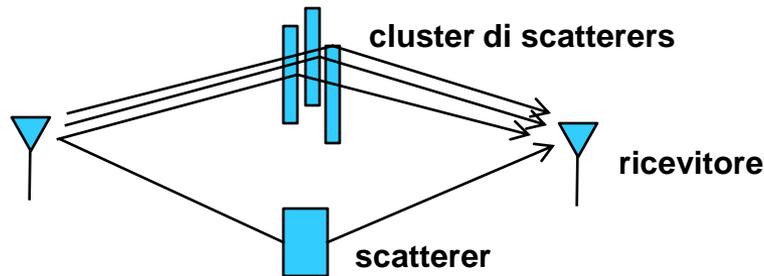
Si dice che due componenti di multipath con ritardo τ_1 e τ_2 sono risolvibili se la differenza tra i due ritardi supera significativamente l'inverso della banda del segnale.

Le componenti non risolvibili non possono essere separate al ricevitore e vengono in genere combinate in un'unica componente di multipath con stesso ritardo e ampiezza e fase pari alla somma delle ampiezze e delle fasi delle varie componenti.

Richiami sul canale di comunicazione radio

Canali affetti da “cammini multipli” ossia multipath

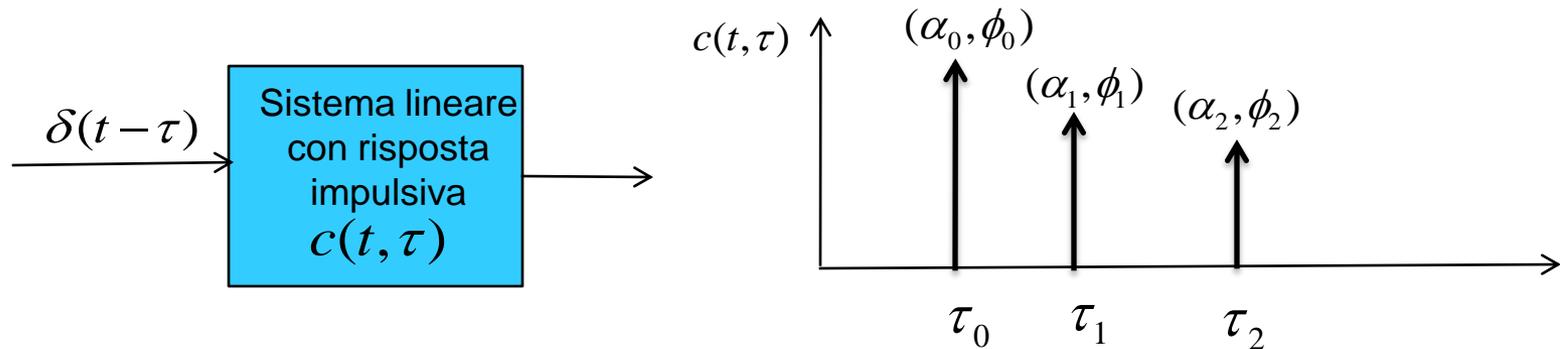
La risultante espansione nel tempo del segnale (time delay spread) causa una distorsione nel segnale ricevuto che in ogni istante t non sarà un impulso trasmesso in un istante di tempo $t-\tau$, ma la somma di questo impulso con altri impulsi trasmessi in istanti di tempo precedenti a $t-\tau$.



Richiami sul canale di comunicazione radio

Canali affetti da “cammini multipli” ossia multipath

Possiamo modellizzare questo canale affetto da fading come un “sistema” lineare caratterizzato da una certa risposta impulsiva:

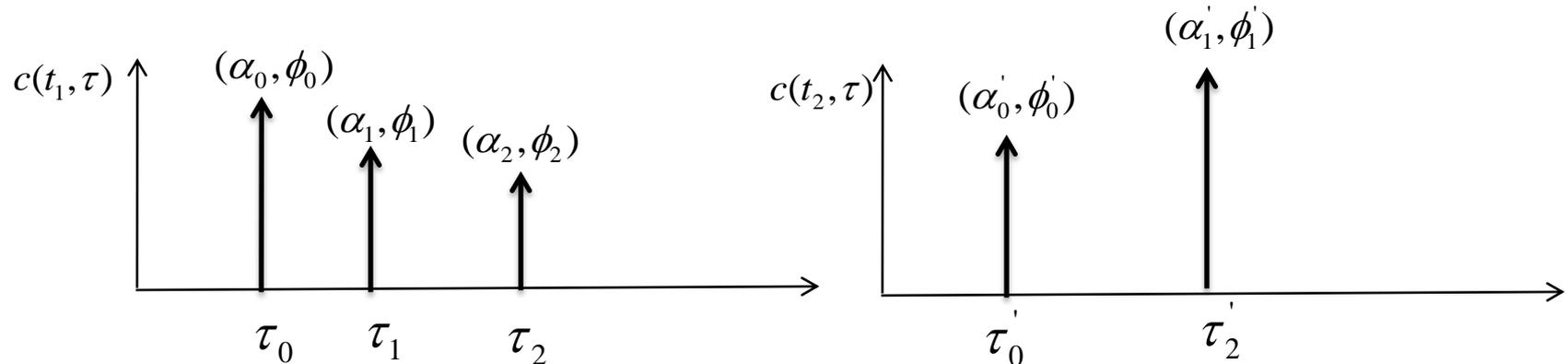


$c(t, \tau)$ rappresenta la risposta del canale al tempo t dovuta ad un impulso applicato al tempo $(t - \tau)$

Richiami sul canale di comunicazione radio

Canali affetti da “cammini multipli” ossia multipath

Se trasmettiamo lo stesso impulso in istanti di tempo distinti, in generale osserviamo che il treno di impulsi ricevuto cambia nel numero di impulsi, nell'ampiezza e nella fase di ogni singolo impulso.



Questo indica che il canale è TEMPO VARIANTE. Questa tempo varianza è dovuta a varie cause: si muove il ricevitore e/o il trasmettitore o l'ambiente circostante (gli scatterer).

Richiami sul canale di comunicazione radio

Modelli statistici per caratterizzare canali affetti da multipath

Risposta impulsiva del canale tempo-variante

Un generico segnale trasmesso con spettro attorno alla portante f_c , posso scriverlo in termini del suo involucre complesso $u(t)$ come segue:

$$s(t) = \text{Re} \left[u(t) e^{j2\pi f_c t} \right]$$

In seguito al passaggio per un canale tempo-variante caratterizzato da risposta impulsiva $c(t, \tau)$, il segnale ricevuto è ottenuto dalla convoluzione del segnale con la risposta impulsiva:

$$r(t) = \text{Re} \left\{ \left(\int_{-\infty}^{\infty} c(t, \tau) u(t - \tau) d\tau \right) e^{j2\pi f_c t} \right\} \quad (1)$$

Tuttavia, come già detto, nel caso di canale con multipath a trascurando il rumore additivo, il segnale ricevuto in un istante t è la somma della componente LOS e delle repliche, ognuna diversamente attenuata e sfasata. Quindi, possiamo anche scrivere $r(t)$ come:

$$r(t) = \text{Re} \left\{ \left[\sum_{n=0}^{N(t)} \alpha_n(t) e^{-j\phi_n(t)} u(t - \tau_n(t)) \right] e^{j2\pi f_c t} \right\} \quad (2)$$

Numero di repliche

Richiami sul canale di comunicazione radio

Modelli statistici per caratterizzare canali affetti da multipath

Risposta impulsiva del canale tempo-variante

Dalla (1) e dalla (2) si ricava che:

$$c(t, \tau) = \sum_{n=0}^{N(t)} \alpha_n(t) e^{-j\phi_n(t)} \delta(\tau - \tau_n(t))$$

Homework: mostrare la precedente affermazione

Parentesi: per alcuni modelli di canale è più appropriato vedere il segnale ricevuto come un continuo di componenti di multipath e quindi la sommatoria diventa un integrale:

$$c(t, \tau) = \int \alpha(\xi, t) e^{-j\phi(\xi, t)} \delta(\tau - \xi) d\xi = \alpha(\tau, t) e^{-j\phi(\tau, t)}$$

Richiami sul canale di comunicazione radio

Modelli statistici per caratterizzare canali affetti da multipath

Risposta impulsiva del canale tempo-variante

Se ogni componente di multipath corrisponde alla riflessione da un singolo scatterer, allora $\alpha_n(t)$ è una funzione dell'attenuazione da spazio libero e dello shadowing e la fase $\phi_n(t)$ cambia a secondo del ritardo $\tau_n(t)$ e dello Shift Doppler:

$$\phi_n(t) = \underbrace{2\pi f_c \tau_n(t)} - \underbrace{\phi_{D_n}(t)}$$

Sfasamento legato al
ritardo

Sfasamento dovuto a
shift Doppler (vedi
nota)

Nota: il Doppler shift è la deviazione in frequenza osservata la ricevitore quando c'è moto relativo tra TX e RX ed è dato da $f_{D_n}(t) = v \cos \theta_n(t) / \lambda$ dove il $\theta_n(t)$ è l'angolo di arrivo nella direzione del moto tra TX e RX. Lo sfasamento determinato dal Doppler shift è dato da:

$$\phi_{D_n}(t) = \int 2\pi f_{D_n}(\tau) d\tau$$

Richiami sul canale di comunicazione radio

Modelli statistici per caratterizzare canali affetti da multipath

Risposta impulsiva del canale tempo-variante

Se la n-ma componente di multipath invece viene da un cluster di riflettori (ossia, la banda del ricevitore non e' in grado di distinguere le diverse repliche provenienti dai riflettori del cluster), allora per il ricevitore $u(t - \tau_1) \approx u(t - \tau_2)$ e le componenti di multipath vengono combinate in una singola componente con ritardo $\tau \approx \tau_1 \approx \tau_2$ e un'ampiezza e fase corrispondenti alla somma delle varie componenti. Questa somma di componenti sfasate dello stesso segnale dara' origine a interferenza costruttiva o distruttiva che risultera' in ampie variazioni nell'ampiezza di questa n-ma replica. Le ampie variazioni dell'ampiezza nel segnale ricevuto dovute al fenomeno descritto vengono chiamate

“fading” o “multipath fading”

Tra l'altro, queste variazioni dell'ampiezza, oltre che ampie (es. 30dB) possono essere veloci nel tempo poiché sono legate a variazioni della fase $\phi_n(t)$. Infatti, per le tipiche frequenze portanti dei sistemi radiomobili è verificata la condizione: $f_c \tau_n(t) \gg 1$. Se questa condizione è verificata, bastano piccoli movimenti per determinare un elevato cambiamento della fase (e quindi il passaggio da un tipo di interferenza costruttiva ad una distruttiva o viceversa).

Richiami sul canale di comunicazione radio

Modelli statistici per caratterizzare canali affetti da multipath

Risposta impulsiva del canale tempo-variante

Per esempio: con $f_c = 1GHz$ e un valore di $\tau_n = 50ns$ tipico di ambienti indoor,



$$f_c \tau_n(t) = 50 \gg 1$$

In ambienti outdoor, τ_n è in genere molto maggiore e quindi, tanto più è verificata quella condizione

Richiami sul canale di comunicazione radio

Modelli statistici per caratterizzare canali affetti da multipath

Caratterizzazione statistica del canale tempo-variante

$\alpha_n(t)$ $\phi_n(t)$ Variano in modo casuale e imprevedibile e vengono modellizzati con due processi aleatori indipendenti, stazionari ed ergodici

Nota: Un processo stazionario è ergodico se la media temporale calcolata su di una qualunque realizzazione del processo, coincide con la media di insieme relativa ad una variabile aleatoria estratta ad un istante qualsiasi (per la stazionarietà) da una realizzazione qualsiasi (per l'ergodicità).

$$c(t, \tau) = \sum_{n=0}^{N(t)} \alpha_n(t) e^{-j\phi_n(t)} \delta(\tau - \tau_n(t))$$

Quando il numero di cammini è elevato, si può applicare il teorema del limite centrale e modellizzare la risposta impulsiva come un processo aleatorio Gaussiano complesso nella variabile t , che quindi è completamente caratterizzato dalla sua media, autocorrelazione e cross-correlazione della componente in fase e quadratura.

Assumendo che:

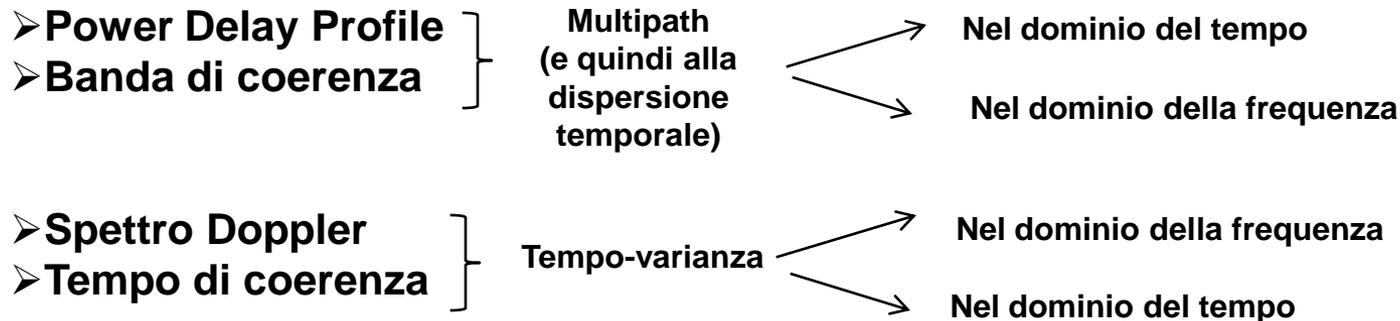
$\phi_n(t)$ sono distribuite uniformemente tra $[-\pi, \pi]$, allora le componenti in fase e quadratura sono processi gaussiani indipendenti con la stessa autocorrelazione, media zero e cross-correlazione nulla.

Richiami sul canale di comunicazione radio

Modelli statistici per caratterizzare canali affetti da multipath

Caratterizzazione statistica del canale tempo-variante

Le più importanti caratteristiche di un canale tempo-variante sono:



E sono tutte derivate da:

- **Autocorrelazione del canale:** $A_c(\tau, \Delta t)$
- **Funzione di scattering:** $S_c(\tau, \rho)$

Richiami sul canale di comunicazione radio

Modelli statistici per caratterizzare canali affetti da multipath

Caratterizzazione statistica del canale tempo-variante

Funzione di autocorrelazione del canale

$$A_c(\tau_1, \tau_2; t, t + \Delta t) = E\left[c^*(\tau_1; t)c(\tau_2; t + \Delta t)\right]$$

Ipotesi di processo **stazionario in senso lato** (Wide-Sense Stationary, WSS),



Le statistiche del secondo ordine del canale, misurate in due diversi istanti di tempo dipendono solo dalla differenza tra questi istanti di tempo.



$$E\left[c^*(\tau_1; t_1)c(\tau_2; t_1 + \Delta t)\right] = E\left[c^*(\tau_1; t_2)c(\tau_2; t_2 + \Delta t)\right] = A_c(\tau_1, \tau_2; \Delta t)$$

Ipotesi di diffusione incorrelata (Uncorrelated Scattering, **US**)



la risposta del canale associata alla componente di multipath a ritardo τ_1 è scorrelata con la risposta associata con la componente di multipath a ritardo τ_2

Richiami sul canale di comunicazione radio

Modelli statistici per caratterizzare canali affetti da multipath

Caratterizzazione statistica del canale tempo-variante

Funzione di autocorrelazione del canale

Per un canale WSSUS (stazionario in senso lato con diffusione incorrelata), vale la seguente relazione [1]:

$$E\left[c^*(\tau_1; t)c(\tau_2; t + \Delta t)\right] = 0 \quad \text{per } \tau_1 \neq \tau_2$$



$$E\left[c^*(\tau_1; t)c(\tau_2; t + \Delta t)\right] = A_c(\tau_1; \Delta t)\delta(\tau_1 - \tau_2) \equiv A_c(\tau; \Delta t)$$



La potenza media associata al canale in funzione del ritardo della componente di multipath e la differenza nei tempi di osservazione.

Si noti che l'ipotesi US è ragionevole dato che in gran parte degli ambienti d'interesse quelle due componenti di multipath saranno state causate da "diffusori" (scatterers) diversi.

[1] P.A. Bello, "Characterization of randomly time-variant channels," *IEEE Trans. Commun. Syst.*, pp. 360-393, Dec. 1963.

Richiami sul canale di comunicazione radio

Modelli statistici per caratterizzare il canali affetti da multipath

Caratterizzazione statistica del canale tempo-variante

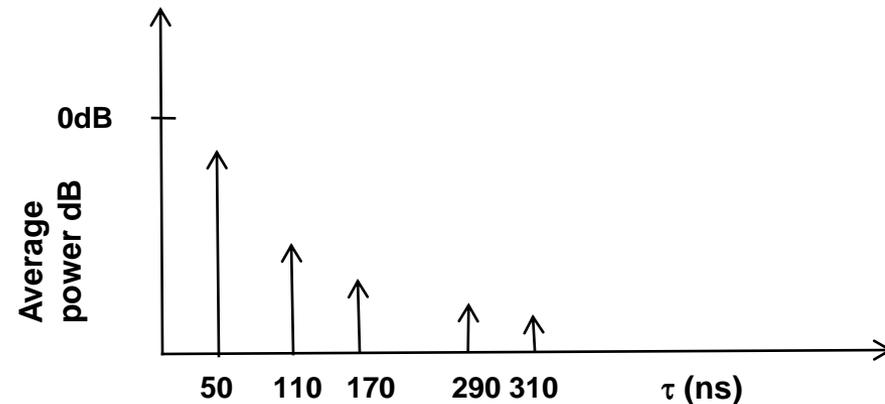
Power delay profile (profilo dell'intensità del multipath o spettro dei ritardi)

E' definito come $A_c(\tau) = A_c(\tau;0)$

Rappresenta la potenza media associata ad una data componente di multipath
Trasmetto un impulso e dopo aver ricevuto la prima replica (che potrebbe essere la componente in LOS), ricevo una replica dopo τ_1 secondi con un certo livello di potenza medio, ricevo un'altra replica dopo τ_2 secondi con un certo livello di potenza medio, e cosi via.

Table A.2.6.1: ITU Channel Model for Indoor Office

Tap	Channel A		Channel B		Doppler spectrum
	Relative delay (ns)	Average power (dB)	Relative delay (ns)	Average power (dB)	
1	0	0	0	0	Flat
2	50	-3.0	100	-3.6	Flat
3	110	-10.0	200	-7.2	Flat
4	170	-18.0	300	-10.8	Flat
5	290	-26.0	500	-18.0	Flat
6	310	-32.0	700	-25.2	Flat



Richiami sul canale di comunicazione radio

Modelli statistici per caratterizzare canali affetti da multipath

Caratterizzazione statistica del canale tempo-variante

Power delay profile (profilo dell'intensità del multipath o spettro dei ritardi)

E' importante poter quantificare la dispersione temporale del canale (delay spread), in quanto se questo delay spread $T_m \gg T$ (=intervallo di simbolo), le repliche creano interferenza ai simboli mandati successivamente. Questo effetto si chiama interferenza intersimbolica (ISI).

Si possono trovare diverse caratterizzazioni della dispersione temporale del canale (delay spread).

A volte come misure del delay spread T_m si usa la differenza tra il ritardo con cui è ricevuta la replica con potenza media pari a 10 o 20dB minore della potenza media della componente ricevuta con potenza maggiore. Infatti, in linea di principio potrei avere infinite repliche. Tuttavia, dopo un certo intervallo di tempo, le repliche che ricevo sono caratterizzate da un livello medio di potenza molto minore di quello della componente ricevuta con maggiore potenza e quindi, posso trascurarle, in quanto non contribuiscono in modo importante all'ISI.

Richiami sul canale di comunicazione radio

Modelli statistici per caratterizzare il canali affetti da multipath

Caratterizzazione statistica del canale tempo-variante

Power delay profile (profilo dell'intensità del multipath o spettro dei ritardi)

Più spesso si caratterizza il delay spread tramite la sua deviazione standard (Root Mean Square, rms):

$$\sigma_{T_m} = \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} (\tau - \mu_{T_m})^2 A_c(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} A_c(\tau) d\tau}}$$

dove:

$$\mu_{T_m} = \frac{\int_0^{\infty} \tau A_c(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} A_c(\tau) d\tau}$$

Con la deviazione standard, automaticamente si dà peso minore alle repliche più deboli rispetto a quelle più forti, nella determinazione della dispersione temporale del canale

Se indichiamo con T' un intervallo di tempo per cui quando $\tau \geq T'$ allora $A_c(\tau) \approx 0$. Questo valore T' può considerarsi come una grossolana, ma utile caratterizzazione della dispersione introdotta dal canale. Una buona scelta per questo valore è:

$$T' \approx 3\sigma_{T_m}$$

Richiami sul canale di comunicazione radio

Modelli statistici per caratterizzare canali affetti da multipath

Caratterizzazione statistica del canale tempo-variante

Power delay profile (profilo dell'intensità del multipath o spettro dei ritardi)

Homework: si determini la media e il rms di un canale in cui il power delay profile è di tipo esponenziale:

$$A_c(\tau) = \frac{1}{\bar{T}_m} e^{-\tau/\bar{T}_m}, \quad \tau \geq 0$$

Richiami sul canale di comunicazione radio

Modelli statistici per caratterizzare canali affetti da multipath

Caratterizzazione statistica del canale tempo-variante

Banda di coerenza

Lo stesso effetto (ossia la dispersione temporale), si può osservare nel dominio della frequenza andando a prendere la trasformata di Fourier del power delay profile:

$$A_c(\Delta f) = \int_{-\infty}^{\infty} A_c(\tau) e^{-j2\pi\Delta f\tau} d\tau$$

Di fatto $A_c(\Delta f) = A_c(\Delta f; 0) = E[C^*(f; t)C(f + \Delta f; t)]$ nell'ipotesi di canale WSSUS, dove

$$C(f; t) = \int_{-\infty}^{\infty} c(\tau; t) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$$

Si può misurare in pratica trasmettendo due sinusoidi sul canale a frequenze f_1 e f_2 tali che $f_1 - f_2 = \Delta f$ e calcolando la loro cross-correlazione al ricevitore per un tempo di separazione $\Delta t = 0$

Richiami sul canale di comunicazione radio

Modelli statistici per caratterizzare canali affetti da multipath

Caratterizzazione statistica del canale tempo-variante

Banda di coerenza

Essendo $A_c(\Delta f)$ una autocorrelazione della $C(f;t)$, avrà un picco per $\Delta f = 0$ e poi decresce. Per valori di Δf per i quali $A_c(\Delta f) \approx 0$, significa che le risposte del canale alle due sinusoidi separate in frequenza per valori di Δf risultano essere scorrelate, ossia il canale si comporta in modo “completamente” diverso nelle due componenti in frequenza.



La **banda di coerenza** del canale è definita come quel range di frequenze

$$B_c \text{ tali per cui } A_c(\Delta f) \approx 0 \text{ per tutti } \Delta f > B_c$$

Dalla relazione della trasformata di Fourier tra $A_c(\Delta f)$ e $A_c(\tau)$, se $A_c(\tau) \approx 0$ per $\tau > T$ allora $A_c(\Delta f) \approx 0$ per $\Delta f > 1/T$



$$B_c \approx 1/T$$

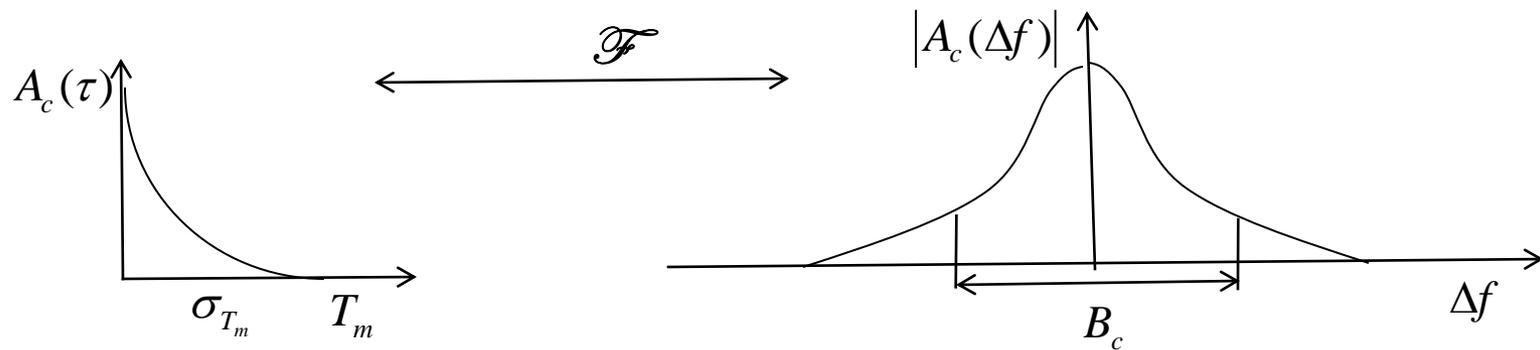
Dove T è in genere il rms delay spread σ_{T_m}

Richiami sul canale di comunicazione radio

Modelli statistici per caratterizzare canali affetti da multipath

Caratterizzazione statistica del canale tempo-variante

Banda di coerenza



Un'approssimazione più generale per la banda di coerenza è: $B_c \approx k / \sigma_{T_m}$

Per esempio in [2] si dimostra che $B_c \approx 0.02 / \sigma_{T_m}$ approssima il campo di frequenze su cui la correlazione del canale supera 0.9 mentre $B_c \approx 0.2 / \sigma_{T_m}$ il campo di frequenze su cui la correlazione supera 0.5.

[2] W.C.Y. Lee, *Mobile Cellular Telecommunications Systems*, McGraw Hill, New York, 1989.

Richiami sul canale di comunicazione radio

Modelli statistici per caratterizzare canali affetti da multipath

Caratterizzazione statistica del canale tempo-variante

Spettro Doppler e tempo di coerenza

Caratterizzano la dispersione in frequenza del canale dovuta alla TEMPO-VARIANZA del canale stesso.

Lo shift Doppler è il fenomeno per cui se TX e RX si muovono ad una velocità relativa tra loro, al ricevitore rivelo una frequenza “leggermente” diversa da quella a cui sto trasmettendo. Più in generale, ho uno shift Doppler ogni qual volta il canale tra TX e RX varia nel tempo. La funzione che viene usata per “catturare” questo effetto è:

$$S_c(\rho) = \int_{-\infty}^{\infty} A_c(\Delta t) e^{-j2\pi\Delta t\rho} d\Delta t \quad \text{Spettro Doppler}$$

Dove: $A_c(\Delta t) \triangleq A_c(\Delta f = 0; \Delta t)$

$S_c(\rho) \triangleq S_c(0; \rho)$ ossia $S_c(\Delta f; \rho)$ per $\Delta f = 0$ dove:

$$S_c(\Delta f; \rho) = \int_{-\infty}^{\infty} A_c(\Delta f; \Delta t) e^{-j2\pi\Delta t\rho} d\Delta t$$

[2] W.C.Y. Lee, *Mobile Cellular Telecommunications Systems*, McGraw Hill, New York, 1989.

Richiami sul canale di comunicazione radio

Modelli statistici per caratterizzare canali affetti da multipath

Caratterizzazione statistica del canale tempo-variante

Spettro Doppler e tempo di coerenza

$A_c(\Delta t)$ è una autocorrelazione che ci dice come la risposta impulsiva del canale sia scorrelata nel tempo

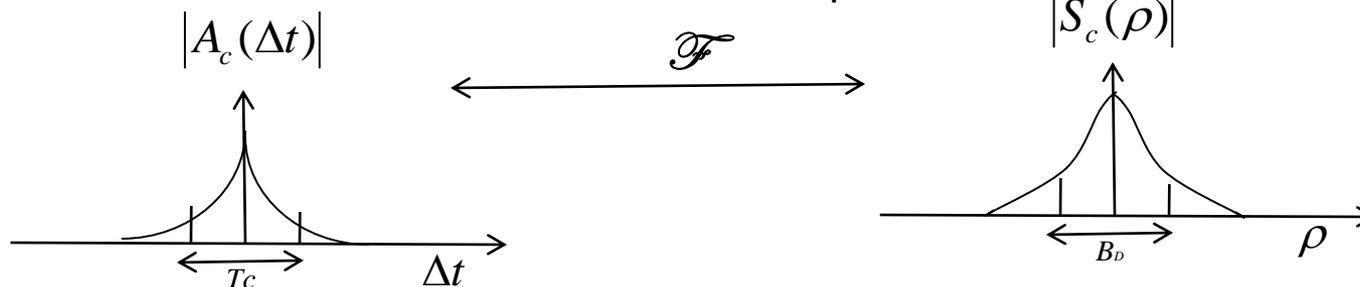


Se $A_c(\Delta t = T) \approx 0$ T è la separazione tra due osservazioni della risposta impulsiva del canale, per la quale le due osservazioni sono scorrelate

Si definisce **tempo di coerenza del canale**, T_c , l'intervallo di tempo per cui, se il $\Delta t > T_c$ allora $A_c(\Delta t) \approx 0$

Il massimo valore di ρ per cui $|S_c(\rho)|$ è maggiore di zero viene detto **Doppler spread** (dispersione Doppler), denotata con B_D .

Per la relazione tra $A_c(\Delta t)$ e $S_c(\rho)$, si può affermare che $B_D \approx 1/T_c$



Richiami sul canale di comunicazione radio

Modelli statistici per caratterizzare canali affetti da multipath

Caratterizzazione statistica del canale tempo-variante

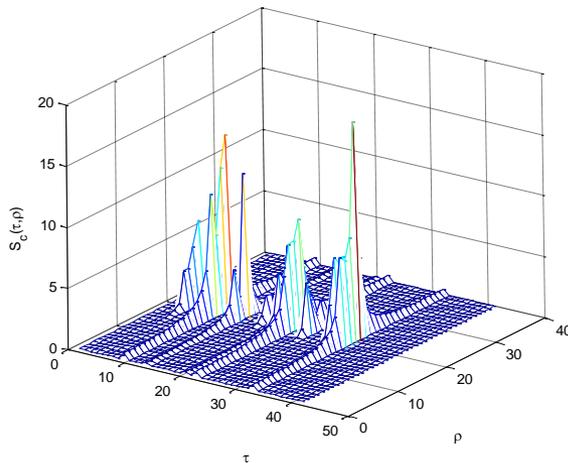
Funzione di scattering (funzione di diffusione)

E' la trasformata di Fourier della $A_c(\tau; \Delta t)$ rispetto al parametro Δt :

$$S_c(\tau; \rho) = \int_{-\infty}^{\infty} A_c(\tau; \Delta t) e^{-j2\pi\rho\Delta t} d\Delta t$$

Ed è la trasformata inversa di Fourier di $S_c(\Delta f; \rho)$.

$S_c(\tau; \rho)$ e $A_c(\Delta f; \Delta t)$ sono legate dalla seguente trasformata doppia di Fourier.



$$S_c(\tau; \rho) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_c(\Delta f; \Delta t) e^{-j2\pi\rho\Delta t} e^{j2\pi\Delta f\tau} d\Delta t d\Delta f$$

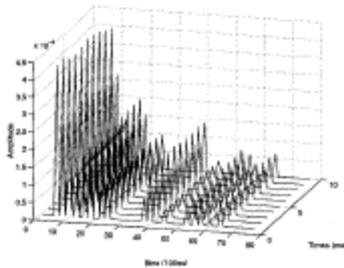
Misure empiriche di questa funzione sono spesso usate per approssimare il delay spread, la banda di coerenza, il Doppler spread e il tempo di coerenza

Richiami sul canale di comunicazione radio

Modelli statistici per caratterizzare canali affetti da multipath

Caratterizzazione statistica del canale tempo-variante

Funzione di scattering (funzione di diffusione)



The time-variant impulse response of the channel.

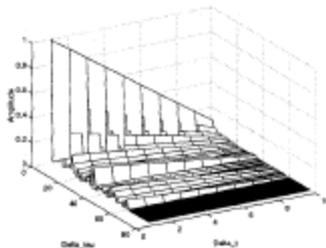


Fig. 2. The auto-correlation function of the received signal.

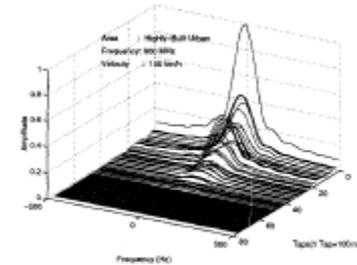


Fig. 3. The scattering function of the channel.

G. L. Turin, F. D. Clapp, T. L. Johnston, S. B. Fine and D. Lavry, "A statistical model of urban multipath propagation," *IEEE Trans. on Vehic. Tech.*, Vol. VT-21, No. 1, pp. 1-9, Feb. 1972.

Richiami sul canale di comunicazione radio

Modelli statistici per caratterizzare canali affetti da multipath

L'impatto del multipath sul segnale ricevuto

Canale con fading NON selettivo in frequenza (fading piatto)

Visto nel tempo

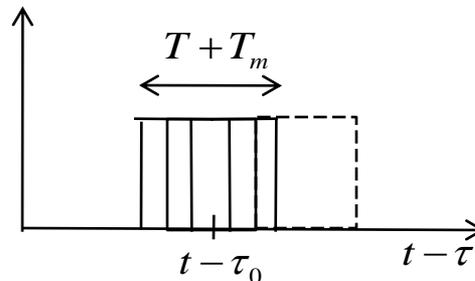
$$T_m \ll T$$

Tutte le componenti di multipath arrivano nel periodo di simbolo T . Non c'è ISI e l'effetto principale è una riduzione dell'SNR dovuta alle fluttuazioni veloci della fase delle componenti che si sommano

Visto in frequenza

$$B_c > 1/T \approx B$$

Tutte le componenti spettrali subiscono la medesima attenuazione



Richiami sul canale di comunicazione radio

Modelli statistici per caratterizzare il canali affetti da multipath

L'impatto del multipath sul segnale ricevuto

Canale con fading selettivo in frequenza

Visto nel tempo

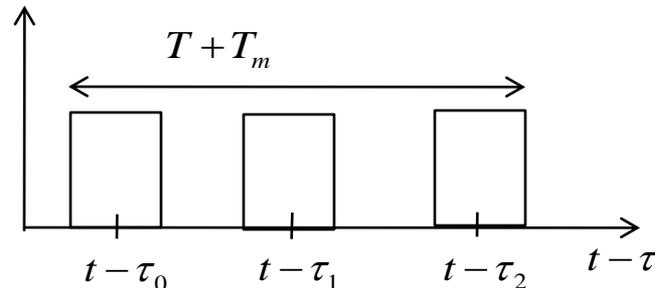
$$T_m \gg T$$

Le componenti arrivano oltre la durata del periodo di simbolo. Si verifica ISI

Visto in frequenza

$$B_c < 1/T \approx B$$

Alcune componenti spettrali subiscono attenuazioni differenti



Richiami sul canale di comunicazione radio

Modelli statistici per caratterizzare il canali affetti da multipath

L'impatto della tempo-varianza sul segnale ricevuto

Canale con fading lento

Visto nel tempo

$$T_c \gg T$$

Il canale rimane per lo più invariato durante tutto l'intervallo di propagazione del simbolo

Visto in frequenza

$$B_D < 1/T \approx B$$

“sparpagliamento” Doppler trascurabile

Canale con fading rapido

$$T_c \ll T$$

Il canale varia più volte mentre il simbolo si propaga determinando una distorsione nella forma base dell'impulso

$$B_D > 1/T \approx B$$

Richiami sul canale di comunicazione radio

Table A.1.1: Typical Doppler Spreads and Coherence Times for WiMAX [Andrews2007]

Carrier Freq	Speed	Max Doppler Spread	Coherence Time
2.5 GHz	2 km/hr	4.6 Hz	200 ms
2.5 GHz	45 km/hr	104.2 Hz	10 ms
2.5 GHz	100 km/hr	231.5 Hz	4 ms
5.8 GHz	2 km/hr	10.7 Hz	93 ms
5.8 GHz	45 km/hr	241.7 Hz	4 ms
5.8 GHz	100 km/hr	537 Hz	2 ms

Richiami sul canale di comunicazione radio

Selettività del canale

Channel spread	Selettività del canale	Misura della selettività
Delay spread	Selettività in frequenza	Banda di coerenza
Doppler spread	Selettività nel tempo	Tempo di coerenza
Angle spread	Selettività spaziale	Distanza di coerenza